Université Paris Nanterre
200 av. de la République
92001 Nanterre Cedex
www.parisnanterre.fr

Membre de l'université Paris Lumières

École doctorale 395 : Espaces, Temps, Cultures
UMR 7055 Préhistoire et Technologie

Mélissa CADET

Reconstitution technologique de la production préhistorique tardive (env. 1000 av. J.-C - 500 ap. J.-C) de cuivre au Complexe de Vilabouly (Laos central)

Volume 1 : Texte

Thèse présentée et soutenue publiquement le ***14/06/2021***

en vue de l'obtention du doctorat de Archéologie-Ethnologie de l'Université Paris Nanterre

sous la direction de M. Philippe Dillmann (UMR 3685 LAPA/NIMBE, Université Paris-Nanterre)

et de M. T.O Pryce (co encadrant, UMR 7055 PreTech)

Jury * **:**

Rapporteur·e :	M. Thilo Rehren	Prof., UCL Institute of Archaeology, University College London, Londres
Rapporteur·e :	Mme. Miriam Stark	Prof., College of Social Sciences, UH Manoa, Hawaï
Membre du jury :	Mme. Bérénice Bellina	Chargée de recherches, UMR 7055 Préhistoire et Technologie (CNRS)
Membre du jury :	Mme. Aude Mongiatti	Chercheur senior, Scientific Research Department; The British Museum, Londres
Membre du jury :	M. Oliver Pryce	Chargé de recherches, UMR 7055 Préhistoire et Technologie (CNRS)
Membre du jury :	M. Philippe Dillmann	Directeur de Recherches, UMR 3685 LAPA/NIMBE, CEA/CNRS

REMERCIEMENTS

Arrivée à terme de mes recherches je souhaite adresser mes remerciements aux nombreuses personnes qui m'ont apporté aide et soutien durant ces années et sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Cette thèse est l'aboutissement de mes cinq années d'université en histoire de l'art/archéologie, au fil desquelles je me suis dirigée vers l'archéométrie. Le domaine de l'archéométrie m'a alors permis de m'ouvrir à un champ d'application qui éveille constamment ma curiosité et ma réflexion.

En premier lieu, j'adresse toute ma reconnaissance à Philippe Dillmann et Oliver Pryce, directeur et co-encadrant qui ont dirigé mon travail et m'ont accordé leur confiance pour mener à bien cette recherche. Leur expertise m'a permis de développer mes compétences analytiques pour l'étude des archéomatériaux ainsi que pour la lecture des résultats qui ont grandement participé à l'aboutissement des conclusions de ce travail. La pluralité et la complémentarité de leurs connaissances m'ont permis de constamment enrichir mes réflexions. De plus, l'archéologie sud-est asiatique était un champ d'études nouveau pour moi au commencement de la thèse. Les échanges avec Oliver Pryce, ainsi que les missions effectuées sur le terrain (Laos, Philippines) m'ont permis d'étoffer ces connaissances et de susciter un intérêt grandissant pour l'archéologie de cette région, me donnant l'envie de poursuivre les recherches dans cette partie du monde. Au bout de ces quatre années, je suis fière de m'être investie dans cette aventure.

L'ANR BROGLASEA (*Bronze and Glass as Cultural Catalysts and Tracers in Early Southeast Asia*) dirigée par Oliver Pryce m'a également permis d'avoir un financement au cours de ces années en m'offrant un cadre de travail et un environnement privilégié au sein du laboratoire Préhistoire et Technologie (PreTech, UMR 7055, CNRS) dans une équipe expérimentée pour la recherche des technologies anciennes. Je l'en remercie. Je remercie également son directeur, Pierre Allard, de m'avoir accueillie au sein du laboratoire. Cette thèse m'a également permis d'être intégrée dans une seconde équipe, au Laboratoire Archéomatériaux et Prévision de l'Altération (LAPA, UMR 3685 NIMBE, CEA/CNRS) dirigée par Philippe Dillmann.

Ce travail n'aurait pas été possible sans la contribution des autorités du Laos, du *Lao Department of Cultural Heritage*, tout particulièrement Viengkeo Souksavatdy directeur du département, Thongsa Sayavongkhamdy et Thonglith Luangkhoth qui nous ont offert leur aide et les permis d'export pour l'ensemble du matériel archéologique de Sepon. Je les en remercie chaleureusement et j'espère que les résultats apportés pourront enrichir les connaissances archéologiques du Laos et leur patrimoine national.

Les résultats présentés dans cette thèse n'auraient pas été réalisables sans l'aide de nombreuses personnes et institutions qui m'ont apporté leurs aides et leurs savoirs :

-En commençant par toute l'équipe de PreTech et du LAPA. Le LAPA m'a tout particulièrement permis de développer un travail de laboratoire et des analyses sur les différents éléments de mon corpus. De plus, ce travail a pu se dérouler dans une ambiance joviale et sereine grâce aux nombreuses

discussions de recherche (ou autres) que j'ai pu avoir avec l'ensemble de l'équipe. Cette dernière se montrait disponible lorsqu'une aide m'était nécessaire. Ainsi, je remercie chaleureusement Sylvain Bauvais pour son aide en microscopie optique et sa bonne humeur coutumière ; Delphine Neff pour son expérience et ses conseils ; Stéphanie Leroy pour les discussions toujours enrichissantes ; Jean-Paul Gallien pour son aide au laboratoire et Florence Mercier pour sa gentillesse et sa disponibilité. Je tiens également à remercier tout particulièrement Jean-Charles Meaudre qui a pris de son temps afin de m'expliquer les secrets de la photographie (entre autres), qui m'ont été très utiles et qui le seront encore. Enrique Vega avec qui j'ai pu partager des problèmes de maintenance d'un MEB capricieux et des échanges toujours étonnants et merci à Eddy Foy pour sa disponibilité et sa patience ainsi que pour la réalisation des analyses en Diffraction des Rayons X sur certains de mes échantillons.

-Un grand merci également à Florian Tereygeol pour les nombreuses discussions que nous avons pu avoir et qui m'ont permis de faire avancer ma réflexion, ainsi que la mise en place des expérimentations à la plateforme de Melle. Celles-ci m'ont été très utiles pour les conclusions de cette thèse. J'en profite pour remercier toutes les équipes qui étaient parallèlement présentes lors de ces expérimentations, avec qui j'ai eu également plaisir d'échanger, en particulier Georges Verly et François Peyrat. Un merci également à Jonas Horny et Vincent Etcheverry qui ont accepté de prendre de leur temps et de leur énergie pour m'aider dans ces travaux.

Florian, ainsi que Bérénice Bellina, chargée de recherches à PreTech, m'ont également permis d'améliorer et d'enrichir mon travail en acceptant de faire partie de mon comité de suivie de thèse durant deux années. Un grand merci à Bérénice Bellina également pour sa contribution aux réflexions de cette thèse et sa disponibilité.

-Je tiens à adresser tous mes remerciements également à Nigel Chang, archéologue de l'Université James Cook en Australie, en charge du Complexe de Vilabouly, qui m'a apporté son savoir et son aide pour la compréhension du contexte archéologie de Vilabouly et sans qui la sélection du corpus n'aurait pas été non plus possible.

-La contribution des équipes de la concession minière MMG-LXML est également importante, car elles m'ont permis de me rendre sur place au Laos, au sein de la concession minière, afin de réaliser l'échantillonnage. Je remercie tout particulièrement l'équipe du bureau d'archéologie de MMG qui nous a accueillis, ainsi que James Cannell et Michaël Stott, géologues du SMD (Sepon Mineral District), qui ont accepté de m'éclairer sur la géologie de la concession de Sepon.

-Je tenais également à adresser tous mes remerciements à Paolo Piccardo et Justine Vernet, professeur et postdoctorante de l'Université de Gênes, qui m'ont accueilli chaleureusement dans leur laboratoire et transmis une partie de leurs savoirs sur l'étude des métaux anciens.

-Ainsi que Laure Dussubieux du *Field Museum of Natural History* à Chicago qui a accepté de partager des données non publiées sur les perles en verre de Vilabouly, analysées également dans le cadre de BROGLASEA. Ces données m'ont également été utiles aux développements des conclusions et je l'en remercie.

Ensuite j'adresse aussi tous mes remerciements aux personnes que j'ai pu croiser en colloque, au cours de missions ou en d'autres circonstances, avec qui ce fut un plaisir d'échanger et de travailler. Je pense particulièrement à Erica Hanning (Archaeological Research Institute, Mainz) et Thomas Rose (Ben-Gurion University), grâce à qui j'ai pu participer à des expérimentations de réduction de cuivre à Mayen en Allemagne ; à Victor Paz de l'Université des Philippines Diliman avec qui j'espère avoir l'occasion de travailler dans le futur ; Pira Venunan de l'Université Silpakorn à Bangkok ; à Fabrice Demeter (UMR 7206), Anne-Marie Bacon (UPR 2147) et Élise Patole Edoumba (Muséum de La Rochelle) grâce à qui j'ai pu réaliser des fouilles au nord du Laos dans la province de Houaphanh qui fut une expérience sur tout point enrichissante, tant sur le plan humain que celui du travail ; à Michel Lorrillard, directeur de l'EFEO de Vientiane, avec qui j'ai pu échanger sur le Complexe de Vilabouly et l'archéologie du Laos. Ce sont aussi toutes ces rencontres qui ont façonné cette thèse et m'ont permis de l'amener à terme.

Un grand merci aux membres du jury, Bérénice Bellina, Aude Mongiatti, à Thilo Rehren et Miriam Stark pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse et d'apporter une contribution à son enrichissement.

Enfin, ces trois années n'auraient pas été les mêmes sans les non-permanents (master, doctorants, postdoctorants) du LAPA et de PreTech pour les discussions scientifiques ou plus libres, l'entraide et le partage. Je peux dire, pour certains, qu'ils sont devenus bien plus que des collègues. Je tiens à citer Emilie, Hélène, Erika, Silvia, Charlotte, Charly, Alexis, Maëva, Sybille, Carine, Baptiste, Blandine, Clémence, Cloé et tout particulièrement Manon, ma coéquipière de bureau avec qui j'ai pris plaisir à partager ces quatre années. Un merci supplémentaire à Emilie, Fabien, Maëva, Nicolas, Hélène, Cloé et Manon qui m'ont très gentiment prêté leur canapé durant mes trois mois de sans domicile fixe.

Et pour finir, merci à mes amis et ma famille, mes parents Dominique et Nathalie, qui m'ont soutenu dans les bons comme les pires moments, dans des périodes souvent lunatiques. Je m'excuse pour mes sautes d'humeur et les tons passionnés qui ont pu ressortir au cours de ces années. Merci à Fabien pour son soutien quotidien, Florence et Guy pour leurs longues relectures qui ont été d'un grand secours dans les derniers mois de rédaction. C'est également grâce à vous que ce travail se termine aujourd'hui et, je l'espère, se poursuivra.

Résumé en français

Les recherches basées sur les origines évoluant, des avancées significatives ont été faites pour notre compréhension de la métallurgie ancienne du cuivre du Sud-est asiatique durant la dernière décennie. Ceci en partie grâce à de nouvelles fouilles de sites de production de métal, mais également par l'application de méthodologies de provenance à des assemblages couvrant au moins deux millénaires.

Sur le terrain, des sites miniers et de productions de cuivre ancien du Complexe de Vilabouly (VC, anciennement connu comme Sepon) dans la province de Savannakhet (Laos central) ont été fouillés par une équipe lao australienne depuis 2008. Vilabouly, avec une séquence radiocarbone des débuts de l'âge du Bronze (env. 1000 av. J.-C) à la fin de l'âge du Fer/début de la période historique (env. 700 ap. J.-C), est un des trois seuls sites de production primaire actuellement connus en Asie du Sud-Est, les deux autres étant en Thaïlande.

Le Complexe de Vilabouly a révélé des sites majeurs d'extraction minière et de production (Puen Baolo et Thong Na Nguak) avec des artéfacts en lien avec la production du cuivre (fragments de minerais, de scories et de creusets) ainsi que des objets à base de cuivre (lingots, tambours, haches, etc.). Les analyses des différents types de matériaux (MO, MEB-EDS, Spectroscopie Raman, pXRF, DRX, isotopes du plomb) ont permis de proposer une reconstitution de la chaine opératoire de production du cuivre à Vilabouly, ses implications plus larges pour la métallurgie du cuivre sud-est asiatique et sa contribution aux études de la préhistoire tardive en général.

Les résultats semblent montrer l'utilisation de creusets pour la réduction au cours d'un procédé en une étape, employant une charge avec un mélange de minerais (principalement malachite et chalcocite) variable et dépendant des minéralisations exploitées, menant à l'obtention de scories homogènes dénotant une maitrise du procédé.

Une production primaire et secondaire de cuivre est donc attestée avec la plupart des signatures isotopiques du plomb des objets concordant avec celle de Vilabouly, avec des objets composés de cuivre, de bronze et de bronze au plomb. La production semble principalement orientée vers celle de lingots. La cohérence de la signature géochimique correspond à l'intensité de l'exploitation du site, mais également à l'approvisionnement de métal à base de cuivre régionale en partie faite par Vilabouly. En effet, la signature isotopique de Vilabouly se retrouve dans les réseaux d'échanges de cuivre d'Asie du Sud-Est avec des consommateurs de métal en Thaïlande, au Myanmar ou au Cambodge actuels. La chaine opératoire de Vilabouly partage également des traits communs avec d'autres sites de métallurgie en Asie du Sud-Est continentale, notamment la vallée de Khao Wong Prachan. Ces traits communs pourraient représenter une évolution commune des traditions métallurgiques à la fin de la préhistoire dans la région. La présence d'objets avec une typologie non régionale (*ge* et tambours), ainsi que certains contextes funéraires, pourrait montrer des liens potentiels avec le Vietnam voisin, en démontrant ainsi d'intéressantes caractéristiques pour de futures recherches sur les transferts techniques et les mouvements de populations en Asie du Sud-Est.

Résumé en anglais

Evolving from purely 'origins'-based research, significant advances have been made in our understanding of early Southeast Asian metallurgy in the last decade, partly through new excavations of metal production sites, and partly through the application of established provenance methodologies to assemblages covering almost two millennia.

On the fieldwork front, ancient copper mining and smelting sites at the Vilabouly Complex (VC, formerly known as Sepon) in Savannakhet Province, Central Laos, have been excavated by a Lao-Australian team since 2008. The VC, with a radiocarbon sequence from the early Bronze Age (c. 1000 BC) to the late Iron Age/beginning of the Historical period (c. 700 AD), is one of only three prehistoric copper production sites physically known in Southeast Asia, the other two being in Thailand.

The Vilabouly Complex has revealed major copper mining and smelting sites (Puen Baolo and Thong Na Nguak) with artefacts linked to the smelting of copper (ores, slags, crucibles and scorched clay) along with copper and copper-alloyed artefacts (ingots, drums, axes etc.). Analyses of the different types of artefacts (OM, SEM-EDS, Raman Spectroscopy, pXRF, lead isotope analyses) permit the reconstitution of the *chaîne opératoire* of copper production involved at the VC and its wider implication for Southeast Asian metallurgy and a contribution to the late prehistoric studies in general.

Results seems to show the use of a crucible smelting technology during a unintentional and variable one-step co-smelting revealing a mastery of the production process leading to homogenized by-products denoting good metal/impurities separation. The main mineral exploited was malachite, but sulfidic minerals (chalcocite) must have been present in the smelting charge as well, depending on the mineralisation exploited. Primary and most probably secondary copper production are attested with most of the metal objects 'lead isotope signature' matching VC one with objects composed of copper, bronze and leaded-bronze. The production seems to de oriented toward the production of ingots. The consistent geochemical signature corroborates the extensive on site production and fits with the regional copper-base metal being sated in part by VC supply as the VC lead isotope signature has been identified in the copper exchange networks across Southeast Asia, involving metal consumers from Myanmar, Thailand and Cambodia. The VC's *chaîne operatoire* also share some common traits with others Southeast Asian metallurgical sites including the use of a crucible technology and co-smelting such as the primary production site of the Khao Wong Prachan Valley and other secondary production sites in Thailand. These common traits could reflect a shared evolution in the metallurgical traditions for Mainland Southeast Asia in late prehistory and one could speculate that more evidence of the wide-spread nature of these practices will be found elsewhere in Southeast Asia as fieldwork proceeds. The presence of objects with an exotic typology (*ge* and drums), along with some funerary context, might show a potential link with adjacent Vietnam and bear some interesting patterns for future research on technological transfers and population movements in Southeast Asia.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures 14

INTRODUCTION GÉNÉRALE 26

Chapitre 1 : Contexte archéologique à la fin de la préhistoire et à la transition avec la période historique (env. 1000 av. J.-C- env. 700 ap. J.-C) en Asie du Sud-Est continentale .31

I.1. Une période de mobilité et de complexification sociale 31

I.1.1 Du Néolithique à l'âge du Bronze : premières interactions et développements 31

1. La période Néolithique 32

2. L'âge du Bronze : transmission des techniques du cuivre/bronze 34

I.1.2 L'âge du Fer 40

1. Intensification des échanges, de l'agriculture et mutation des sites de peuplements 40

A. La culture de Sa Huynh 44

B. La péninsule Thaï-malaise 46

C. Le delta du Mékong 48

2. L'émergence des premières formes d'autorités socio-politiques 49

I.1.3 L'importance des interactions avec la Chine et l'Inde 52

1. Le contexte en Chine durant le premier millénaire av. J.-C et au début du premier millénaire ap. J.-C (500) 52

A. Les plaines centrales : centre de l'Empire chinois 53

B. La périphérie et les « cultures barbares » 54

C. La production de cuivre en Chine : état des connaissances 56

2. Période historique ancienne indienne et la baie du Bengale (500 av. J.-C/200 ap. J.-C) 58

3. Natures des interactions avec l'Asie du Sud-Est 60

I.1.4. Recherches archéologiques au Laos 63

I.2. La métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale : caractéristiques et développements 69

I.2.1. Les sites de production primaire 73

1. Phu Lon 74

2. La Vallée de Khao Wong Prachan 76

I.2.2. Les sites de production secondaires 86

1. Le plateau du Khorat (Thaïlande) 86

A. Les sites de la culture de Ban Chiang 86

B. Non Nong Hor 89

C. La région de Phu Wiang 90

D. Ban Non Wat 92

2. Les sites portuaires de la péninsule Thaï-malaise 94

3. Synthèse ... *95*
4. SEALIP/BROGLASEA et Le Complexe de Vilabouly ... *96*
I.3. Problématiques : de la métallurgie extractive aux réseaux d'échanges ... 97
Chapitre 2 : Contexte archéologique et sélection du corpus ... 101
II.1. Le Complexe de Vilabouly ... 101
II.1.1. Historique des fouilles de sauvetage ... 101
II.1.2. Géographie ... 103
II.1.3. Géologie ... 103
1. Contexte géologique ... *103*
2. Historique des prospections minières ... *109*
II.1.4. Archéologie ... 111
1. Les aires d'exploitation minière ... *111*
A. Khanong A2 ... 111
B. Thengkham South D et Thenkgham East ... 115
C. Tham Hin Kieow ... 117
2. Les aires de productions ... *117*
A. Puen Baolo et Thengkham South C ... 117
B. Thong Na Nguak ... 125
3. Le musée de Viabouly et les chance finds ... *126*
4. Occupation du site durant la période historique ... *130*
II.1.5. Précédentes et études en cours sur le mobilier de Vilabouly ... 130
II.2. Représentativité de la sélection à l'échelle du Complexe de Vilabouly ... 131
II.3. Sélection et présentation du corpus ... 133
II.3.1. Les minerais ... 134
II.3.2. Les céramiques techniques ... 135
II.3.3. Les scories ... 136
II.3.4. Les objets à base de cuivre ... 138
Chapitre 3 : La métallurgie du cuivre ancienne : généralités ... 149
III.1. La métallurgie extractive du cuivre ancienne ... 150
III.1.1. Production de cuivre avec minerais oxydés/carbonatés ... 150
III.1.2 Production de cuivre avec minerais complexes (sulfures) ... 151
III.1.3. Production avec mélanges de minerais ... 152
III.1.4. La métallurgie de transformation ... 153
1. L'affinage du métal ... *154*
2. L'alliage ... *154*

3. Mise en forme du métal : fonderie et post fonderie *156*

III.2. Approches méthodologiques **158**

III.2.1. Approches technologiques en archéologie 158

III.2.2. Caractérisation des témoins d'une production de cuivre ancienne 163

1. Les céramiques techniques *164*

2. Les scories *165*

3. Les objets en métal *167*

III.2.3. Définir l'origine et la circulation d'un objet : analyse isotopique du plomb et éléments traces 167

III.2.4. Archéologie expérimentale 169

Chapitre 4 : Méthodologie analytique d'étude des échantillons **171**

IV.1. Méthodologies d'analyses **171**

IV.1.1. Les minerais 172

IV.1.2. Les céramiques techniques 172

IV.1.3. Les scories 172

IV.1.4. Le métal 173

IV.2. Méthodologie d'analyse **174**

IV.2.1. Méthodes de prélèvement et préparation des échantillons 174

IV.2.2. Microscope Optique (MO) 174

IV.2.3. Composition globale en éléments majeurs, mineurs et traces 175

IV.2.4. Microscope Électronique à Balayage couplé à un Spectromètre à Dispersion d'Energie (MEB-EDS) 175

IV.2.5. Fluorescence X portable (pXRF) 178

IV.2.6. µ-spectroscopie Raman 178

IV.2.7. Diffraction des Rayons X (DRX) 179

IV.2.8. Isotopie du plomb 179

IV.2.9. Traitement statistique 180

Chapitre 5 : Résultats analytiques du corpus **181**

V.1. Les minerais en contexte archéologique **181**

V.1.1. Les carbonates de cuivre 182

V.1.2. Les oxydes de fer 184

V.1.3. Bilan 184

V.2. Les céramiques techniques **185**

V.2.1. Forme 185

V.2.2. Les creusets 190

1. Puen Baolo *190*

Minéralogie et composition de la pâte des creusets 190
Description de la microstructure et de la composition de la couche de scorie adhérente 202
2. Thong Na Nguak *212*
Minéralogie et composition de la pâte des creusets 212
Description de la microstructure et de la composition de la couche de scorie adhérente de TNN 216
V.2.3. Autres : microscopie et composition 223
V.2.4. Bilan 226
V.3. Les scories 231
V.3.1. Morphologie 231
V.3.2. Composition élémentaire 236
1. Puen Baolo *236*
2. Thong Na Nguak *244*
V.3.3. Microstructure 247
1. Puen Baolo *247*
A. Silicates 247
B. Oxydes de fer 250
C. Verre 255
D. Inclusions métalliques 258
E. Autres phases/scories marginales 262
2. Thong Na Nguak *268*
A. Silicates 268
B. Oxydes de fer 271
C. Verre 274
D. Inclusions métalliques 274
E. Autres 276
V.3.4. Comparaison entre les scories macroscopiques et les scories adhérentes aux creusets 276
V.3.5. Bilan 280
V.4. Produits intermédiaires multicouches : matte, scorie et cuivre métallique 283
V.4.1. Composition globale 287
1. La couche de scorie (PBL/49, 50, 51 ; BB14/3/3/7113) *287*
2. La couche de matte (PBL/42, 48, 51, 52) *288*
3. Le bouton de cuivre métallique (PBL/48, 50, 51 et 52) *288*
V.4.2. Microstructure 289
1. La couche de scorie (PBL/49, 50, 51 ; BB14/3/3/7113) *289*
2. La couche de matte (PBL/42, 48, 51, 52) *290*

3. Le bouton de cuivre métallique (PBL/48, 50, 51 et 52) ... *292*
V.4.3. Comparaison avec les scories macroscopiques ... 294
V.4.4. Bilan ... 295
V.5. Objets finis en cuivre et alliages cuivreux ... 297
V.5.1. Typologie ... 297
V.5.2. Microstructure et composition ... 298
1. Les objets en cuivre ... *298*
A. Les lingots contenant du soufre ... 299
B. L'eutectique Cu-Cu_2O ... 300
C. Les lingots contenant du fer ... 301
2. Les objets en bronze ... *302*
A. Les bruts de fonderie ... 303
B. Les échantillons martelés ... 304
C. Les échantillons recuits et martelés ... 304
3. Les bronzes au plomb ... *307*
4. Les inclusions ... *309*
V.5.3. Isotopie du plomb ... 311
V.5.4. Bilan ... 315
Chapitre 6 : Réductions expérimentales ... 317
VI.1. Conditions expérimentales ... 318
VI.1.1 Les minerais ... 319
VI.1.2. Les creusets, la structure de chauffe et l'apport en air ... 321
VI.2. Résultats ... 323
VI.2.1. Le cuivre métallique ... 324
VI.2.2. La matte ... 327
VI.2.3. Les scories ... 328
VI.2.4 Les minerais ayant partiellement réagi ... 329
VI.2.5. Les creusets ... 330
VI.3. Discussion ... 330
VI.3.1 La matte et le cuivre métallique ... 331
VI.3.2. Les scories ... 332
VI.3.3 Les creusets ... 332
VI.3.4. La coulée du mélange ... 333
VI.4. Bilan ... 334
Chapitre 7 : Discussion des résultats - bilan sur la chaine opératoire ... 336

VII.1. Nature de(s) minerai(s) 336
VII.2. Un procédé en une étape réductrice ? 340
VII.3. La formation des scories 342
VII.4. Les creusets comme vaisselle de réaction 351
VII.5. L'atmosphère de réduction et la ventilation 354
VII.6. Une production primaire 355
VII.7. Une production secondaire ? 357
VII.8. La signature isotopique du plomb 358
VII.9. Puen Baolo vs Thong Na Nguak 360
VII.10. Synthèse 364

Chapitre 8 : Le Complexe de Vilabouly dans la macro-région : approche comparative et réseaux d'échanges 367

VIII.1. Comparaison de la reconstitution technologique de Vilabouly avec d'autres sites de productions (primaires et secondaires) 367
VIII.1.1. La Vallée de Khao Wong Prachan : principale zone de comparaison 368
VIII.1.2. Les lingots : objet d'export et reflet d'une production primaire 375
VIII.1.3. Les creusets : vaisselle de réaction privilégiée à la fin de la préhistoire 377
VIII.1.4. Artisans et organisation de la production 382
1. Organisation de la production en Asie du Sud-Est continentale 382
2. Les contextes funéraires : marqueurs de communautés différentes ? 387
3. Lao Lum et Lao Sung : récits ethnographiques du Laos 388

VIII.2. Quelle(s) Implication(s) pour les communautés des montagnes dans les réseaux d'échanges : modes de diffusion des productions de Vilabouly 393
VIII.2.1. Provenance des matières premières 394
1. Ressources minières au Laos 395
2. Ressources minières au Vietnam, au Cambodge et en Thaïlande 398
A. La Thaïlande 398
B. Le Vietnam 400
C. Le Cambodge 401
VIII.2.2. Les sites/ateliers consommateurs du cuivre de Vilabouly 402
VIII.2.3. Comparaison avec d'autres réseaux d'échanges : les perles en verre 412
VIII.2.4. Modes de diffusion : le cuivre comme proxy aux interactions régionales 413
1. Les ge et les tambours de Vilabouly : quelle(s) implication(s) ? 416
2. Le plateau du Khorat et le site de Non Nong Hor 425
3. Le centre du Laos et le Mékong 427

4. Une sphère d'interaction autour du Mékong ? 432

5. Le centre du Vietnam..... 434

6. Une ouverture sur les échanges maritimes 437

VIII.3. Synthèse 440

CONCLUSION GÉNÉRALE 445

Références bibliographiques (p. 453)

<u>Volume 2</u> : Annexes

Annexe 1 : Fiches objets

Annexe 2 : Données élémentaires pour les creusets

Annexes 3 : Données élémentaires pour les scories

Annexes 4 : Données isotopiques du plomb

Annexe 5 : Limites des déterminations pour les mesures au CRPG-SARM

Liste des figures

Figure 1 : Carte de l'Asie du Sud-Est continentale actuelle (crédit carte de base : ESRI). 27
Figure 2 : Localisation des sites du Néolithique (étoile rouge) et de l'âge du Bronze (étoile jaune) mentionnés dans le texte : 1= Ban Non Wat, 2= Ban Lum Khao, 3= Vallée de Khao Wong Prachan, 4= Khok Phanom Di, 5= Ban Chiang, 6= Non Nok Tha, 7= Samrong Sen, 8= Phung Nguyen, 9= Dong Dau, 10= Than Den, 11= Go Mun, 12= An Son, 13= Koh Ta Meas, 14= Nyaung'gan, 15= Phu Lon (crédit carte de base : ESRI). 31
Figure 3 : Frise chronologique reprenant les périodes d'activité des principaux sites archéologiques d'Asie du Sud-Est évoqués durant ce chapitre (sources : Higham et al, 2015 ; Higham et al, 2020 ; Higham et al, 2011; Pedersen, 2016 ; Pryce et al, 2018 ; Pryce et al, 2016 ; O'Reilly et Shewan, 2015 ; Sehwan et al, 2020 ; Reinecke et al, 2009 ; Kim et al, 2010 ; NBJ :Higham et al, 2014 ;Dung, 2001 ;Glover et Bellina, 2018). Voir aussi White et Hamilton, Ban Chiang, volume 2C. 33
Figure 4 : les deux modèles de diffusion de la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale : en noir, celui de Joyce White, en rouge, Higham & consorts (crédit carte de base : ESRI). 36
Figure 5 : Asie du Sud-Est continentale avec la localisation des sites de l'âge du Fer ainsi que des aires des principales cultures mentionnées dans cette partie : 1= Phu Lon, 2= Ban Chiang, 3= Non Nok Tha, 4= Ban Non Wat, 5= Non U-Loke, 6=Ban Lum Khao, 7= Vallée de Khao Wong Prachan, 8= Non Ban Jak, 9=Ban Don Ta Phet, 10= Lovea, 11= Prohear, 12=Angkor Borei, 13= Oc Eo, 14=Khao Sam Kaeo, 15= Oakaie, 16= Giong Ca Vo, 17= Go Ma Voi, 18= Sa Huynh, 19= Co Loa (crédit carte de base= ESRI). 40
Figure 6 : Chronologie des dynasties chinoises, de la première, celle des Xia, jusqu'à celle des Tang au Xème siècle ap. J.-C. 52
Figure 7 : Localisation du territoire de l'actuel PRC avec les différents territoires/cultures, empires mentionnés dans cette partie (crédit carte de base : ESRI). 53
Figure 8 : Réseaux d'échanges entre l'Asie du Sud-Est et le sous-continent indien avec la localisation des principaux sites archéologiques évoqués (crédit carte de base : ESRI). 62
Figure 9 : Localisation des différents sites archéologiques mentionnés dans le texte (crédit carte de base : ESRI). 65
Figure 10 : Carte de l'Asie du Sud-Est continentale localisant les principaux sites avec des signes de métallurgie primaire (étoile jaune) et secondaire (étoile rouge) : 1= Phu Lon, 2= Ban Chiang, 3= Don Klang, 4=. Non Nok Tha, 5=Noen U-Loke, 6= Ban Lum Khao, 7= Vallée de Khao Wong Prachan, 8=Non Ban Jak, 9= Ban Non Wat, Non Nong Hor, 11= Vilabouly, 12= Ban Chiang Hian, 13= Non Chai, 14= Khao Sam Kaeo, 15= Ban I Loet, 16= Non Kaw Wong, 17= Non Pa Kluay, 18 : Ban Puan Phu, 19= Co Loa, 20= Samrong Sen, 21= Than Den, 22= Go O Chua, 23= Oakaie (crédit carte de base= ESRI). 70
Figure 11 : Diagramme KDE pour NPW (violet) et NKH (bleu) montrant la superposition d'une partie des périodes d'activité des deux sites (image : Higham et al, 2020, p. 961). 77
Figure 12 : Différents exemples des moules découverts à Non Pa Wai (image : White et Pigott, 1996, p.163). .. 78
Figure 13 : Exemples de fragments de scories découvertes à Non Pa Wai. 79
Figure 14 : Exemples de creusets découverts à Non Pa Wai. 80
Figure 15 : Exemple des plaques cordiformes en cuivre découvertes à NKH (image : Pigott, 2019, Fig.2.28). 81
Figure 16 : Exemples de scories cakes *de Nil Kham Haeng.* 82
Figure 17 : Exemples des scories dites slag cast *de Nil Kham Haeng.* 82
Figure 18 : Exemples de fragments de parois de four/chemisage (à gauche) et des « slag-skin » qui seraient en fait des fragments de creusets (à droite). 83
Figure 19 : Exemples de potentiels fragments de creusets de Nil Kham Haeng. 84
Figure 20 : Les creusets de Ban Chiang (image : Vernon et al, 2018, p. 106). 88
Figure 21 : Les creusets de Non Nok Tha (Bayard et Solheim, 2009, p. 260). 91
Figure 22 : Fragments de creusets de Ban Non Wat (image : auteure). Les fragments de creusets de BNW étaient disponibles au LAPA dans le cadre de BROGLASEA, courtoisie de C. Higham et A. Kijngam. 93
Figure 23 : En haut, localisation de la concession minière de Sepon (représentée par l'encadré rouge). En bas, la géographie de la province de Savannakhet (crédit carte de base : ESRI). 102

Figure 24 : Contexte géologique de la mine moderne de Sepon où se situent les sites archéologiques du Complexe de Vilabouly. En vert, ressources en cuivre et en rouge, ressources en or (d'après Cannell et al, 2015). 105
Figure 25: Coupe géologique du dépôt de cuivre de Khanong (image : Manini et al, 2001). 107
Figure 26 : Coupe géologique du dépôt de cuivre de Thengkham (d'après Cannell et al, 2015) 108
Figure 27: Schéma montrant les différentes zones archéologiques du Complexe de Vilabouly associées à leur datation et aux types d'éléments découverts. 111
Figure 28 : Déterminations radiocarbones pour les sites du Complexe de Vilabouly. Le nom KA2 correspond aux dates de Khanong A2 ; TE à Thengkham East ; TSD à Tengkham South D ; PBL à Puen Baolo ; TNN à Thong Na Nguak ; TKSC à Thengkham South C. 114
Figure 29 : Plan schématique des structures organiques mises au jour dans les puits de mine de Khanong A2 (à gauche) et de Thangkham South D (à gauche ; image modifiée d'après Tucci et al, 2014). 116
Figure 30: Exemples des structures de puits de mine mises au jour à Thenkgham South D, à gauche, structure avec poutre en diagonale et à droite, un puits de mine de structure carrée (image : Tucci et al, 2014). 117
Figure 31: Plan de fouille du site de Puen Baolo (image modifiée d'après John Edgar). 118
Figure 32 : Exemple d'un contexte de tombe profond potentiellement associé à l'âge du Bronze (image : Nigel Chang). 119
Figure 33 : Concentrations de résidus liés à l'activité métallurgique dans l'unité G15. 120
Figure 34 : Exemple de fosse ronde peu profonde découverte à Puen Baolo, accompagnée de fragments de céramique. C'est associé à cette fosse qu'un des creusets complets (au centre) de Puen Baolo a été découvert (image : Nigel Chang). 121
Figure 35: Exemple de fosse oblongue plus profonde découverte à Puen Baolo (image : Nigel Chang). 121
Figure 36 : Exemple de fosse remplie de graviers et de cendres découvertes à Puen Baolo (image : Nigel Chang). 122
Figure 37 : Fosse découverte dans l'unité B14. 122
Figure 38 : Exemple d'une seconde fosse découverte dans l'unité E13 avec de plus larges dimensions, ici avec plus de 50 cm de profondeur, et un conduit secondaire perpendiculaire à la fosse principale (image : Nigel Chang). 123
Figure 39 : Fosse avec des dimensions plus larges découverte dans l'Unité E13 (image : Nigel Chang). 123
Figure 40 : Exemples de perles en verre découvertes à Thong Na Nguak (image : Nigel Chang). 126
Figure 41 : En haut à gauche, photographie d'un des creusets complets qui a été découvert associé à la fosse présentée en figure 33 et d'un fragment de moule pour lingot plan-convexe découvert à Puen Baolo conservés au Musée de Vilabouly. En haut à droite, lingots plan-convexes exposés au musée de Vilabouly et en bas, exemples de lingots dits nœud papillon. 128
Figure 42 : Lingots plan-convexes découverts lors d'opérations de déminages. 128
Figure 43 : Exemples d'objets de différentes typologies découverts par des villageois ou des opérations de déminages à Vilabouly. 129
Figure 44 : Un des deux tambours à base de cuivre dits de Dong son découverts au Complexe de Vilabouly. 130
Figure 45 : Les minerais carbonatés/oxydés sélectionnés pour étude. 134
Figure 46 : Les minerais d'oxyde de fer sélectionnés pour étude. 135
Figure 47 : Les lingots nœuds papillon échantillonnés pour l'étude. 145
Figure 48 : À gauche, les lingots coniques et bols sélectionnés pour étude. À droite, les haches, le burin, la pointe de lance, l'épingle et les fragments sélectionnés pour étude. 146
Figure 49 : les ge sélectionnés pour étude. 147
Figure 50 : En haut, le tambour VC/12 (image : auteure) et en bas, le tambour VC/13 (image: J. De Guerny, 2017) sélectionnés pour étude. 148
Figure 51 : Schéma des différentes étapes de la production du cuivre (modifié d'après Miller, 2007, p. 146) 149
Figure 52 : Diagramme de phase cuivre-étain (S. Fürtauer et al., 2013). 154
Figure 53 : Exemples de micrographies reprenant les différentes microstructures mentionnées dans le texte. En haut à gauche, bronze recuit et martelé ; en haut à droite, état brut de fonderie ; en bas à gauche, objet martelé ; en bas à droite, structure brut de fonderie avec la présence de la seconde phase riche en étain α+δ (image : auteur). 157

Figure 54 : Schéma reprenant les différentes méthodes appliquées à l'étude des échantillons par type de matériau. 171
Figure 55 : Exemple de scorie (C14_1_4_7205_c) analysé au Microscope Optique et au MEB-EDS. Les encadrés rouges représentent les zones d'analyses globales à grossissement 300 au MEB-EDS et les encadrés bleus correspondent aux zones où des analyses localisées ont été effectuées dans les différentes phases. 178
Figure 56 : Micrographie (en champ noir) de l'échantillon DF/1/A/4/152 composé de malachite et de quartz. 182
Figure 57: Micrographie de l'échantillon PBL/E15/3/1/3278/e composé de delafossite ($CuFeO_2$). 183
Figure 58 : Schéma des différentes mesures effectuées sur les creusets en section. Données reportées dans le tableau 16. 185
Figure 59 : Trois exemples de creusets reconstitués, montrant la variation identifiée dans les dimensions. De gauche à droite, creuset PBL/D13/2/1/3706/a, PBL/C16/3/1/3529 et PBL/C17/1/2/b. 186
Figure 60 : Exemples de sections polies montrant la porosité liée à la présence du dégraissant organique et le gradient thermique. 188
Figure 61 : Les fragments d'argiles/céramique rubéfiées provenant de Puen Baolo identifiés comme potentiels chemisages de fosse. 189
Figure 62 : Potentiel fragment de moule en grès. 190
Figure 63 : Diagramme en boite représentant les compositions des creusets de PBL obtenues par ICP-OES et ICP-MS (n=14). 191
Figure 64 : À gauche, diagramme ternaire de la composition globale de la pâte des creusets (mass%) avec les composés majeurs FeO-SiO_2-Al_2O_3 des scories de PBL (n=14) représentés dans un diagramme de phase d'après (E. Levin, H. F. McMurdie, et F. P. Hall, 1956). *À droite, diagramme ternaire représentant les données globales des composés majeurs et mineurs. Résultats des analyses des éléments majeurs, mineurs et traces par ICP-OES et ICP-MS. L'échantillon plus riche en fer, à gauche, correspond à un creuset où la couche de scorie pénètre dans le fragment.* 192
Figure 65 : Diagramme ternaire avec les principaux éléments traces des creusets de PBL. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 193
Figure 66: Micrographies montrant les différentes zones du creuset (PBL/D13/2/2/3706/a), la scorie, la zone vitrifiée et le bord externe de la pâte céramique. 194
Figure 67 : Micrographies montrant les composants caractéristiques de la pâte des creusets identifiés au MO en coupe transversale. En haut (PBL/A15/4/1/6709/b), présence abondante de pores allongés signe de la présence d'un dégraissant organique ; en bas (PBL/AA15/2/2/6703/b) présence de grains de *quartz macroscopiques.* 196
Figure 68: En haut (PBL/C14/2/3/7217), on identifie la présence d'inclusions (blanches) corresponand à du rutile dans la pâte, ainsi que des grains de quartz de plus petites dimensions avec une interface de dissolution. En bas (PBL/D13/2/1/3706/a), image en champ noir, de l'extérieur d'un creuset ayant conservé ses qualités en microscopie optique à la suite de la chauffe. On identifie également la présence du dégraissant organique. .. 197
Figure 69: Cartographie des rayons X au MEB-EDS de l'échantillon PBL/B17/2/1/3303/f pour lequel on observe la présence des feldspaths potassiques (en vert). 199
Figure 70 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes des différents composés détectés dans la fraction argileuse des creusets de PBL (n=22). Données moyennes obtenues par analyse au MEB-EDS. 200
Figure 71: Images (PBL/AA15/2/2/6803/a) en BSE au MEB-EDS (x300), avec un pore résiduel de la présence de balle de riz, avec des grains de quartz. 201
Figure 72: Image (PBL/B17/2/2/3314/a) en BSE au MEB-EDS (x300) d'une partie du creuset non altéré par la chauffe, où on identifie les grains de quartz (gris foncé) ainsi que les inclusions de rutile (blanc). 201
Figure 73 : Image (C14/2/3/7217) en BSE au MEB-EDS (x300), d'une partie vitrifiée du creuset avec l'interface des grains de quartz dissous ainsi que des inclusions de zircon (blanc brillant). 202
Figure 74 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) obtenues au MEB-EDS pour les scories adhérentes au creuset de PBL (n=20). En haut, les scories de type fayalite et en bas, les scories vitreuses riche en cuivre. Données obtenues pour chaque échantillon après moyenne sur différentes zones d'analyses. 203
Figure 75 : Diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 (%mass.) des couches de scories adhérentes avec les deux types définis, fayalite et vitreuse ainsi que la composition globale de la pâte des creusets. Données obtenues au MEB-EDS. 205

Figure 76: Micrographie d'une scorie de type fayalitique adhérente à un creuset (PBL/B17/2/1/3303/h) avec la présence majoritaire d'olivines ferreuses en squelette, de magnétite en polyèdre ainsi que d'inclusions de cuivre métalliques et de sulfures de cuivre (chalcocite). 206
Figure 77: Micrographie d'une scorie de type vitreuse adhérente à un creuset (PBL/A15/3/1/6703), avec des inclusions de cuivre métallique, ainsi que du quartz résiduel provenant du creuset. 206
Figure 78 : Images en BSE au MEB-EDS (x300) de la couche de scorie adhérente aux creusets de PBL. En haut (PBL/B14/1/1/7001/a), scorie de type fayalite avec des olivines ferreuses (gris foncé) cristallisées en squelette, de la magnétite en polyèdre (gris clair), dans une phase vitreuse (noir) ainsi que des inclusions métalliques (blanc) ; en bas PBL/(C14/2/3/7217), mêmes caractéristiques que pour l'image précédente. 208
Figure 79 : Images en BSE au MEB-EDS (x300) de la couche de scorie adhérente aux creusets de PBL. En haut (PBL/C17/1/2/b), une scorie vitreuse riche en cuivre avec de nombreuses inclusions de cuivre métallique (blanc) ; en bas (PBL/S9/1/1/5503), une scorie vitreuse avec la cristallisation d'oxydes de fer (gris clair) de forme arrondie. 209
Figure 80 : Comparaison des taux (%mass.) en oxyde de fer et en silice dans les scories et dans la pâte des creusets de PBL. Données obtenues au MEB-EDS. 210
Figure 81 : Histogramme représentant la distribution des rapports Al_2O_3/SiO_2 entre la pâte des creusets et les scories adhérentes aux creusets (vitreuses et fayalites). Données obtenues au MEB-EDS. 211
Figure 82 : Comparaison des rapports Al_2O_3/SiO_2 et des taux en FeO de la pâte des creusets et des scories adhérentes (vitreuses et fayalites). Données obtenues au MEB-EDS. 211
Figure 83 : Diagramme en boite représentant les compositions (%mass.) des creusets de TNN (n=4). Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 212
Figure 84 : À gauche, composition globale de la pâte des creusets (%mass.) avec les composés majeurs FeO-SiO_2-Al_2O_3 de la pâte des creusets de TNN représentés dans un diagramme de phase d'après Levin et al, 1956. À droite, diagramme ternaire représentant les données globales en éléments majeurs et mineurs des creusets. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 213
Figure 85 : Diagramme ternaire avec les principaux éléments traces de la pâte des creusets de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 214
Figure 86 : Diagramme en boite avec les teneurs moyennes des composés identifiés dans la part argileuse des creusets de TNN (n=6). Données obtenues après moyenne sur des analyses au MEB-EDS. Les triangles noirs représentent la moyenne globale pour chaque composé. 215
Figure 87 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) pour les scories adhérentes au creuset de TNN (n=6). Données obtenues pour chaque échantillon après moyenne sur différentes zones d'analyses au MEB-EDS. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé. 217
Figure 88 : Micrographie d'une scorie adhérente aux creusets de TNN (DF/1-A/4/131/b). Il s'agit d'une scorie vitreuse avec des oxydes de fer cristallisés en polyèdre (gris clair) ainsi que des inclusions de cuivre métallique. 218
Figure 89 : Micrographie d'une scorie adhérente au creuset de TNN (DF/1/C/2). Il s'agit d'une scorie vitreuse avec des oxydes de fer riche en cuivre. 219
Figure 90 : Micrographie d'une scorie adhérente au creuset de TNN (DF/1-B/3/113). Il s'agit du seul exemple de scorie de type fayalitique pour TNN. 219
Figure 91 : Images en BSE au MEB-EDS identifiant la présence de delafossite et d'oxydes de fer riche en cuivre. En haut (DF/1-A/3/131/a), présence de delafossite cristallisée en aiguilles (blanc brillant) ; en bas (DF/1-A/B/3/90), oxydes de fer cristallisés en dendrites contenant une proportion importante cuivre. 221
Figure 92 : Comparaison des taux (%mass.) en composés majeurs FeO-SiO_2-Al_2O_3 dans les scories et dans la pâte des creusets de TNN. Données obtenues au MEB-EDS. 222
Figure 93 : Comparaison des taux (%mass.) en oxyde de fer et en silice des scories et de la pâte des creusets de TNN. Données obtenues au MEB-EDS. 222
Figure 94 : Cartographie des rayons X au MEB-EDS de l'échantillon PBL/A5/367/159 (à gauche) avec une microstructure similaire aux fragments de creusets et de l'échantillon PBL/B17/3303/g (à droite). 224
Figure 95 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) pour les autres types de céramiques techniques du corpus (n=4). Données obtenues pour chaque échantillon après moyenne sur différentes zones d'analyses au MEB-EDS. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé. 225

Figure 96 : Image au MEB en BSE montrant la zone vitreuse où des oxydes de fer ont été identifiés pour l'échantillon PBL/A5/367/159. 225
Figure 97 : Les quatre exemples de creusets entiers découverts hors contexte à Puen Baolo. 230
Figure 98 : Diagramme ternaire comparant les teneurs des éléments traces principaux de la pâte des creusets de PBL et TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 231
Figure 99 : Scorie PBL/G15/3/4/7316/7309. 232
Figure 100 : Les différents types de scories identifiés dans le corpus de Vilabouly, de gauche à droite : scorie massive, scorie plate et scorie grossière. 233
Figure 101 : Exemples de scories associées à une couche résiduelle de céramique ou de sol dans leur partie inférieure. 234
Figure 102 : Echantillon PBL/C17/1/1/3117/a comportant la potentielle empreinte d'outil 234
Figure 103 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) globales des scories de PBL (n=117) obtenues par ICP-OES et ICP-MS. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé. 237
Figure 104 : Diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 des composés majeurs des scories de PBL avec le domaine de la fayalite (modifié d'après Rehren et al, 2007). Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 238
Figure 105 : Diagramme binaire représentant les teneurs (%mass.) en FeO et SiO_2 des scories de Puen Baolo. Données obtenues par ICP-MS et ICP-OES. 239
Figure 106 : Matrice de corrélation entre les composés majeurs et mineurs des scories macroscopiques de PBL. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 240
Figure 107 : Histogramme représentant la distribution des rapports Al_2O_3/SiO_2 par rapport aux scories macroscopiques, aux scories adhérentes aux creusets et la pâte céramique. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.). 240
Figure 108 : Diagramme binaire représentant les teneurs(%mass.) en oxyde de cuivre en fonction des teneurs oxyde de soufre dans les scories de PBL (données obtenues par ICP-OES et ICP-MS). 241
Figure 109 : Représentation des taux de cuivre et de soufre(%mass.) en fonction de l'épaisseur en cm des scories en section avec leur type associé et colorés par rapport aux niveaux archéologiques. Le niveau 1 correspond au niveau le plus proche de la surface, le 4, le plus profond. Données obtenues par ICP-MS et ICP-OES. 243
Figure 110 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) globales des scories de TNN (n=15) obtenues par ICP-MS et ICP-OES. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé. 244
Figure 111 : À gauche, diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 avec les composés majeurs des scories de TNN, et le domaine de la fayalite (modifié d'après Rehren et al, 2007). À droite, diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 auquel les taux en MnO ont été ajoutés, car il est parfois le troisième composé majeur des scories de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 245
Figure 112 : Matrice de corrélation avec les composés majeurs et mineurs des scories de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 246
Figure 113 : Comparaison des taux (%mass.) de MnO et ZnO en fonction des sites Puen Baolo, Puen Baolo West et Thong Na Nguak. Données obtenues par ICP-MS et ICP-OES. 246
Figure 114 : Micrographie obtenue à grossissement 10 montrant deux types de cristallisation d'olivine, en polyèdre et en plume pour l'échantillon PBL/C16/3503/a. 248
Figure 115 : Micrographie grossissement 10 montrant la cristallisation des olivines en squelette pour l'échantillon PBL/CC14/3/7116/g. 249
Figure 116 : Micrographie grossissement 10 montrant la cristallisation des olivines en plume pour l'échantillon PBL/AA15/2/2/6803/b. 249
Figure 117 : Image BSE (x300) montrant la présence de magnétite cristallisée en polyèdres dans l'échantillon PBL/C16/3503/a. 251
Figure 118 : Images en BSE au MEB-EDS (x300) montrant la présence de wüstite globulaire en dendrites (FeO) pour l'échantillon PBL/B17/2/1/3303/b. 251
Figure 119 : Image BSE (x300) montrant la présence de magnétite en bandes dans l'échantillon PBL/B14/1/2/7002/b. 252
Figure 120 : Image BSE (x300) montrant la présence de magnétite aciculaire dans l'échantillon PBL/E15/2/2/3218/e. 252

Figure 121 : Image en BSE au MEB-EDS de l'échantillon PBL/C14/2/3/7219/c (x300) montrant la présence d'une bande de magnétite et de magnétite aciculaire en bordure extérieure, signe d'un refroidissement rapide au contact d'une surface froide/et ou de l'air. 253
Figure 122 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennées sur plusieurs zones d'analyses de la phase vitreuse pour l'ensemble des scories de PBL (%mass.) au MEB-EDS (n=31). Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé. 255
Figure 123 : Micrographie grossissement 10 montrant des inclusions de sulfures de cuivre (Chalc) enveloppant du cuivre métallique (Cu) dans l'échantillon PBL/C17/1/1/3117/b. 259
Figure 124 : Micrographie grossissement 20 montrant des inclusions de cuivre métallique (Cu) et de chalcocite (chalc) arrondies dans l'échantillon PBL/C14/1/4/7205/c. 259
Figure 125 : Micrographie grossissement 20 montrant la présence d'inclusions de sulfures complexes de chalcopyrite (chalp) dans l'échantillon PBL/CC14/3/7116/a. 260
Figure 126 : Micrographie grossissement 20 montrant la présence d'une inclusion sphérique contenant de la covellite (Co), avec à cœur de la bornite (Bo) dans l'échantillon PBL/B14/1/2/7002/b. 260
Figure 127 : Compositions obtenues par analyses au MEB-EDS dans les différentes inclusions métalliques des scories de PBL (n=290). Colorées ici en fonction des niveaux archéologiques. 261
Figure 128 : Diagramme d'équilibre Cu-Fe-S à 1250°C (W. A. Krivsky et R. Schuhmann, 1957, p.982). 262
Figure 129 : Micrographies (grossissement 5) illustrant les inclusions résiduelles de quartz non réagis et partiellement réagis dans les scories. 262
Figure 130 : Image en BSE au MEB-EDS (x250) d'un résidu de sol/céramique à la base de l'échantillon PBL/C16/3503/a. 263
Figure 131 : Oxyde de fer résiduel dans l'échantillon PBL/B17/1/1/3301/b. Image MO (grossissement 5). 264
Figure 132 : Micrographie grossissement 20 montrant une inclusion partiellement réagie de chalcopyrite (Chalp), entourée par de la covellite (Cov) pour l'échantillon PBL/B17/1/1/3303/b. 265
Figure 133 : Micographie grossissement 10 montrant une inclusion partiellement réagie de chalcopyrite (Chalp), entourée par de la covellite (Cov) pour l'échantillon PBL/E12/2/2/3218/b. 265
Figure 134 : Micrographie grossissement 20 montrant une inclusion de minerai partiellement réduit composée de chalcopyrite (Chalp), de chalcocite (Chalc) et de bornite (Bo) pour l'échantillon PBL/C17/1/1/3117/a. 266
Figure 135 : Micrographie grossissement 10 montrant une inclusion de minerai partiellement réduite de bornite (Bo), chalcopyrite (Chalp) et chalcocite (Chalc) pour l'échantillon PBL/C17/1/1/3117/b. 266
Figure 136 : Image en BSE au MEB-EDS (x300) de l'échantillon PBL/C14/1/4/7205/a qui est riche en oxyde de baryum. 267
Figure 137: Image en BSE au MEB-EDS (x300) et micrographie (grossissement 20) d'un échantillon (PBL/CC14/3/7116/c) où la leucite ($KAlSi_2O_6$) a été identifiée (phase noire). 268
Figure 138 : En haut, à gauche micrographie (grossissement 10) d'une scorie avec des olivines en squelette pour l'échantillon DF/1-A/4/165/b. 269
Figure 139 : Image BSE au MEB-EDS montrant la cristallisation des olivines ferreuses en squelette pour l'échantillon DF/A/133. 269
Figure 140 : En haut, micrographie grossissement 20 et en bas image en BSE au MEB-EDS montrant la cristallisation des olivines ferreuses en polyèdre pour l'échantillon DF/1-A/4/165/a. 270
Figure 141 : Micrographie (grossissement 10) avec de la magnétite en polyèdre pour l'échantillon DF/1/2/2/43. 271
Figure 142 : Micrographie grossissement 10 montrant la présence de magnétite en bande pour l'échantillon DF/1/B/2/42. 272
Figure 143 : Image en BSE au MEB-EDS (x300) montrant la présence de magnétite aciculaire sur un bord de la scorie DF/1/A/2/40. 272
Figure 144 : Micrographie (grossissement 20) illustrant la présence d'oxydes de fer ayant conservés la structure de leur grain d'origine pour l'échantillon DF/1/A/4/133. 273
Figure 145 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennées sur plusieurs zones d'analyses de la phase vitreuse pour l'ensemble des scories de TNN (%mass.) au MEB-EDS (n=11). Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé. 274

Figure 146 : Micrographies (grossissement 10) illustrant les différents types d'inclusions métalliques rencontrés dans les scories de TNN, en haut, cuivre métallique (Cu) et en bas, la chalcocite (Chalc) et le cuivre métallique (Cu) pour les échantillons DF/1/B/2/42 et DF/1/C/3/8/C respectivement. 275
Figure 147 : Compositions (%mass.) obtenues au MEB-EDS des différentes inclusions des scories de Thong Na Nguak (n=73)..... 276
Figure 148 : Comparaison des compositions moyennes en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 des scories macroscopiques (bleu) et des scories adhérentes aux creusets (noir) pour PBL, ainsi que la composition moyenne en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 de la pâte céramique des creusets. Données obtenues par aire d'analyse (x300) au MEB-EDS. 277
Figure 149 : Diagramme ternaire reprenant les données des scories macroscopiques, de la pâte des creusets et des scories adhérentes aux creusets de PBL afin d'évaluer la potentielle contribution des composés issus des minerais, du combustible ou de l'argile/fondant (données au MEB-EDS, %mass.). 277
Figure 150 : Comparaison des compositions moyennes en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 des scories macroscopiques (bleu) et des scories adhérentes aux creusets (noir) pour TNN, ainsi que la composition moyenne en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 de la pâte céramique des creusets. Données obtenues par aire d'analyse (x300) au MEB-EDS. 278
Figure 151 : Diagramme ternaire reprenant les données des scories macroscopiques, de la pâte des creusets et des scories adhérentes aux creusets de TNN afin d'évaluer la potentielle contribution des composés issus des minerais, du combustible ou de l'argile/fondant (données au MEB-EDS, %mass.). 279
Figure 152 : Analyse par composante principale présentant les résultats des données des scories de Puen Baolo, Puen Baolo West et Thong Na Nguak pour les composantes 1 à 3 (n=132). 282
Figure 153 : À gauche, cercle de corrélation entre variables colorées par rapport au cos2 correspondant aux composantes principales 1 et 2. À droite, cercle de corrélation entre variables colorées par rapport au cos2 correspondant aux composantes principales 1 et 3. 283
Figure 154 : Les lingots avec couches multiples de cuivre métallique, matte et/ou scorie. Échelle = 5 cm. 286
Figure 155 : Sections polies des lingots multicouches SEALIP/LA/PBL/48 et 52 composés d'une couche de matte et de cuivre métallique, des lingots SEALIP/LA/PBL/50 et 51 composés d'une couche de scorie et de cuivre métallique. 286
Figure 156: Les deux fragments de scories PBL/B17/1/1/3301/b (gauche) et PBL/C17/1/1/3317/b (droite). Échelle = 5 cm. 287
Figure 157 : Micrographie (grossissement 10) de la couche de scorie de l'échantillon SEALIP/LA/PBL/51. 290
Figure 158 : En haut, image MO de la couche de matte pour l'échantillon SEALIP/LA/PBL/51 et en bas, image en BSE au MEB-EDS de la couche de matte de l'échantillon SEALIP/LA/PBL/48. 291
Figure 159 : En haut, image MO (grossissement 10) et en bas en BSE au MEB du cuivre métallique de l'échantillon SEALIP/LA/PBL/52..... 293
Figure 160 : Comparaison des compositions moyennes en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 des scories indépendantes et des scories « lingot ». Données obtenues par aire d'analyse (x300) au MEB-EDS. 294
Figure 161 : Figure illustrant la potentielle association des scories plates et des lingots. 296
Figure 162 : Distribution des échantillons prélevés en fonction des types d'objets. 297
Figure 163 : En haut, image MO (grossissement 10) du lingot nœud papillon PBL/20 avec une structure de brut de fonderie en grains équiaxes. En bas, image MO (grossissement 20) du lingot nœud papillon PBL/16 pour lequel on discerne des dendrites. 299
Figure 164 : Image MO (grossissement 10) de l'échantillon VC/8, un lingot bol avec une structure de brut de fonderie et d'abondantes inclusions de sulfures de cuivre. 299
Figure 165 : Image MO (grossissement 20) après attaque du lingot conique TNN/4 avec une structure de brut de fonderie et l'eutectique Cu-Cu_2S...... 300
Figure 166 : Image MO (grossissement 20) de l'échantillon PBL/10 brut de fonderie pour lequel on identifie l'eutectique Cu-Cu_2O. 300
Figure 167 : En haut, image BSE au MEB EDS (grossissement 350) montrant la présence de goethite (phase gris foncé) dans l'échantillon PBL/11. En bas, spectre Raman associé confirmant la présence de goethite. 301
Figure 168 : Distribution des teneurs en étain (%mass.) en fonction des échantillons. 302
Figure 169 : Diagramme montrant la distribution des objets en bronze par rapport à la typologie. 303
Figure 170 : Image MO de l'échantillon VC/1 qui est un brut de fonderie. 303
*Figure 171 : Image MO (grossissement 20) après attaque de l'échantillon de hache PBL/22 qui a été martelé.*304

Figure 172 : Deux exemples d'objets martelés et recuits : en haut, image MO (grossissement 10) après attaque de l'échantillon de hache PBL/38 et en bas image MO (grossissement 20) après attaque de l'échantillon de ge *PBL/8.* 305
Figure 173 : Diagramme binaire avec les teneurs en plomb et en étain en fonction de la typologie des objets. Données en %mass. au MEB-EDS. 308
Figure 174 : Image BSE au MEB (grossissement 300) de l'échantillon VC/10 montrant la présence des nodules de plomb (phase blanche). 308
Figure 175 : En haut, image MO (grossissement 10) de l'échantillon de tambour VC/12 avec une structure de brut de fonderie et les inclusions de plomb (gris foncé). En bas, image MO (grossissement 10) de l'échantillon de cloche VC/9 avec une structure de brut de fonderie. 309
Figure 176 : Images en BSE au MEB-EDS (grossissement 300 et 600) de l'échantillon PBL/40 (en haut) et de l'échantillon VC/7 (en bas) montrant la présence des deux types d'inclusions. 311
Figure 177 : Diagramme binaire montrant la distribution des échantillons de Vilabouly par sites en fonction de la densité des données (obtenus sur ©Rstudio par l'application du package ggplot *et de la fonction* KDE*).* 312
Figure 178 : Données isotopiques du plomb pour le Complexe de Vilabouly, $^{206}Pb/^{204}Pb$ and $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $2^{08}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$. Les données de la vallée de Khao Wong Prachan (Nil Kham et Non Pa Wai), ainsi que Phu Lon ont également été *ajoutées. Les bars d'erreurs sont plus petites que les points.* 313
Figure 179 : Diagramme binaire reprenant les données isotopiques par type de lingot (bol, nœud papillon et conique) selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$-$^{207}Pb/^{204}Pb$ (haut) et $^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{207}Pb/^{204}Pb$ (bas). 314
Figure 180 : Les deux types de creusets utilisés. 321
Figure 181 : Le dispositif expérimental utilisé. 323
Figure 182 : Les différents contenants utilisés pour la coulée du mélange. En haut à gauche, le sable de fonderie et en haut à droite, les cendres. En bas : exemple de coulée après une réduction. 323
Figure 183 : De haut en bas produit de la réduction 10 avec les images MO associées des couches de matte et de cuivre métallique (grossissement 10). 325
Figure 184 : De haut en bas produit de la réduction 11 avec les images MO associées à la couche de matte et à la couche de cuivre métallique (grossissement 10). 326
Figure 185 : De haut en bas, produit de la réduction 14 avec ses images MO associées des couches de matte et de cuivre métallique (grossissement 10). 327
Figure 186 : Comparaison des différents produits issus du mélange malachite/chalcocite montrant la diminution de la matte en fonction de la quantité de chalcocite ajoutée. 328
Figure 187 : Deux sections polies de scories expérimentales des réductions 4 (en bas à gauche) et 11 (en bas à droite) ainsi qu'une image MO (haut gauche) montrant les larges inclusions de quartz et de cuivre/matte. En haut, à droite, une image en BSE au MEB-EDS montrant la présence de phases cristallines : fayalite, magnétite dans une phase vitreuse. 329
Figure 188 : Minéraux partiellement réagis issus la réduction 3 avec une granulométrie entre 3,5 et 2,5 mm. 330
Figure 189 : Diagramme ternaire Fe-Cu-S avec les données compositionnelles des mattes expérimentales provenant des différents mélanges, ainsi que la composition standard des principaux minerais sulfurés, la chalcocite, la chalcopyrite et la bornite. La composition des mattes archéologiques a également été ajoutée (ellipse rouge). 331
Figure 190 : Comparaison de la micrographie obtenue pour le bouton de cuivre de la réduction 14, à droite et pour le lingot multicouche archéologique SEALIP/LA/PBL/52, à gauche, montrant des inclusions de sulfures de cuivre similaires. 332
Figure 191 : En partant du haut, deux sections de creusets expérimentaux, cuit (réduction 2) et cru (réduction 7) comparés à deux sections de creusets archéologiques (D13/2/1/3706/a et b). 333
Figure 192 : Diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 avec les données ICP-OES et ICP-MS des scories de Puen Baolo et Thong Na Nguak (%mass.) avec le diagramme de phase, d'après Rehren et al, 2007. 342
Figure 193 : Diagramme binaire montrant la variation du liquidus en fonction de CaO et du ratio Fe/SiO_2 avec une pO_2 à 10^{-8} atm et Al_2O_3= 7 %mass. (image modifiée d'après Kongoli et Yazawa, 2001). 344
Figure 194 : Isomorphisme Fe-Mg (modifiée d'après Klimm et Ganschow, 2007). 345

Figure 195 : Classification des produits obtenus durant les expérimentations en fonction des rapports O/S. Les scories sont réparties en trois groupes (S, I et O) en fonction des éléments piégés dans la scorie. L'encadré noir gras indique où se situe les scories de Vilabouly (image modifiée d'après Burger, 2008, p. 193). 349
Figure 196 : Référentiel proposé par Emilien Burger basé sur les expérimentations en laboratoire en atmosphère contrôlée. Ici représentant les différentes phases obtenues dans les scories expérimentales par rapport au ratio O/S employé et à la pO_2. Les différents groupes de scories S, I', I'', O, O' et O'' sont définis par rapport aux phases présentes. L'encadré noir gras indique où se situent les scories de Vilabouly (image modifiée d'après Burger, 2008, p. 198)...... 349
Figure 197 : Lingot conique TNN/3 avec le fragment de céramique à cœur. 357
Figure 198 : Diagramme binaire reprenant les données isotopiques par type de lingot (bol, nœud papillon et conique) selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$-$^{207}Pb/^{204}Pb$. 359
Figure 199 : Diagramme binaire représentant les teneurs en FeO et SiO_2 (en haut) et en MnO et ZnO (en bas) des scories de Thong Na Nguak comparées à celles de Puen Baolo. 362
Figure 200 : Figure bilan reprenant les différents éléments de la chaine opératoire proposée. 366
Figure 201 : Localisation des sites avec des signes de métallurgie primaire (étoiles jaunes) et secondaire (étoile rouge) : 1= Phu Lon, 2= Ban Chiang, 3= Don Klang, 4=. Non Nok Tha, 5=Noen U-Loke, 6= Ban Lum Khao, 7= Vallée de Khao Wong Prachan, 8= Non Ban Jak, 9= Ban Non Wat, Non Nong Hor, 11= Vilabouly, 12= Ban Chiang Hian, 13= Non Chai, 14= Khao Sam Kaeo, 15= Ban I Loet, 16= Non Kaw Wong, 17= Non Pa Kluay, 18 : Ban Puan Phu, 19= Co Loa, 20= Samrong Sen, 21= Than Den, 22= Go O Chua, 23= Oakaie (crédit carte de base= ESRI). . 367
Figure 202 : À gauche, les slag casts de NKH (courtoisie d'Oliver Pryce). À droite, les lingots multicouches de Vilabouly. 372
Figure 203 : différents exemples de creusets découverts en Asie du Sud-Est, en haut, de gauche à droite : creuset entier de Non Pa Waï (image Vincent Pigott, Pryce, 2008, p.121) et fragment de paroi de creuset de Non Pa Wai ; creuset entier de Ban Chiang (image Pigott et White, 1996, p.156) et dessin d'un creuset entier de Ban Na Di (Higham,1988). En bas, de gauche à droite : deux creusets entiers et un fragment de creuset D13/2/1/3706/b du Complexe de Vilabouly, un fragment de paroi de creuset de Ban Non Wat (image : auteur) et dessin d'un creuset de Non Nok Tha (image : Bayard et Solheim, 2009, p. 260). Pour précision, les creusets de Non Pa Wai ne sont pas représentés à l'échelle par rapport aux creusets des autres sites...... 379
Figure 204 : Exemples de micrographie pour les poteries domestiques de Puen Baolo. À gauche, une céramique contenant de la balle de riz et à droite une céramique avec de la chamotte. 381
Figure 205 : Localisation des différentes mines et ressources en cuivre, étain et plomb identifiées au Laos (source : Lao PDR geological and mineral occurrences map, Mineral exploration and development plan, 1990-91; British Geological Survey et Department of Mines, Ministry of Energy and Mines, Lao PDR et Atlas of Mineral resources of the ESCAP region, volume 7,Lao PDR, United Nations, 1990; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations; 1979; carte de fond : ESRI)...... 397
Figure 206 : Carte de la répartition des ressources en cuivre, plomb, étain et sel en Thaïlande (Source : Atlas of Mineral Resources of the ESCAP region, volume 16, Thailane, United Nations, 2001 ; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations ; 1979 ; crédit carte de base : ESRI). 399
Figure 207 : Carte de la répartition des ressources en cuivre, étain et plomb au Vietnam (source : Atlas of mineral ressources of the ESCAP region, Volume 6, Vietnam, United Nations, 1990 ; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations, 1979 ; crédit carte de base : ESRI). 400
Figure 208 : Carte de la répartition des ressources en cuivre, plomb et étain au Cambodge (source : Atlas of mineral resources of the ESCAP region, Volume 10, Cambodia, United Nations, 1993 ; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations; 1979 ; crédit carte de base ESRI). 402
Figure 209 : Diagrammes bivariés montrant la distribution des échantillons de Vilabouly, Phu Lon et la vallée de Khao Wong Prachan en fonction de leur densité (les données ont été représentées à l'aide du logiciel Rstudio *et du package* ggplot *par l'application de la fonction* KDE *qui permet une représentation des données par densité).*
..... 404
Figure 210 : Données isotopiques du plomb des objets de sites thaïs avec une signature concordante au Complexe de Vilabouly représentés selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$. 406

Figure 211 : Données isotopiques du plomb des objets de sites du Myanmar avec une signature concordante au Complexe de Vilabouly représentés selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$. 407
Figure 212 : Données isotopiques du plomb des objets d'autres sites avec une signature concordante au Complexe de Vilabouly représentés selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$. 408
Figure 213 : Représentation des périodes chronologiques de sites pour lesquels des échantillons concordants à la signature de Vilabouly ont été identifiés. La zone en pointillé marque la période d'activité potentielle de l'âge du Bronze de Vilabouly. 409
Figure 214 : Carte avec la localisation des sites pour lesquels la signature isotopique du plomb de Vilabouly a été identifiée : 1= Vilabouly, 2=Ban Chiang, 3=Don Klang, 4= Khao Sek, 5=Lovea, 6= Oakaie 3, 7= Mon Htoo, 8= Ban Non Wat, 9= Tha Kae, 10= Non Ban Jak, 11= Tam Pà Ping, 12= Prohear, 13= Prei Khmeng, 14= Phu Lon (crédit carte de base : ESRI). 410
Figure 215 : Cartes localisant les sites archéologiques et lieux évoqués durant cette partie (crédit carte de base : ESRI). 415
Figure 216 : En haut, les différents types de ge répertoriés par (P. Chiang, 2010)*. En bas, représentation iconographique de dagues ge dans le décor d'un tambour en bronze type Heger I découvert à Shizhaishan, Yunnan (d'après Yi Xuezhong, 1993).* 418
Figure 217 : Haut, les lingots coniques découverts à Non Nong Hor (11ème FAD regional office, 2010, p. 94 ; Lertlum et al, 2010, p. 211). Bas, exemples de lingots coniques de Vilabouly. 427
Figure 218 : Le réseau de rivières de la province de Savannakhet avec la localisation des rivières mentionnées dans le texte. En rouge, la zone du Complexe de Vilabouly et en orange les sites préangkoriens et angkoriens répertoriés dans la région par l'EFEO de Vientiane (données d'après Lorrillard, 2010 ; crédit pour la carte de base : ESRI). 428
Figure 219 : Profil d'une des voies les plus courtes empruntées par De Malgaive pour relier la mer d'Annam au Laos central en passant par Aï-Lao (A. Pavie, 1902). 430
Figure 220 : Localisation des sites pour lesquels le partage de réseaux d'échanges a pu être identifié entre le delta du Mékong, le nord du Cambodge et la Thaïlande (d'après Carter et al, 2020 ; Carter, 2015 ; Stark et Fehrenbach, 2019). 432
Figure 221 : Réseaux de rivières entre le centre du Laos et du Vietnam ainsi que la localisation des sites de la culture Sa Huynh dans la vallée du Thu Bon au Vietnam (point orange), d'après Dzung 2009 et Reinecke, 2018 ; crédit carte de base : ESRI). 434
Figure 222 : Localisation des principaux sites inclus dans les échanges maritimes de la mer de Chine méridionale, notamment par la présence d'objets attestant du partage de sphères culturelles et matérielles proches (crédit carte de base : ESRI). 438

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des principaux sites de production primaire et secondaire connus en Asie du Sud-Est. Les chronologies utilisées se veulent volontairement imprécises, car certains sites ne possèdent pas de datations absolues afin de placer leur période d'activité. Abréviations : Pot. = poterie, Prod. = production. Références : White et Hamilton, 2019 ;Higham et al, 2020 ; Bayard et Solheim, 2009 ; Higham, 2012 ; Higham et al, 2009 ;Källen et Karlström, 1999 ;Higham et al, 2015 ;Higham et al, 2020 ;Pigott et al, 1997 ;Pigott, 2019 ; Cadet et al, 2019 ; Rispoli et al, 2013. 73
Tableau 2 : Datations radiocarbones obtenus pour les différents sites du Complexe de Vilabouly. 114
Tableau 3 : Tableau reprenant les minerais sélectionnés pour étude avec leurs références de fouille. 134
Tableau 4: Tableau reprenant les céramiques techniques sélectionnées pour étude avec leurs références de fouille. 136
Tableau 5: Tableau reprenant les fragments de scories sélectionnés pour étude avec leurs références de fouille. 138
Tableau 6 : Tableau comparant les masses et la longueur des lingots nœud papillon. 139

Tableau 7 : Tableau reprenant les objets à base de cuivre échantillonnés pour étude avec leurs références de fouille. 143
Tableau 8 : Éléments à prendre en compte pour la caractérisation des céramiques techniques. 165
Tableau 9 : Éléments à prendre en compte pour la caractérisation des scories. 166
Tableau 10 : Les principaux composés identifiés dans les scories archéologiques avec leurs potentielles origines (minerai, cendres du combustible ou argile). 166
Tableau 11 : Éléments à prendre en compte pour la caractérisation des artéfacts métalliques. 167
Tableau 12 : Répartition des éléments traces en fonction du type d'étude réalisée (données d'après Hauptmann, 2007, p.31 ; Pernicka, 2014, p. 16). 169
Tableau 13 : Mesure de la précision et de la justesse des analyses au MEB-EDS et en pXRF par rapport aux valeurs des standards de références. 177
Tableau 14 : Composition élémentaire des échantillons de minerais du corpus de PBL et TNN. Compositions moyennes obtenues au MEB-EDS (%mass.). 183
Tableau 15 : Résultats des analyses en diffraction des rayons X sur poudre des échantillons de minerais. +++ = phase majoritaire, ++ = phase secondaire, + = phase mineure. 184
Tableau 16 : Caractéristiques macroscopiques des fragments de creusets de Vilabouly. 187
Tableau 17 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans la pâte des creusets de PBL (ICP-MS, ICP-OES). 191
Tableau 18 : Principaux éléments traces de la pâte des creusets de PBL (ppm) Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 193
Tableau 19: Caractéristiques microscopiques de la pâte des creusets de Puen Baolo. 195
Tableau 20 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans la couche de scorie adhérente au creuset (données MEB-EDS). 204
Tableau 21 : Caractéristiques microscopiques de la couche de scorie adhérente aux creusets de Puen Baolo. Abréviations : P=polyèdre, D=dendrite, CuS= sulfures de cuivre, Cu= cuivre métallique, chalc= chalcocite, cov=covellite, S= squelette, A = aiguille, Del= delafossite. 204
Tableau 22 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans la pâte des creusets de TNN (ICP-MS et ICP-OES). 212
Tableau 23 : Principaux éléments traces (ppm) détectés dans la pâte des creusets de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS. 213
Tableau 24 : Caractéristiques microscopiques de la pâte des creusets de Thong Na Nguak. 214
Tableau 25 : Coefficients de variation pour chaque composé identifié dans la couche de scorie adhérente au creuset de TNN (données MEB-EDS). 217
Tableau 26 : Caractéristiques microscopiques des scories de Thong Na Nguak. Abréviations : P=polyèdre, D=dendrite, S=squelette, CuS=sulfure de cuivre, Cu= cuivre métallique, chalc=chalcocite, cov=covellite. 223
Tableau 27 : Les différents composés identifiés dans la pâte. 223
Tableau 28 : Présence des types de scories en fonction des niveaux archéologiques..... 233
Tableau 29 : Caractéristique macroscopique des 56 scories sélectionnées pour analyses aux MO et MEB-EDS. 236
Tableau 30 : Coefficients de variations pour chaque composé présent dans les scories de PBL (ICP-OES et ICP-MS). 237
Tableau 31 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans les scories de TNN (ICP-MS et ICP-OES). 244
Tableau 32 : Caractéristiques microscopiques des scories de Puen Baolo. Abréviations : Fa= fayalite, Ma=magnétite, CuS=Sulfures de cuivre, Cu= cuivre métallique, P=polyèdre, S=Squelette, F=feather, A=aiguille, B=magnétite en bande, D=dendrite, chalc=chalcocite, cov=covellite, chalp=chalcopyrite. 257
Tableau 33 : Caractéristiques microscopiques des scories de Thong Na Nguak. Abréviations : Fa= fayalite, Ma=magnétite, CuS=Sulfures de cuivre, Cu= cuivre métallique, P=polyèdre, S=Skeletal, F=feather, A=aiguille, B=magnétite en bande, D=dendrite, chalc=chalcocite, cov=covellite. 271
Tableau 34 : Caractéristiques des lingots coniques avec plusieurs couches. 284
Tableau 35 : Données élémentaires de la couche de scorie. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.). 288
Tableau 36 : Composition élémentaire globale de la couche de matte. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.). 288

Tableau 37 : Composition élémentaire de la couche de cuivre métallique. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.). 289
Tableau 38 : Composition élémentaire des deux types de matte. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.). ... 292
Tableau 39 : Composition élémentaire des échantillons de métal. Données en %mass. obtenues au MEB-EDS (limite de détection = 0,5 %mass.) et en XRF (Limite de détection = 500 ppm, excepté pour les éléments légers Si, Al, P et S). Les blancs dans le tableau représentent des éléments non détectés ou en dessous de la limite de détection. 307
Tableau 40 : Conditions expérimentales. Ma= malachite, Chalp= chalcopyrite et Chalc= chalcocite. 320
Tableau 41 : valeurs de distribution fer-magnésium dans les cristaux de fayalite des scories de Puen Baolo et Thong Na Nguak. X= Fe/(Fe+Mg), selon la méthode décrite par Kresten, 1986 et reprise par Burger, 2008. 345
Tableau 42 : Tableau comparatif des données de Puen Baolo et Thong Na Nguak. 361
Tableau 43 : Tableau comparatif des données de la vallée de Khao Wong Prachan (Non Pa Wai et Nil Kham Haeng) et de celles du Complexe de Vilabouly (Puen Baolo et Thong Na Nguak). 375

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse, à dominante archéométrique, s'inscrit cependant dans une perspective de technologie culturelle plus large en traitant d'un complexe technique (B. Gille, 1978) lié à la métallurgie du cuivre et de ses alliages dans le but de le replacer dans un paysage technique et économique à l'échelle régionale et suprarégionale et ainsi, d'approcher au plus près de la/les société(s) dans le cadre de laquelle elle s'est développée. Ce travail est défini par un cadre géographique, l'Asie du Sud-Est continentale actuelle, ainsi que par une chronologie, la fin de la période préhistorique (âge du Bronze et âge du Fer). Cet ensemble porte donc sur des limites administratives contemporaines. Bien évidemment, certaines constantes écologiques et relations structurelles vont traverser ces frontières. L'Asie du Sud-Est continentale contemporaine regroupe, le Myanmar, la Thaïlande, le Laos, le Cambodge et le Vietnam actuels (Figure 1), soit environ 2 millions de km[21]. En plus de l'Asie du Sud-Est continentale, ce travail étendra par moment ses frontières jusqu'en République Démocratique de Chine (PRC) actuelle, particulièrement le sud et la province actuelle du Yunnan, partageant une frontière avec le Laos, le Vietnam et le Myanmar. L'Asie du Sud-Est continentale contemporaine se définit encore comme un espace mosaïque, tant par sa diversité linguistique (austro-asiatique [khmer, vietnamien], taï-kadaï [lao, thaï], sino-tibétaine [birman] et les dérivés propres aux diverses ethnies), la multitude d'ethnies qui la compose, les pratiques religieuses, sociales, que par ses climats et sa géographie qui sont très variés, avec des chaines de montagnes et de nombreux bassins fluviaux.

Ce travail se concentrera sur l'étude du site de production de cuivre du Complexe de Vilabouly, au Laos central, qui est daté de la fin de la période préhistorique (env. 1000 av. J.-C- 700 ap. J.-C). Les périodes de l'âge du Bronze et du Fer (env. 1000 av. J.-C – env. 500 ap. J.-C) sont les témoins de nombreux transferts culturels et d'échanges avec la Chine actuelle, mais aussi l'Asie du Sud qui ont notamment amené la naissance de la métallurgie du cuivre et du fer. Ces périodes ont durant longtemps été les moins connues dans l'histoire de la région (C. F. Higham, 2014, p.341), puisque les études se sont longtemps concentrées sur la période historique et le phénomène d' « indianisation » de l'Asie du Sud-Est (G. Coedès, 1975; O. W. Wolters, 1982; J. Wisseman Christie, 1995), entrainant une méconnaissance des sociétés protohistoriques (P.-Y. Manguin, 2011). L'âge du Fer est pourtant une période charnière, car il voit une série d'évolutions majeures qui ont mené l'Asie du Sud-Est vers la période historique et la mise en place des premiers grands états comme l'Empire khmer au Cambodge, ou encore Dvaravati en Thaïlande actuelle. Les prémices de ces premiers états trouvent donc leurs racines dans l'âge du Fer, dès la seconde moitié du premier millénaire avant notre ère avec la mise en place des premières formes d'autorités socio-politiques et la naissance des premiers centres proto-urbains (M. T. Stark et B. Sovath, 2001; N. C. Kim, L. Van Toi, et T. H. Hiep, 2010;

[1] Environs 2500 km d'est en ouest et 3200 km du nord au sud.

M. T. Stark, 2015; L. T. Pedersen, 2016; B. Bellina, 2018 a; B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019), concomitants à un accroissement des échanges, du partage de mêmes cultures matérielles et du contrôle sur les matières premières/objets. Si bien qu'une partie de l'âge du Fer est parfois nommée protohistoire ou période historique ancienne (« *Early Historic Period* », Stark, 2001, 1998) pour certaines régions, comme le delta du Mékong. Ce phénomène de naissance des premières formes d'autorités centralisées, tout comme le développement de la métallurgie du cuivre, n'est pas linéaire et contemporain pour toutes les régions d'Asie du Sud-Est. Même si les données sont encore manquantes pour beaucoup d'entre elles, ce phénomène doit être appréhendé à l'échelle de microrégions.



Figure 1 : Carte de l'Asie du Sud-Est continentale actuelle (crédit carte de base : ESRI).

La fin de la préhistoire en Asie du Sud-Est est une période où l'écriture est encore majoritairement absente (premières formes à la fin du premier millénaire av. J. -C -début du premier millénaire ap. J.-C, [P. Y. Manguin, 2000]). Par conséquent, les principales données

disponibles se trouvent dans l'archéologie, par l'étude des sites d'habitat, des cimetières, des artisanats/techniques, la mise en place de chronologies pour des séquences archéologiques bien définies, ainsi que des études comparatives. Aujourd'hui, c'est l'archéologie funéraire qui demeure la mieux documentée pour les périodes de l'âge du Bronze et du Fer. Depuis une trentaine d'années, les recherches sur l'âge du Fer sont croissantes et les données ont permis de dessiner les premières caractéristiques de cette période. Pourtant, ces données et les sites archéologiques étudiés sont encore peu nombreux et certaines régions, principalement montagneuses, comme le Laos actuel, en sont encore quasiment dépourvues. En effet, les recherches sont plus intenses pour les sites côtiers, les plaines et les bassins fluviaux qui semblent avoir connu plus rapidement des expansions socio-politiques liées notamment à leur position géographique. Ainsi, l'intérieur des terres, particulièrement les régions montagneuses, peine encore à être intégré dans ce panorama.

Le développement de la métallurgie du cuivre durant l'âge du Bronze, puis celle du fer à la fin du second millénaire et au milieu du premier millénaire avant notre ère, participe également au dynamisme de cette période. En effet, les études ont montré que le cuivre a largement circulé dans la région sur de longues distances et dans des réseaux d'échanges complexes (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014) où se retrouvent également d'autres biens, comme les céramiques, le verre, les objets lithiques ainsi que leurs matières premières et les cultures matérielles qui leur sont associées (T. O. Pryce et al., 2010; L. Dussubieux et al., 2012; A. Favereau et B. Bellina, 2016; H. Hung et C. Chao, 2016; L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 a; B. Bellina, 2018 a). La métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est a reçu une attention particulière depuis les années 1970 avec les travaux de Robert Maddin et Tamara Stech (T. Stech et R. Maddin, 1988). Puis, les recherches se sont intensifiées dans les années 1980 avec Vincent Piggot/Surapol Natapintu et la fouille des premiers sites de productions primaires en Thaïlande, Phu Lon et la vallée de Khao Wong Prachan (V. C. Pigott et S. Natapintu, 1988; V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997; V. C. Pigott, 2019) ainsi que par les études de Warangkhana Rajpitak et Nigel Seeley (N. J. Seeley et W. Rajpitak, 1984) à Ban Na Di et Ban Don Tha Phet en Thaïlande également. La Thaïlande représente alors la région la mieux documentée et la principale référence en termes de métallurgie du cuivre. Depuis, les connaissances ne cessent de s'accroître, notamment par la mise en place d'études archéométallurgiques (A. Bennett, 1988 a; b; W. W. Vernon, 1996; T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010; H. Cawte, 2012). En revanche, les sites de productions connus et étudiés sont encore trop peu nombreux dans la région afin d'appréhender pleinement les développements de la métallurgie et ces transferts techniques, ainsi que la complexité de ces réseaux d'échanges.

L'objectif de cette thèse est donc d'apporter une contribution à la compréhension de la métallurgie du cuivre à la fin de la période préhistorique, ainsi que d'un territoire, le Laos, qui est pour l'instant demeuré presque vierge du point de vue des études. Ainsi, cette thèse abordera la métallurgie du cuivre par l'étude du site du Complexe de Vilabouly, une zone de

production primaire, qui est seulement la troisième connue en Asie du Sud-Est pour la fin de la période préhistorique. Le site sera étudié suivant le concept de chaine opératoire (A. Leroi-Gourhan, 1973; P. Lemonnier, 1992; V. Roux, 2003) qui est largement utilisé en archéométallurgie, afin de reconstituer les différentes étapes de production, ainsi que ses potentielles variations. La place des productions de Vilabouly dans les réseaux complexes d'échanges en Asie du Sud-Est sera ensuite questionnée par la mise en place d'analyses isotopiques du plomb notamment. Cette thèse s'inscrit dans la continuité de travaux débutés en 2008, et toujours en cours, par T.O Pryce (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014) pour la mise en place d'une base de données regroupant de multiples sites en Asie du Sud-Est. Cette base de données permettra une étude comparative pour Vilabouly, en proposant des hypothèses au sujet de la circulation de ses productions de cuivre et des interactions avec les communautés voisines. Elle permettra également d'intégrer un site situé à l'intérieur des terres, dans une région de moyenne montagne, et ainsi de commencer à remplir les blancs dans les connaissances régionales relatives à ces régions montagneuses enclavées.

Cette thèse sera donc développée comme suit :

- Contexte régional et suprarégional : Le premier chapitre permettra d'apporter des éléments sur le cadre chronologique et contextuel, sur les aspects archéologiques des différentes périodes de la fin de la préhistoire en Asie du Sud-Est continentale (Néolithique/âge du Bronze, âge du Fer). Ainsi que brièvement pour la Chine et l'Inde qui, comme nous le verrons, participent aux interactions avec l'Asie du Sud-Est continentale. La seconde partie du premier chapitre sera recentrée plus particulièrement sur la métallurgie du cuivre, ses développements et les principaux sites identifiés en Asie du Sud-Est continentale.
- Présentation du site : Le second chapitre permettra de présenter le site du Complexe de Vilabouly, sa géographie, sa géologie et son archéologie, afin d'en dresser ses premières grandes caractéristiques. Il en découlera également la sélection du corpus d'étude qui a été faite en fonction des observations archéologiques pertinentes.
- Méthodologies : Le troisième chapitre apportera des éléments méthodologiques pour l'étude des productions de cuivre anciennes, et il sera suivi au quatrième chapitre de la méthodologie appliquée en laboratoire durant cette thèse, afin d'étudier les différents artéfacts en lien à la production du cuivre au Complexe de Vilabouly.
- Résultats et discussions : Par la suite, les Chapitres cinq, six et sept permettront d'en développer les résultats et de les discuter, afin de proposer une reconstitution de chaine opératoire.
- Apports à la compréhension régionale : Enfin, le Chapitre huit permettra d'aborder le Complexe de Vilabouly à l'échelle de l'Asie du Sud-Est. Dans un premier temps, en développant une étude comparative pour la technologie du cuivre avec les autres sites connus, particulièrement la vallée de Khao Wong Prachan. Dans un second temps, la

place et la contribution des productions de Vilabouly aux réseaux d'échanges seront questionnées en identifiant les potentielles voies de circulations. Ces dernières pourront également permettre de mettre en avant les interactions/contacts de Vilabouly avec les régions voisines et d'émettre des hypothèses sur l'origine et le contexte culturel dans lequel évoluent ces populations travaillant le métal.

Chapitre 1 : Contexte archéologique à la fin de la préhistoire et à la transition avec la période historique (env. 1000 av. J.-C- env. 700 ap. J.-C) en Asie du Sud-Est continentale

I.1. Une période de mobilité et de complexification sociale

I.1.1 Du Néolithique à l'âge du Bronze : premières interactions et développements

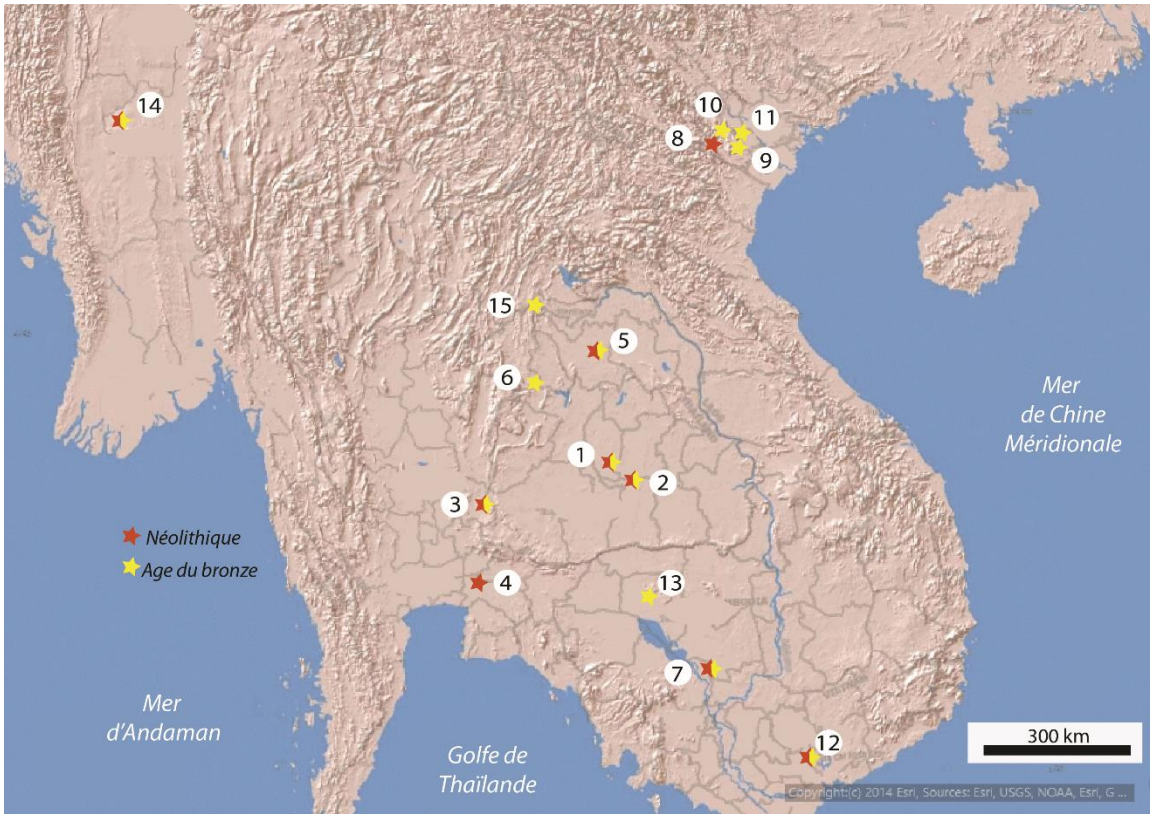


Figure 2 : Localisation des sites du Néolithique (étoile rouge) et de l'âge du Bronze (étoile jaune) mentionnés dans le texte : 1= Ban Non Wat, 2= Ban Lum Khao, 3= Vallée de Khao Wong Prachan, 4= Khok Phanom Di, 5= Ban Chiang, 6= Non Nok Tha, 7= Samrong Sen, 8= Phung Nguyen, 9= Dong Dau, 10= Than Den, 11= Go Mun, 12= An Son, 13= Koh Ta Meas, 14= Nyaung'gan, 15= Phu Lon (crédit carte de base : ESRI).

La période chronologique abordée pour cette thèse ne comprend pas le Néolithique, car elle s'intéresse particulièrement aux développements de la métallurgie du cuivre/bronze durant l'âge du Bronze, et particulièrement à l'âge du Fer. Nous allons tout de même présenter dans cette sous-partie les grandes caractéristiques de la période Néolithique afin de mieux comprendre la période suivante de l'âge du Bronze avec laquelle elle possède certains traits communs. Avant toute chose, il faut également préciser que notre chronologie d'étude est impactée par le plateau de Hallstatt qui rend donc notre connaissance de la chronologie assez imprécise et nécessiterait la mise en place de différentes méthodologies de datations ciblées sur certaines séquences archéologiques, afin d'obtenir une résolution satisfaisante, ce qui n'est pas le cas pour certains contextes.

1. La période Néolithique

Les études en linguistique, paléobotanique et archéologie permettent aujourd'hui de caractériser la période Néolithique et la font débuter en Asie du Sud-Est continentale aux alentours de 2300-1800 av. J. –C (Figure 3), avec les premières formes de culture (riz et millet) et d'élevage, notamment le porc et les bovins (P. S. Bellwood, 2005, 2006; F. Rispoli, 2007; C. Castillo et D. Q. Fuller, 2010; C. Castillo, 2011; C. F. Higham et al., 2011; M. Oxenham, H. Matsumura, et N. Kim Dung, 2011). En revanche, les voies de diffusion empruntées par ces courants néolithiques sont encore mal définies : transferts de connaissances et/ou migrations de populations depuis l'actuelle Chine vers l'Asie du Sud-Est. La culture du riz et du millet proviendrait de la dispersion de communautés de la vallée du Yangtze (Plaines centrales) en Chine actuelle où les premières formes de cultures sont datées aux environs de 8000 av. J.-C (W. M. Wang et al., 2010; H. M. Li et al., 2016) puis se diffuserait vers Lingnan au sud, en passant par les bassins fluviaux, puis vers le Vietnam. Une autre voie de diffusion côtière a pu être proposée, avec des routes partant de Taïwan et Fujian (P. S. Bellwood et E. Dizon, 2008).

La période Néolithique en Asie du Sud-Est a pu être datée suivant la chronologie de Ban Non Wat, Ban Chiang, Bam Lum Khao ou encore des sites de la région de Lopburi en Thaïlande dans la vallée de Khao Wong Prachan, ainsi qu'au Myanmar, à Nyaung'gan et Oakaie (C. F. Higham et A. Kijngam, 2009; C. F. Higham, T. Higham, et A. Kijngam, 2011; F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013; T. O. Pryce et al., 2018; T. Higham et al., 2020). Plusieurs vestiges de la période Néolithique sont également connus au nord du Vietnam, avec les sites de la culture de Phung Nguyen, mais avec des chronologies mal définies (Figure 2). Les premiers sites à avoir fourni de fortes évidences de culture en Thaïlande se trouvent dans la vallée de Khao Wong Prachan, mais les études ont montré que les premières formes d'agriculture incluaient le millet, non le riz. Les populations pratiquaient une culture sèche, probablement associée à une exploitation des plantes sauvages (V. C. Pigott et al., 2006; S. Weber et al., 2010; J. d'Alpoim Guedes et al., 2020). Une des premières formes de domestication du riz en Thaïlande a également été mise en avant pour le site côtier de Khok Phanom Di, datées de 2000-1500 av J.-C (C. Castillo, 2011).

Certains aspects de la culture matérielle Néolithique, notamment une technique particulière de décoration céramique « *incised and impressed* », ont amené à proposer l'existence d'une sphère d'interaction sud-est asiatique (F. Rispoli, 2007, p.181). Ainsi, les similitudes dans les objets découverts au sein de ces différentes régions pour la période Néolithique étaient même au départ perçu comme un *package* culturel arrivé de la Chine actuelle, en incluant une même tradition céramique (F. Rispoli, 1997), la culture du riz et du millet, des outils en pierre polie (particulièrement des herminettes) et l'artisanat d'ornements en coquillages marins et en pierre (Higham, 1996, 2002 ; Rispoli, 2004). Malgré le partage de certains traits communs, cette hypothèse d'une diffusion uniforme et partagée est aujourd'hui nuancée. En effet, cette diffusion est au contraire diverse, comme cela a notamment été montré pour le plateau du Yunnan-Guizhou (A. Yao, 2010) où la culture du riz est datée vers 3000/2500 av. J.-C et celle

du millet aux environs de 2000 av. J.-C (H. M. Li et al., 2016; X. Wu et al., 2019). Cette diversité serait plus particulièrement liée à des climats et des zones géographiques spécifiques. Ainsi, une différence existait entre communautés des montagnes et des plaines. Depuis quelques années, les changements climatiques sont également au centre des hypothèses sur le développement des premières formes d'agriculture, et notamment du riz (J. d'Alpoim Guedes et al., 2020). Dès la période Néolithique, Yao identifie en Chine deux voies de communication majeures qui ont permis d'apporter des biens exotiques aux communautés néolithiques. Une route terrestre, reliant le sud-ouest de la Chine avec les Plaines Centrales, et une route maritime sur les côtes sud de la Chine :

> *« The significance of these exchange routes linking highland and lowland regions should not be underestimated as they presage the dynamics of interregional interaction that led to the transmission of bronze metallurgy and the subsequent development of Bronze Age polities. »*(A. Yao, 2010, p.215)

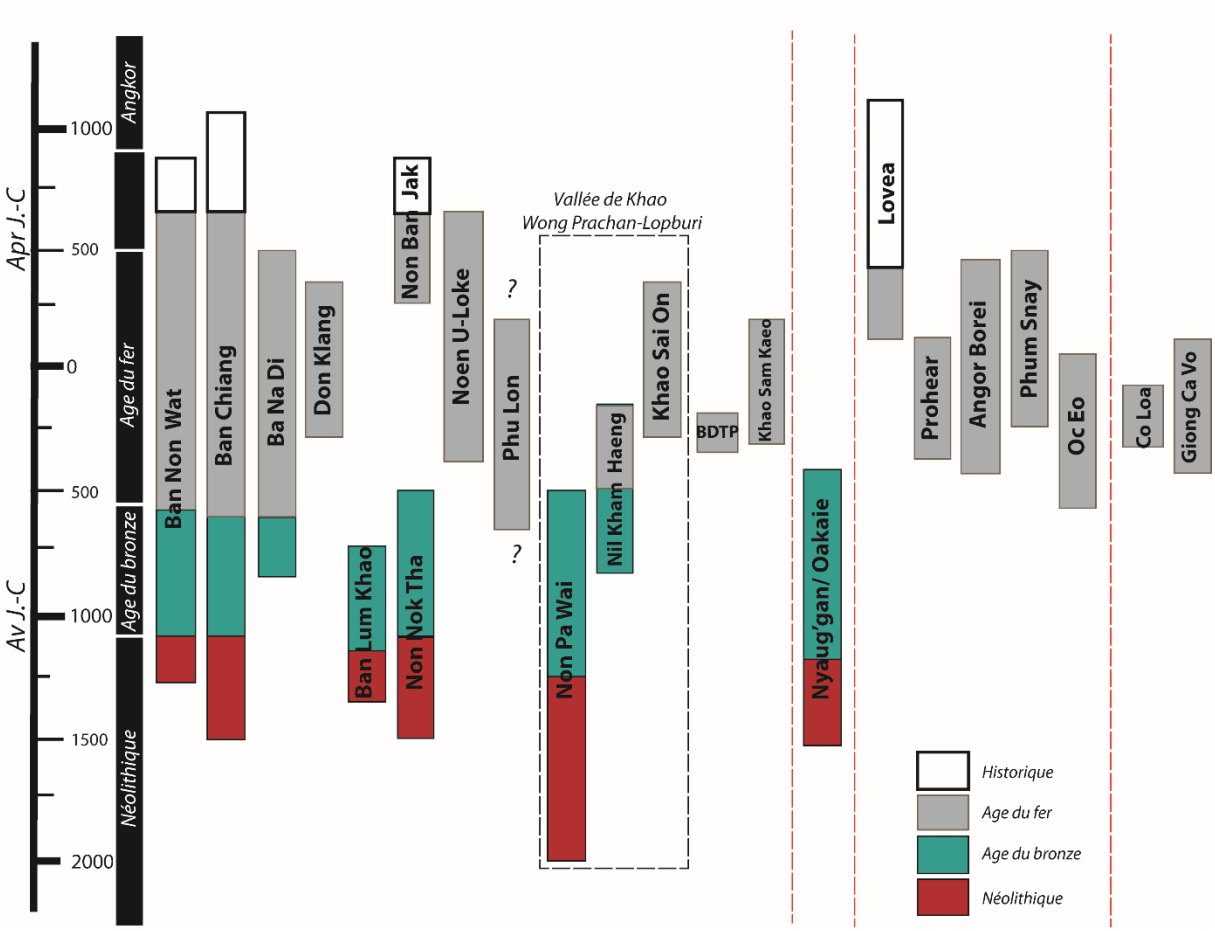


Figure 3 : Frise chronologique reprenant les périodes d'activité des principaux sites archéologiques d'Asie du Sud-Est évoqués durant ce chapitre (sources : Higham et al, 2015 ; Higham et al, 2020 ; Higham et al, 2011; Pedersen, 2016 ; Pryce et al, 2018 ; Pryce et al, 2016 ; O'Reilly et Shewan, 2015 ; Sehwan et al, 2020 ; Reinecke et al, 2009 ; Kim et al, 2010 ; NBJ :Higham et al, 2014 ;Dung, 2001 ;Glover et Bellina, 2018). Voir aussi White et Hamilton, Ban Chiang, volume 2C.

2. L'âge du Bronze : transmission des techniques du cuivre/bronze

La métallurgie du cuivre/bronze, qui coïncide avec le début de l'âge du Bronze, serait parvenue en Asie du Sud-Est continentale dans le courant des XIII-XIèmes siècles av. J.-C (C. F. Higham, K. Douka, et T. Higham, 2015; T. O. Pryce et al., 2018; T. Higham et al., 2020) en suivant potentiellement les mêmes voies de diffusions néolithiques. Le début de l'âge du Bronze n'est pas contemporain pour toutes les régions d'Asie du Sud-Est, tout comme l'est le développement de la métallurgie qui semble dépendre des contextes et des différentes adaptations/choix effectués par les communautés locales. Ainsi, l'arrivée de la métallurgie serait plus tardive dans la péninsule thaïlandaise, qu'au nord de la Thaïlande par exemple. L'âge du Bronze en Asie du Sud-Est demeure mal appréhendé, principalement en ce qui concerne la nature de ces organisations sociales (C. F. Higham, 2014). En effet, l'âge du Bronze est connu pour un nombre de sites relativement restreint (Figure 2) : des sites thaïs du plateau du Khorat (Ban Non Wat, Bam Lum Khao, Ban Chiang, Ban Na Di, Non Nok Tha, Nong Nor), dans la vallée de Khao Wong Prachan, mais également pour quelques sites au Vietnam (ex : Dong Dau, Hoa Loc, Hang Gon, Thanh Den, Go O Chua, Go Mun ou An Son) dont les séquences chronologiques sont mal définies (D. Bayard, 1984; D. J. W. O'Reilly, 2003; C. F. Higham et al., 2011), au Cambodge (Ex : Samrong Sen, Khok Ta Meas; R. Murowchick, 1988 b; a) et plus récemment au Myanmar, à Oakaie, Nyaung'gan (Pryce et al., 2018) et Halin (Pryce, *pers.comm.*).

Les communautés de l'âge du Bronze en Asie du Sud-Est n'étaient pas nécessairement plus nombreuses que celles du Néolithique et semblent se caractériser par des unités autonomes et flexibles ne comprenant pas plus de 500 individus, au sein desquelles l'agriculture et l'élevage sont pratiqués ainsi que plusieurs formes d'artisanat (C. F. Higham, 1989, 2014, p.269; F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013). Les communautés ne semblaient pas soumises à un stress social, qu'on pourrait lier à l'absence de conflit durant l'âge du Bronze. Les communautés de l'âge du Bronze utilisent un répertoire stylistique restreint pour les objets en cuivre/bronze, dérivés des formes des objets lithiques déjà employés durant la période Néolithique. Ces objets continuent d'ailleurs à être produits en pierre en parallèle des exemplaires métalliques. Les principales typologies sont : des haches, des herminettes, des pointes de flèches, des pointes de lance et des bracelets. La découverte du site de Ban Non Wat, situé à un emplacement favorable avec un accès aux objets en circulation, a permis de proposer que l'arrivée de l'âge du Bronze et de sa technique en Asie du Sud-Est pourrait coïncider, pour certaines zones géographiques, avec les premières formes de complexification d'un statut social (C. F. Higham, T. Higham, et A. Kijngam, 2011). Elles sont perceptibles à travers les premières inégalités funéraires caractérisées par la présence distinctive de tombes accompagnées d'offrandes plus riches. Hormis pour Ban Non Wat, ce phénomène n'est pas observé pour les autres sites de l'âge du Bronze. Les signes de cette complexification sociale

restent donc limités[2]. En effet, cela ne semble pas être le cas pour tous les sites comme la région de Ban Chiang, plus au nord de Ban Non Wat. Ainsi, l'arrivée de la métallurgie du cuivre ne coïncide pas avec la mise en place des premiers états d'Asie du Sud-Est (C. F. Higham, 1996, 2002; J. C. White et E. G. Hamilton, 2018 a).

Durant plusieurs décennies, les recherches et débats sur la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale se sont principalement concentrés sur les origines de cette technologie : la période, sa nature d'innovation indépendante versus importée, et les mécanismes par lesquels ces transferts technologiques seraient arrivés de la Chine actuelle (Higham, 1996; Pigott et Ciarla, 2007; Pryce et al., 2010; White, 1988; White et Hamilton, 2009). Une origine de la métallurgie via l'Inde (Bengale), où elle apparait durant le troisième millénaire av. J. -C, a été écartée compte tenu du peu d'évidences d'un contact avec cette région avant le milieu du premier millénaire av. J.-C en Asie du Sud-Est (B. Bellina et I. C. Glover, 2004). Il est maintenant largement accepté que les premières traditions métallurgiques en Asie du Sud-Est continentale ne représentent pas une innovation indépendante[3], mais dérivent de réseaux d'interactions nord-sud entre l'Asie du Sud-Est et la Chine actuelle. Deux principales théories ont longtemps été évoquées, partageant un modèle d'une origine de la métallurgie chinoise avec dérivation du *phénomène transculturel de Seima-Turbino*[4] (E. Chernykh, 1992), via le corridor du Gansu au tournant des III/IIèmes millénaires av. J.- C. Le premier modèle, maintenant le plus largement accepté, est porté par Charles Higham, Fiorella Rispoli, Roberto Ciarla, Vincent Pigott, Oliver Pryce et autres auteurs, le second par Joyce White (Figure 4). Le modèle de Joyce White (White, 1988; White et Hamilton, 2018, 2014, 2009) a été définitivement remis en question suite à la réévaluation de la chronologie de Ban Chiang (C. F. Higham, T. Higham, et A. Kijngam, 2011; C. F. Higham, K. Douka, et T. Higham, 2015), sur laquelle s'appuie son modèle.

Charles Higham a largement contribué à l'affinement des chronologies en Asie du Sud-Est via le développement des datations par radiocarbone en Thaïlande (C. F. Higham, T. Higham, et A. Kijngam, 2011; C. F. Higham, K. Douka, et T. Higham, 2015) sur de larges séquences archéologiques. Ces datations, ainsi que d'autres preuves archéologiques, ont mené Higham et consorts à proposer que la métallurgie du cuivre/bronze et sa technologie de fonte

[2] Des differences de richesses entre les tombes de l'âge du Bronze pourraient aussi être présentes au Myamnar (T.O Pryce, *pers. comm*.).

[3] La nature d'innovation indépendante de la métallurgie du cuivre/bronze en Asie du Sud-Est était proposée dans les années 1960/70 (D. T. Bayard, 1972; C. Gorman et P. Charoenwongsa, 1976).

[4] *Seima-Turbino* se rapporte à une culture définie sur un ensemble de sites funéraires de la Finlande à la Mongolie, pour lesquels des assemblages d'objets à base de cuivre avec des caractéristiques similaires ont été découverts. Ces objets avec des caractéristiques similaires suggéraient une même origine de la métallurgie du cuivre, d'où cette dénomination de « phénomène transculturel » qui serait parvenu jusqu'en Chine. Le phénomène de *Seima-Turbino* est daté de 2300-1800 av. J. -C (Chernykh, 1992).

émergent pour la première fois en Asie du Sud-Est dans le dernier quart du second millénaire av. J.-C, durant les XIII-XIèmes siècles av. J.-C (V. C. Pigott et R. Ciarla, 2007; C. F. Higham et T. Higham, 2009; F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013; R. Ciarla, 2013). Ce modèle se base sur plusieurs sites qui ont fait l'objet de campagnes de datations détaillées : Ban Chiang, Ban Lum Khao, Ban Non Wat, Non Nok Tha, les sites de la vallée de Khao Wong Prachan en Thaïlande (C. F. Higham, K. Douka, et T. Higham, 2015; T. Higham et al., 2020) et les sites de Oakaie/Nyaung'gan au Myanmar dont une étude récente a permis de placer la transition entre le Néolithique et l'âge du Bronze durant les Xème-IXème siècles av. J.-C (T. O. Pryce et al., 2018).



Figure 4 : les deux modèles de diffusion de la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale : en noir, celui de Joyce White, en rouge, Higham & consorts (crédit carte de base : ESRI).

L'hypothèse serait que la technologie apportée en Asie du Sud-Est serait dérivée des cultures sophistiquées utilisant le bronze dans les plaines centrales de l'actuelle Chine, via les régions de Lingnan au sud (Figure 4), par des relations de commerce, d'échanges et/ou la migration de population, en premier lieu au nord du Vietnam. La métallurgie aurait elle-même atteint les régions du nord de la Chine via des contacts avec des communautés eurasiennes des Steppes au nord-ouest de la Chine actuelle (Ciarla, 2007; Higham, 1996; Higham et al., 2011; Higham et Rispoli, 2014; Pigott et Ciarla, 2007; Rispoli et al., 2013b). La tradition transmise en Asie du Sud-Est ne possède pas l'élaboration technique et décorative des assemblages métalliques des élites chinoises des plaines centrales et peut refléter des traditions métallurgiques plus simples associées à des contextes hors élite, avec principalement, la production de petits instruments et des ornements, comme des bracelets. En effet, l'arrivée de la technologie du cuivre/bronze en Asie du Sud-Est ne semble pas coïncider avec l'émergence d'une élite sociale et politique marquée, comme c'est le cas en Chine. Les évidences perçues dans les sites funéraires, comme Ban Non Wat (C. F. Higham, T. Higham, et A. Kijngam, 2011), ne laissent pas apparaître l'émergence d'une élite, seulement une augmentation de la richesse des offrandes des tombes de certains défunts, pouvant alors montrer l'émergence d'une classe héréditaire avec un accès à des biens exotiques. De plus, ces tombes plus riches sont visibles pour Ban Non Wat, alors qu'elles sont absentes pour la plupart des autres sites de l'âge du Bronze.

Les sociétés complexes élitistes du nord de la Chine, dans les plaines centrales, en quête de biens exotiques de luxe comme des carapaces de tortues, étendent leurs échanges jusqu'au sud de la Chine, et même en Asie du Sud-Est. L'Asie du Sud-Est se trouve alors toujours dans la période Néolithique pour la plupart des régions. Cette stimulation d'échanges serait à l'origine de la diffusion progressive de la métallurgie du cuivre vers le sud de la Chine, puis vers l'Asie du Sud-Est (R. Ciarla, 2007; C. F. Higham, T. Higham, et A. Kijngam, 2011). La technologie des plaines centrales s'étendrait vers le sud, via le versant du fleuve Yangtzé, permettant l'émergence d'autres industries sophistiquées du bronze. La culture de *Sanxingdui-Jinsha* (J. Mei et al., 2015) dans la Province du Sichuan (Figure 4) possède des manifestations métallurgiques contemporaines à la Période d'Erlitou, et jusqu'aux débuts de la Dynastie des Zhou de l'Ouest (1700-1300 av. J.-C). Cette culture, dont on sait peu de choses, s'épanouit dans la plaine de Chengdu avec une matrice culturelle différente des plaines centrales.

Le biais par lequel les biens, les idées et les communautés auraient circulé est encore un sujet débattu et en manque de données. Comme le processus de néolithisation est arrivé en Asie du Sud-Est, l'origine de la métallurgie pourrait avoir suivi les mêmes voies de transmission. Vincent Pigott et Roberto Ciarla ont tenté de démontrer le rôle joué par le réseau de rivières

du fleuve Yangtzé (V. C. Pigott et R. Ciarla, 2007, p.81). La géographie régionale jouerait un rôle clé dans le mouvement des personnes et des biens entre la Chine et l'Asie du Sud-Est. Entre ces deux entités coulent neuf des plus grandes rivières mondiales (le Brahmapoutre, l'Irrawaddy, le Salouen, le Chao Phraya, le Mékong, le fleuve Rouge/Song Hon, le fleuve Jaune, le Xinjiang et le Yangtze). Le mouvement des hommes et des informations avec ces voies fluviales aurait également pu entraîner la circulation des connaissances et pratiques techniques. Des voies d'échanges maritimes le long de côtes de la Chine vers l'Asie du Sud-Est pourraient être une autre hypothèse à envisager.

La région de Lingnan a été proposée par R. Ciarla (2007) comme une zone géographique potentielle pour la transmission de la métallurgie du cuivre/bronze en Asie du Sud-Est, dans un contexte d'interactions entre des sociétés avec des statuts sociaux et technologiques différents. Cette hypothèse se base particulièrement sur le cimetière de *Yuanlongpo*, dont la chronologie a depuis été réévaluée du XII-Xèmes siècles av. J. -C jusqu'au VII-VIèmes siècles av. J.-C (A. Yao et al., 2020) donc contemporaine des premières formes d'une métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est.

Depuis les années 2000, une autre région de l'actuelle Chine reçoit un intérêt tout particulier. Il s'agit du Plateau du Yunnan-Guizhou (R. Ciarla, 2007; J. C. White et E. G. Hamilton, 2009; F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013) qui pourrait être un autre candidat possible de cette transmission vers l'Asie du Sud-Est continentale. En effet, cette région possède une situation géographique avec une connexion naturelle vers l'Asie du Sud-Est continentale pouvant constituer une zone de transfert culturel et technologique. Elle est traversée par trois axes fluviaux majeurs d'Asie de l'Est et du Sud-Est : le Yangtzé, le Song Hon et le Mékong. Dans cette région les sites de métallurgie anciens connus sont rares. Des découvertes à *Haimenkou* et *Yinsuodao* dans la partie haute du Mékong confirment aujourd'hui la présence d'activités de production de cuivre secondaire et primaire (T. Chiou-Peng, 2018; G. Zou et al., 2019). Le *Dian Heartland Archaeological Project* a permis de repousser les débuts de la séquence archéologique pour *Dian* au début du XII-XIème siècles av. J.-C, au lieu de 500 av. J.-C, avec des activités métallurgiques secondaires débutant au XI-Xème siècles av. J. -C (A. Yao et al., 2020), ce qui correspond alors avec l'émergence de la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est. Pour Alice Yao, les interactions inter-régionales identifiées entre les communautés des hautes et basses terres du plateau du Yunnan-Guizhou dès la période Néolithique (A. Yao, 2010) pourraient être à l'origine de la diffusion de la technologie du cuivre/bronze dans le Yunnan. En effet, dès le Néolithique des voies de communication (*The Southwest Silk Road*) reliaient ces communautés aux plaines centrales, aux côtes de la Chine ainsi qu'à l'Asie du Sud-Est, et servaient notamment pour l'échange de biens de prestige.

Les objets à base de cuivre mis au jour en Asie du Sud-Est et au sud de la Chine dans les débuts de la métallurgie du cuivre/bronze partagent des traits communs (J. C. White, 1988; R. Ciarla, 2007; V. C. Pigott et R. Ciarla, 2007; J. C. White et E. G. Hamilton, 2009; A. Yao, 2010). Ils sont principalement composés de bronze avec des taux d'étain généralement de 10 %. Le répertoire typologique se limite à des objets utilitaires comme des haches ou des hameçons, ainsi qu'à des objets ornementaux comme des bracelets et à l'utilisation de moules bivalves. Les évidences archéologiques ne vont pas dans le sens d'un transfert direct depuis les plaines centrales de Chine, mais plutôt d'un processus progressif d'échange-sélection-localisation par des communautés locales avec leurs propres choix techniques (P. Lemonnier, 1993). L'étude de ces courants de transmissions technologiques et de leur appropriation par les communautés locales, comme Roberto Ciarla le mentionne, doit également prendre en considération :

> *« The capability of the recipient societies to select from the new technology only the components better suited to their social structure and to their specific technological needs. »* (R. Ciarla, 2007, p.315)

Cette appropriation technique pourrait venir expliquer les différences observées entre les traditions des plaines centrales, du sud de la Chine et de l'Asie du Sud-Est. La nature exacte des échanges/interactions avec les communautés locales est encore sujette à débat, ainsi que la forme prise par cette transmission de la technologie du cuivre/bronze en Asie du Sud-Est. Est-ce que la technologie seule a été transmise via une tradition orale ou a-t-elle été transmise via un apprentissage direct par des artisans spécialisés maîtrisant cette technologie ? (T. O. Pryce, 2008; C. F. Higham et F. Rispoli, 2014). Plus de travaux encore sont nécessaires sur la question de l'origine de la métallurgie en Asie du Sud-Est continentale, plus particulièrement quand la bordure avec la Chine actuelle compte environ 2500 km, avec une diversité d'environnements et de cultures vastes, dont certains restent encore peu connus. Les voies de transmissions de la métallurgie du cuivre/bronze devraient être perçues comme multiples et hybrides. Dès la période Néolithique les communautés ont été soumises à des imports et des connaissances externes apportés par des routes de communications diverses comme *The Southwest Silk Road,* avec la circulation de biens, mais certainement aussi de populations.

I.1.2 L'âge du Fer

1. Intensification des échanges, de l'agriculture et mutation des sites de peuplements

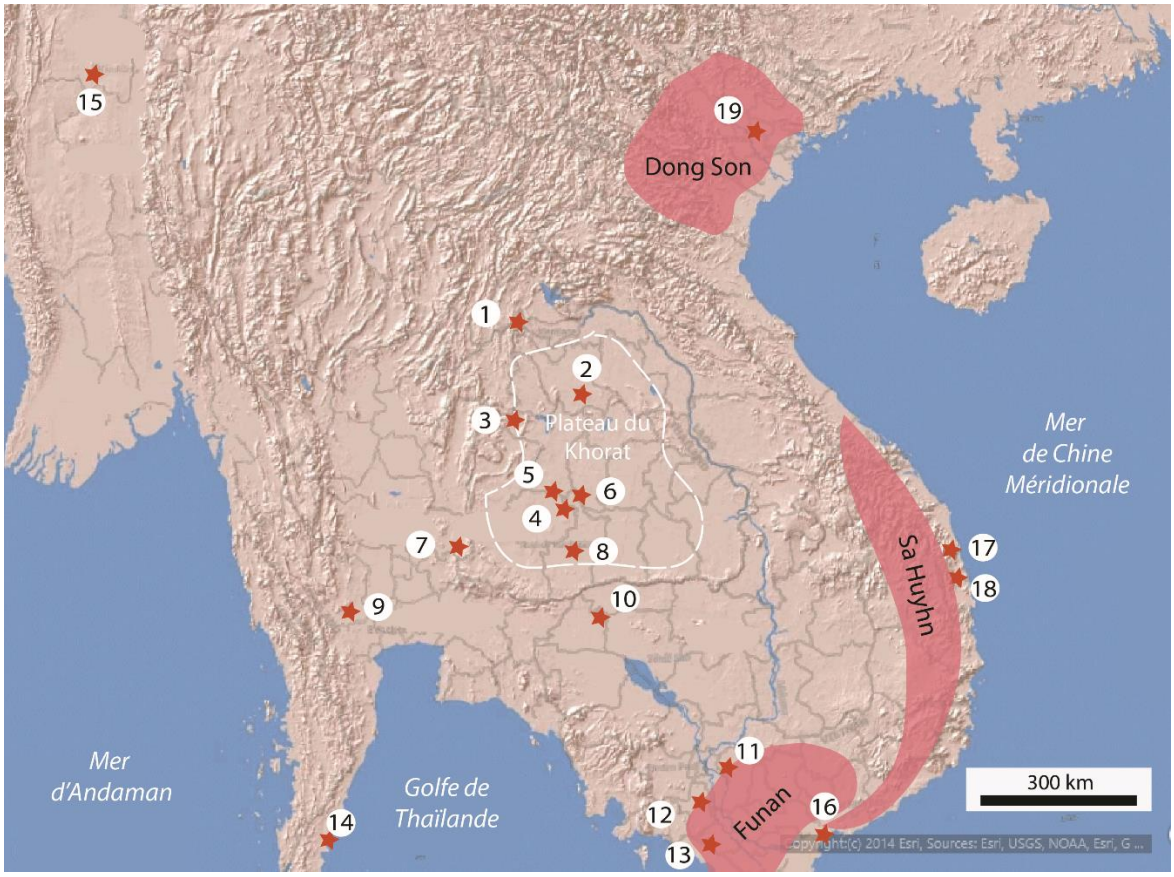


Figure 5 : Asie du Sud-Est continentale avec la localisation des sites de l'âge du Fer ainsi que des aires des principales cultures mentionnées dans cette partie : 1= Phu Lon, 2= Ban Chiang, 3= Non Nok Tha, 4= Ban Non Wat, 5= Non U-Loke, 6=Ban Lum Khao, 7= Vallée de Khao Wong Prachan, 8= Non Ban Jak, 9=Ban Don Ta Phet, 10= Lovea, 11= Prohear, 12=Angkor Borei, 13= Oc Eo, 14=Khao Sam Kaeo, 15= Oakaie, 16= Giong Ca Vo, 17= Go Ma Voi, 18= Sa Huynh, 19= Co Loa (crédit carte de base= ESRI).

Depuis quelques années, les recherches archéologiques pour la fin de la préhistoire en Asie du Sud-Est ne sont plus orientées principalement vers la période Néolithique et l'âge du Bronze qui étaient jusqu'alors les périodes phares étudiées afin de comprendre les transferts technologiques à l'origine de l'agriculture et de l'élevage ainsi que de la métallurgie du cuivre depuis la Chine actuelle. Elles se tournent à présent davantage vers l'âge du Fer qui apparaît comme une période charnière, témoin de nombreuses mutations, avec une intensification des échanges et des biens importés, la mise en place d'artisanats spécialisés, ainsi que la naissance des premières autorités politiques et sociales avec les premiers centres proto-urbains. L'âge du Fer pose alors les fondements des premiers états qui se développeront par la suite à la période historique, à partir de la seconde moitié du premier millénaire ap. J.-C.

Comme dans la classification européenne, l'âge du Fer succède à l'âge du Bronze et se caractérise notamment par l'arrivée de la métallurgie du fer en Asie du Sud-Est continentale dans le courant des V-IVèmes siècles av. J.-C (Figure 3). L'âge du Fer d'Asie du Sud-Est est généralement découpé en deux grandes phases : une première caractérisée par l'arrivée de

la métallurgie du fer, de contacts avec l'Asie du Sud ainsi que de toutes les mutations qui l'accompagnent, et une seconde, parfois nommée période historique ancienne (« *Early Historic period* ») avec l'émergence des premières autorités socio-politiques accompagnée d'une intensification des réseaux d'échanges.

Les détails économiques, sociaux et techniques ayant amené à l'introduction de la métallurgie du fer en Asie du Sud-Est sont encore peu définis, notamment par un manque d'étude (A. Bennett, 1982; L. M. Hognan et S. Rutnin, 1989). La métallurgie du fer pourrait être arrivée en Asie du Sud-Est par les mêmes voies d'interactions que le processus de néolithisation et la métallurgie du cuivre/bronze (F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013), ou par des contacts avec l'Asie du Sud (B. Bellina et I. C. Glover, 2004), où la méthode de réduction du fer en bas fourneau[5] est bien implantée (K. N. Dikshit, 1989; D. K. Chakrabarti, 1992).

Dans le premier cas, la métallurgie du fer serait apparue en premier lieu dans la région de Bac Bo, au nord du Vietnam, occupé par la culture de *Dong son* (C. F. Higham, 2002, p.170-179). Au sud de la Chine et au nord du Vietnam, le fer semble avoir été utilisé sous forme de biens importés à partir de l'époque des Royaumes Combattants (476-221 av. J.-C). Dans la région de la moyenne et basse vallée du Yangtze, la technique de réduction par procédé direct[6] serait alors pratiquée depuis le milieu du premier millénaire av. J.-C (B. Bronson, 1999).

Dans le second cas, la métallurgie du fer serait d'origine indienne, logiquement apparue en premier lieu en Asie du Sud-Est dans les régions ouvertes sur la baie du Bengale pour lesquelles des objets en fer se retrouvent sur les sites archéologiques. Même si peu d'éléments, hormis les objets finis, ne viennent à ce jour le confirmer, cette seconde hypothèse s'avère très probable. En effet, des sites pour lesquels des objets en fer ont été découverts, antérieurs aux sites de *Dong son*, sont connus (Nil Kham Haeng en Thaïlande, Kan Gyi Gon au Myanmar). Une production secondaire et potentiellement primaire de fer en développement avec des techniques simples est également connue pour la péninsule Thaï-malaise, pour les sites portuaires de Khao Sam Kaeo, Khao Sek et Phu Khao Thong (L. Biggs et al., 2013; P. Petchey et al., 2018). Au milieu du premier millénaire av. J.-C, la métallurgie du fer fait progressivement son apparition en Asie du Sud-Est, principalement sous forme d'objets manufacturés. En Thaïlande, la métallurgie du fer semble uniquement basée sur le procédé direct et la forge. Des scories issues de la forge sont également fréquemment rencontrées pour les sites de cette période en Thaïlande (T. O. Pryce et S. Natapintu, 2009). Ainsi, un site de production de fer du III-I^{ème} siècle av. J.-C avec la présence de fours a été identifié dans le bassin de la rivière Mun, à Ban Dong Phlong (E. Nitta, 1991, 1997). La métallurgie du fer, encore plus que celle du cuivre, nécessite de plus amples recherches, car ses développements et ses techniques sont encore peu définis.

[5] *Bloomery iron smelting*.
[6] *Cast iron smelting technology*.

L'arrivée de la métallurgie du fer coïncide avec d'autres grandes mutations, sociales et organisationnelles. Il est difficile de dire jusqu'à quels degrés ces différents changements sont reliés avec l'apparition du fer, mais ils semblent tous inextricablement dépendants et participent à une période de transition majeure vers l'Asie du Sud-Est historique.

C'est durant l'âge du Fer qu'on perçoit une augmentation marquée et plus systématique des différenciations sociales, particulièrement durant la seconde moitié de l'âge du Fer. Notamment dans les cimetières, alors qu'elles étaient beaucoup plus faibles pour les sites de l'âge du Bronze (C. F. Higham, 2014). Dans les cimetières de l'âge du Fer, par exemple au nord de la Thaïlande, comme à Noen U-Loke et Ban Non Wat, ou encore au Vietnam pour les sites de la culture de *Dong son* (Figure 5), des différences de richesses se font percevoir entre les tombes, avec l'apparition d'un nombre plus élevé de biens marqueurs d'échanges et de biens de prestige. L'augmentation des objets en cuivre/bronze pour les sites archéologiques s'observe également durant l'âge du Fer (T. O. Pryce, 2016, p.5). L'arrivée du fer ne semble pas supplanter celle du cuivre durant cette période, mais des typologies d'objets différentes se répartissent entre les deux métaux. À partir de l'âge du Fer, le cuivre semble davantage employé pour la production d'objets ornementaux, comme les bracelets.

L'apparition de ces classes sociales serait directement reliée à l'augmentation des échanges qui permettent l'apport de biens de prestige/matières premières/techniques, ainsi qu'à une intensification de l'agriculture. En effet, l'âge du Fer est également le témoin d'une mutation des sites archéologiques qui s'agrandissent et se complexifient (C. F. Higham, 1989), comme les sites entourés de fossés à la fin de l'âge du Fer pour le plateau du Khorat ou le site de Co Loa au nord du Vietnam. Les premières formes de conflits, qu'on voit notamment dans la fabrication d'armes en fer, se font également percevoir. Récemment, la mutation observée pour les sites archéologiques du plateau du Khorat en Thaïlande avec l'apparition des sites à fossés (E. Moore, 1988; C. F. Higham, 2002; D. J. W. O'Reilly et G. Scott, 2015) a été corrélée à des changements climatiques avec une adaptation des techniques de culture (C. C. Castillo et al., 2018). À la fin de l'âge du Fer, vers le Vème siècle, des études récentes en Thaïlande ont montré que les pluies étaient moins intenses (G. Scott et D. O'Reilly, 2015; C. C. Castillo et al., 2018). Parallèlement, les études des résidus de riz des sites de Ban Non Wat et Non Ban Jak en Thaïlande indiquent un passage d'une culture sèche du riz, vers une culture humide à l'âge du Fer final. Cette transition s'amorce au début de l'âge du Fer (entre 400 av. J.- C et 200 ap. J.- C). Par la suite, la culture du riz humide devient dominante. C'est également vers cette période, à la fin de l'âge du Fer (IIIème-IVème siècles ap. J.-C), que les premiers sites de peuplement encerclés par de larges fossés font leur apparition. Ce phénomène d'agriculture intensive du riz en parcelles, connu également au travers de textes à partir du VIème siècle ap. J.-C, semble accompagner la mise en place d'une classe élitiste contrôlant l'agriculture. L'arrivée de la métallurgie du fer en Asie du Sud-Est pourrait également participer à cette intensification de l'agriculture en permettant la fabrication d'outils, dont des formes

spécialisées commencent à apparaître pour des sites en Thaïlande (F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013, p.135).

Un certain nombre d'indices montre l'augmentation d'un stress social durant l'âge du Fer (C. F. Higham, 2002; E. Moore et S. Win, 2007; N. C. Kim, L. Van Toi, et T. H. Hiep, 2010; L. T. Pedersen, 2016) notamment l'augmentation, par rapport à l'âge du Bronze, du nombre d'armes attestées sur les sites, ainsi que l'apparition des sites à fossés, pour certains protégés par des remparts comme le site de Co Loa au nord du Vietnam. Nous avons vu que l'apparition des sites à fossés durant l'âge du Fer pouvait être reliée à un accroissement et à une volonté d'un contrôle plus accru de l'agriculture. Ces modifications pourraient avoir plusieurs usages et également répondre à une volonté défensive, liée à un accroissement des conflits pour certaines régions (N. C. Kim, 2013). L'augmentation du stress social pourrait également être directement reliée à l'augmentation de la population et à l'apparition d'une volonté d'un contrôle plus accru des sites stratégiques et des denrées essentielles (D. J. W. O'Reilly, 2007), comme les minerais pour la fabrication du métal, ou encore le sel, dans un contexte d'intensification des réseaux d'échanges.

L'âge du Fer est une époque de bouleversements culturels et sociaux, notamment à travers une intensification des échanges et des routes commerciales maritimes et terrestres. L'intensification des réseaux d'échanges au sein de l'Asie du Sud-Est, mais également avec l'Asie du Sud s'observe particulièrement durant la seconde moitié de l'âge du Fer, durant la période de 100 à 300 ap. J.-C (B. Bellina, 2001, 2003; B. Bellina et I. C. Glover, 2004). Particulièrement bien illustrée par la mise en place de la Route Maritime de la Soie à partir du IVème siècle av. J. -C (B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019). Cette voie maritime relie les côtes de la Chine au monde méditerranéen, en passant par les côtes de l'Asie du Sud-Est et l'Asie du Sud. Des signes indirects d'un contact avec le monde méditerranéen ont été découverts en Asie du Sud-Est dans des contextes du IIIème siècle av. J.-C pour la péninsule Thaï-malaise sous la forme d'objets hybrides, mais également d'échanges de matières premières et d'idées (L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 b). Ces signes indirects se retrouvent également sous la forme de pièces de monnaie, de seaux ou encore d'intailles en carnélite (B. Bellina et I. C. Glover, 2004; B. Borell, 2017) : au sud du Vietnam, à Oc Eo notamment, où des pièces de monnaie datées du IIème siècle ap. J.-C (L. Malleret, 1959) ont été découvertes, mais également dans la péninsule Thaï-malaise avec la découverte d'une pièce de monnaie de l'empereur Domitien (81-96 ap. J.-C) dans la province de Ranong (B. Borell, 2017, 2019).

La mise en place de cette route maritime permet un accroissement des biens marqueurs d'échange, la circulation des répertoires stylistiques, des matières premières et des groupes humains pour les sites côtiers, mais également à l'intérieur des terres. Les études de ces dernières années (A. Calo, 2014; A. Favereau, 2015; A. Favereau et B. Bellina, 2016; H. Hung et C. Chao, 2016; L. Dussubieux et T. O. Pryce, 2016; L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 a; B. Bellina, 2018 a) ont permis de montrer qu'avec l'intensification de ces réseaux d'échanges, les

mêmes répertoires stylistiques et cultures matérielles, sous forme de différents matériaux et objets, circulaient autour de la mer de Chine méridionale, permettant ainsi de définir la sphère d'interaction de la mer de Chine méridionale (« *South China Sea Interaction Sphere* », B. Bellina, 2018).

L'intensification des échanges participerait également à la mise en place de grands centres côtiers, des ports, permettant d'influer sur ces échanges maritimes. La compétition offerte par l'émergence de ces centres proto-urbains côtiers impliqués dans les mêmes réseaux serait un des principaux leviers à la naissance des premiers états (Bellina, 2014; Bronson, 1978; Wisseman- Christie, 1995). Bérénice Bellina parle d'une « culture de réseaux » (Bellina, 2007, p. 90) qui aurait participé à la légitimation des élites sud-est asiatiques. La mobilité et la distribution des biens marqueurs d'échanges peut s'expliquer selon différents schémas : le commerce maritime, les réseaux liés aux biens de prestige, ou encore les migrations à plus ou moins longue distance. Les données disponibles pour les sites archéologiques (bioarchéologiques, technique, alimentation) ne permettent pas toujours de les différencier.

Nous nous attarderons ici sur trois exemples qui seront tout particulièrement importants dans le développement de cette thèse afin d'illustrer l'intensification des réseaux d'échanges et le partage de mêmes cultures matérielles, entre des lieux éloignés autour de la mer de Chine méridionale et dans les terres. Il s'agit des sites de la péninsule Thaï-malaise Khao Sam Kaeo et Khao Sek, les sites de la culture *Sa Huynh* sur les côtes centrales du Vietnam et les peuplements du delta du Mékong.

A. La culture de Sa Huynh

La culture *Sa Huynh* tire son nom du site éponyme de *Sa Huynh* dans la province de Quang Ngai au Vietnam (Figure 5), mais est en réalité un ensemble bien plus vaste, illustrant l'émergence de sites côtiers, implantés dans un vaste réseau d'échange durant l'âge du Fer. La culture *Sa Huynh* est perçue comme un phénomène de l'âge du Fer, débutant durant la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C, et se poursuivant jusqu'au Ier-IIème siècle ap. J.-C, avec le développement des premiers sites du royaume du Champa (N. K. Dung, 2017). Les sites de la culture *Sa Huynh* s'étendent des côtes centrales du Vietnam, de la ville de Hué jusqu'au sud, à la baie de Cam Ranh où se trouve le site portuaire de Giông Ca Vô dont nous reparlerons.

La mise en évidence d'une culture pratiquant l'inhumation en jarre et la crémation a pour la première fois permis d'attirer l'attention sur cette zone du Vietnam (H. Parmentier, 1918). Pour les autres régions d'Asie du Sud-Est continentale, cette pratique de l'inhumation en jarre n'est alors connue que pour les enfants, au nord de la Thaïlande (C. F. Higham et R. Thosarat, 2004, p.343; C. F. Higham, 2014, p.211), également au Myanmar (A.-S. Coupey, 2006, 2013). Une forte concentration de sites avec jarres funéraires a été identifiée autour de la ville actuelle de Hoi An (Xuan Lam, Hau Xa I et II, Thanh Chiem, An Bang et Lai Nghi), comme celui

de Lai Nghi qui compte un total de 63 jarres funéraires qui seraient datées typologiquement[7] entre le IIIème siècle av. J.-C et le Ier siècle ap. J.-C. Le cimetière de Lai Nghi comprend certaines des sépultures les plus riches de la culture *Sa Huynh* avec des objets en fer, perles en or, verre, cornaline et agate ainsi que des contenants, des miroirs, des pièces et des ornements cuivreux (A. Reinecke, 2018). Les objets cuivreux montrent des signes de contacts avec la Chine (M. Yamagata, D. Manh Pham, et B. Chi Hoang, 2001; M. Yamagata, 2007) notamment par la présence d'objets importés comme des miroirs à base de cuivre. Ces objets funéraires semblent illustrer l'émergence de distinctions sociales dans les tombes. En effet, ces riches sépultures de Lai Nghi, ainsi que d'autres sites funéraires comme Go Ma Voi et Go Dua suggèrent la présence d'une élite avec des relations culturelles et des contacts directs ou indirects avec l'actuelle Chine et l'Asie du Sud au travers des réseaux d'échanges.

Giông Ca Vô, au sud du Vietnam, dans la baie de Vung Tau, est un autre exemple de site côtier avec une forte ouverture aux réseaux d'échanges, avec deux datations entre le VI et Vèmes siècles av. J.-C (Nishimura, 2005; Van Thang, 1998). En effet, un riche mobilier de biens importés a été mis au jour dans les 349 tombes que compte le cimetière (L. T. M. Dung, 2001) : objets en or, des perles et des ornements en pierre dure (néphrite, cornaline, grenat), ainsi qu'en verre et des objets à base de cuivre. La position géographique du site, proche du delta du Mékong, lui offre un rapport privilégié aux réseaux d'échanges. Hormis la poterie, les coquillages, les roches et le sel marin, toutes les autres denrées retrouvées à Giông Ca Vô seraient des importations, car les ressources naturelles nécessaires ne sont pas présentes directement aux alentours. L'étude des perles en verre et des objets en pierres dures révèle de fortes concordances avec des artéfacts découverts pour le site Khao Sam Kaeo qui sera abordé juste après, montrant ainsi que des réseaux d'échanges communs devaient exister (B. Bellina, 2003; L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 a).

Différents types d'artéfacts ont permis d'illustrer l'intégration de la culture *Sa Huynh* aux réseaux d'échanges durant l'âge du Fer, particulièrement la poterie, le verre, des artéfacts cuivreux et des artéfacts particuliers en néphrite (L. Dussubieux, 2001; A. Favereau, 2015; H. Hung et C. Chao, 2016). L'étude de ces différents matériaux a révélé une tendance commune pour la circulation d'objets et de cultures matérielles autour de la mer de Chine méridionale, et même jusqu'au sous-continent indien. Pour ne citer qu'un exemple, le style de poterie de la culture *Sa Huynh* se retrouve largement distribué sur les côtes de l'Asie du Sud-Est continentale. Dans la péninsule Thaï-malaise, mais également dans les iles de la mer de Chine méridionale, particulièrement aux Philippines (A. Favereau, 2015, 2017; A. Favereau et B. Bellina, 2016) où la mise au jour de poteries similaires sur le site de *Kalanay* à Masbate, a permis de définir le style *Sa Huynh-Kalanay* (W. Solheim, 1964). Les poteries de style *Sa Huynh-Kalanay* se retrouvent sur de nombreux sites des côtes de l'Asie du Sud-Est. Les récentes études sur ce type de poterie (A. Favereau et B. Bellina, 2016) ont révélé qu'elles

[7] Il semblerait qu'aucune datation radiocarbone n'ait été effectuée.

étaient principalement produites localement, selon le style *Sa Huynh-Kalanay,* montrant alors une grande circulation des répertoires stylistiques, et pas seulement des objets, autour de la mer de Chine méridionale. Le partage de cette sphère culturelle commune autour de la mer de Chine méridionale se corrèle également avec d'autres théories de mouvements de populations, de langue austronésienne, à partir de la période Néolithique, qui auraient notamment pu entraîner la migration de population de Taïwan, vers les Philippines et les côtes du Vietnam (R. Blust, 1995; H. Hung et P. Bellwood, 2010).

La culture *Sa Huynh* avait dans un premier temps été définie comme côtière, mais il semblerait qu'elle entretienne également des contacts et échanges plus avant dans les terres. En effet, Yamagata (2006) a montré que les peuplements de la culture *Sa Huynh* s'étendent également vers l'intérieur des terres, dans les vallées fluviales, notamment autour de la rivière Thu Bon (près de Hoi An), où se retrouve la plus forte concentration des sites de la culture *Sa Huynh*. La concentration de sites dans cette région suggère qu'elle était un centre important de cette culture. La côte permettait aux populations d'avoir une ouverture au commerce maritime reflétée par la forte concentration de biens marqueurs d'échanges, mais il semblerait que ces populations exploitaient également les ressources offertes par la chaine annamitique[8] dans les terres (C. F. Higham, 2014, p.214). Nous reviendrons sur ces questions au Chapitre VIII lorsque nous aborderons les réseaux d'échanges de cuivre.

B. La péninsule Thaï-malaise

Le site de Khao Sam Kaeo (noté KSK) est un autre exemple (Figure 5), à ce jour le plus ancien, de la naissance de proto-cités-États sur les côtes de l'Asie du Sud-Est durant l'âge du Fer. Il illustre également la mise en place d'artisanats spécialisés organisés et l'intensification des réseaux d'échanges. KSK et le site satellite de Khao Sek (KS), sont situés dans la péninsule Thaï-malaise, au carrefour entre la mer d'Andaman et le golfe de Thaïlande, dont la situation offre également accès aux ressources de l'intérieur des terres, via les réseaux fluviaux (B. Bellina, 2018 a). Ces réseaux fluviaux permettent également un passage transpéninsulaire reliant la mer de Chine méridionale à l'océan Indien dans la baie du Bengale. De l'autre côté de la péninsule, d'autres sites côtiers sont également connus, comme Maliwan (B. Bellina et al., 2018) ou Phu Khao Thong (B. Bellina et al., 2014). Les sites côtiers de KSK et KS ont donc dû entretenir des relations d'échanges de longue distance directes ou/et indirectes avec le sous-continent indien, les côtes et les iles de l'Asie du Sud-Est, ainsi que la Chine, via le commerce maritime, mais également avec les communautés situées le long des voies de communication intérieures.

KSK est daté du IVème siècle av. J.-C jusqu'au Ier siècle ap. J.-C[9]. KSK s'étend sur environ 50 hectares. Il revêt un caractère cosmopolite identifié au travers de la variété des objets

[8] La chaîne Annamitique, également connue sous le nom de cordillère de Truong Son, est une chaîne de montagne s'étendant entre le Laos et le Vietnam actuel formant ainsi une frontière naturelle entre les deux pays.
[9] Avec plus de 30 datations radiocarbones, ce qui en fait une chronologie relativement sûre, en comparaison à d'autre sites archéologiques d'Asie du Sud-Est.

mobiliers qui reflète sa forte implication dans les voies d'échanges, facilitée par sa situation géographique. KSK possède une organisation bien définie, en quartiers. Chaque quartier est lié à différents artisanats et/ou groupes ethniques avec notamment des preuves d'un artisanat du verre, lithique, de la céramique et de la métallurgie du cuivre/fer (P. Bouvet, 2012; L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 a; T. O. Pryce et al., 2017; T. O. Pryce et B. Bellina, 2017; P. Petchey et al., 2018). Les études ont également révélé la production locale de céramique avec un style dit *Sa Huynh-Kalanay* (A. Favereau, 2015; A. Favereau et B. Bellina, 2016) qui a déjà été évoqué. L'étude du mobilier a montré une culture hybride avec des artisanats locaux et des styles locaux, dont certains fabriqués à partir de techniques issues du sous-continent indien. Ce phénomène a notamment été observé pour des éléments en pierres dures, agate et cornaline (B. Bellina, 2001, 2014), montrant des compétences techniques élevées nécessaires à la fabrication de ces objets, originaires d'Inde, qui ont permis à Bérénice Bellina de proposer la présence d'artisans indiens à KSK. Ces artisans d'Asie du Sud semblent avoir adapté leur fabrication au répertoire stylistique d'Asie du Sud-Est afin de pourvoir la demande, et peut-être même transmis une part de leurs savoirs à des artisans locaux. Un des quartiers nord du site de KSK semble avoir regroupé des marchands étrangers, Han (Chine) et Indiens notamment, en atteste la découverte de seaux, ainsi que d'objets importés comme des miroirs Han ou des céramiques chinoises, venant ainsi renforcer le caractère cosmopolite de cette cité portuaire (B. Bellina, 2018 a).

Le site de Khao Sek (B. Bellina, 2018 a), de plus petites dimensions, possède la majeure part des caractéristiques précédemment décrites pour Khao Sam Kaeo, situé à 80 km au sud. Il s'agit d'un site côtier daté des IV-IIIèmes siècles av. J.-C. KS a livré des signes pour la production d'objets en pierre dure et quelques exemples d'une production métallurgique secondaire, dont les caractéristiques suggèrent des similarités stylistiques et techniques à celles de KSK (L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 a; B. Bellina, 2018 a). En revanche, contrairement à KSK, KS ne regroupe pas de preuves d'un contact nord-vietnamien ou chinois, seulement des signes de contact avec le sous-continent indien. Les différents éléments mis au jour laissent à penser que les deux sites étaient liés et impliquaient potentiellement la circulation des mêmes artisans et/ou techniques, ce qui expliquerait les similarités observées entre les deux sites. Bérénice Bellina propose également que le site de KS soit un site satellite de KSK (B. Bellina, 2018 a).

Depuis 2010, Bérénice Bellina s'est également intéressée aux sites situés à l'intérieur des terres, le long des réseaux fluviaux qui auraient permis la circulation des biens de la mer de Chine méridionale à la mer d'Andaman, tout en donnant accès à d'autres ressources. Pour les auteurs, la standardisation des industries et l'organisation perçue à KS et KSK s'expliqueraient par l'association de ces ports à une autorité hiérarchisée fonctionnant en alliance. Celle-ci aurait pour but le contrôle des ressources locales, dont l'étain qui est très abondant dans la péninsule, ainsi que des voies maritimes fournies par une situation géographique charnière. Les indices d'une exploitation et d'un contrôle des ressources en étain n'ont pas encore été

pleinement démontrés, hormis par l'identification d'un lingot en bronze riche en étain à KSK et la présence d'un creuset et de moules. Ces signes sont souvent difficiles à percevoir en l'absence d'un site de production et ils demeurent très probables (H. G. Bachmann, 1982). KS et KSK seraient des centres proto-urbains bâtis selon un modèle multicentré avec une autorité socio-politique, dont le centre (en l'occurrence ici KSK) est connecté aux périphéries principalement par des axes fluviaux et maritimes (B. Bellina, 2018 a; B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019). Cette organisation repose ainsi sur le modèle dendritique des échanges proposés par Bronson (1978) et le « Mandala » (Wolters, 1982), également appliqué pour *Srïvijaya* à Sumatra (P.-Y. Manguin, 2000) ou aux Philippines par Junker (1999). Il s'agit d'un modèle hiérarchique dans lequel un centre urbain portuaire variable situé en aval du fleuve (KSK) domine des arrière-pays avec différents centres secondaires, périphériques (dont KS), reliés à des bassins fluviaux.

L'organisation des sites de la péninsule Thaï-malaise en ferait l'une des premières formes d'autorité pré-étatique en Asie du Sud-Est, avec la mise en place d'une proto-cité-État portuaire centrale (KSK) cosmopolite, accueillant des artisans et marchands étrangers, ainsi que divers artisanats spécialisés pratiquant des techniques hybrides, et exerçant un contrôle sur les échanges maritimes/terrestres. Les sites de la péninsule Thaï-malaise sont pour l'instant un exemple à part entière de la mise en place de centres hiérarchisés durant la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C, car certaines autres régions ne connaissent pas les mêmes développements parallèlement.

C. Le delta du Mékong

Des textes chinois mentionnent la venue d'émissaires durant le IIIème siècle ap. J.-C (Y. Ishizawa, 1995) au royaume nommé *Fu nan*, situé dans le delta du Mékong au sud du Cambodge et du Vietnam actuels. L'étendue et la nature de ce royaume ne sont pas encore bien définies (Stark et Fehrenbach, 2019), mais l'emplacement de ces sites offre un accès privilégié aux réseaux maritimes ainsi qu'aux réseaux internes par le bassin fluvial du Mékong. *Fu nan* est perçue comme l'une des premières formes pré-étatiques de la région ayant adopté des idéologies et des pratiques inspirées d'Asie du Sud. Le royaume du *Fu nan* se manifeste archéologiquement par des peuplements entourés de murs et de fossés, des temples en briques, un système de canaux et un système d'écriture (basé sur la langue sanscrite issue du sous-continent indien) qui a livré une des plus anciennes traces d'écriture pour l'Asie du Sud-Est à Oc Eo (L. Malleret, 1959). Les cités du *Fu nan* étaient reliées entre elles par ce réseau de canaux (E. Bourdonneau, 2003). Les plus importantes sont Angkor Borei (M. T. Stark, 1998 a, 2003, 2006 a, 2015) et Oc Eo (L. Malleret, 1959; E. Bourdonneau, 2003; P.-Y. Manguin, 2004, 2009 a).

Angkor Borei a été étudié par le LOMAP (*Lower Mekong Archaeological Project*) depuis 1996 (M. T. Stark, 1998 a, 2003, 2006 a). Il s'étend sur 300 hectares avec les premiers signes

d'occupations vers 500-400 av. J.-C jusque durant la période angkorienne et de nos jours. Les découvertes archéologiques principales ont livré une architecture en brique, de la statuaire, des métaux précieux et autres ornements en pierre ou en verre ainsi qu'une des plus anciennes traces d'écriture khmère (M. T. Stark et B. Sovath, 2001). Angkor Borei est perçu comme une des capitales du *Fu nan*.

Oc Eo, situé à 70 km d'Angkor Borei, est perçu comme un entrepôt localisant des biens de différentes origines, d'Asie du Sud, d'Asie Centrale et même du monde méditerranéen (P.-Y. Manguin, 2004, 2009 a) sous la forme de perles en verre et en pierre, des bijoux en argent et en or, des monnaies ainsi que des céramiques, principalement Indiennes. Oc Eo s'étend sur environ 450 hectares et il est également entouré de fossés et de murs.

La présence de canaux aurait facilité les communications, également les échanges, entre les différents peuplements, mais aussi avec la côte puisque certaines données permettent de montrer que les cités du *Fu nan* avaient accès aux échanges de la mer de Chine méridionale (A. K. Carter et N. C. Kim, 2017). Le centre du *Fu nan* serait situé à l'intérieur des terres, au sud du Cambodge actuel où se trouve Angkor Borei (M. T. Stark, 2003). Les récentes études de mobilier, particulièrement les perles en verre/pierre et la céramique, des peuplements du delta du Mékong révèle également des connexions intra-régionales avec des sites situés à l'intérieur des terres, au nord du Cambodge et en Thaïlande, mais également avec l'Asie du Sud (A. K. Carter, 2015; M. T. Stark et S. Fehrenbach, 2019; A. K. Carter et al., 2020). Les données révèlent également la présence de différents réseaux parallèles. En effet, les assemblages de perles d'Angkor Borei et d'autres sites de l'intérieur des terres diffèrent des sites côtiers participants aux réseaux de la mer de Chine méridionale (A. K. Carter et al., 2020). L'étude de ces différents réseaux parallèles s'attache également à révéler la complexité des interactions entre les différentes communautés. Ces réseaux parallèles ne sont aujourd'hui connus que pour les perles en verre et en pierre dure. L'exploration d'autres matériaux, comme les métaux, pourrait également s'avérer enrichissante.

2. L'émergence des premières formes d'autorités socio-politiques

Une partie de l'âge du Fer est parfois aussi nommée protohistoire, ou période historique ancienne pour certaines régions, comme le delta du Mékong (M. T. Stark, 2015), car il voit la fondation des premières formes de complexifications socio-politiques. Comme nous venons de le voir, durant l'âge du Fer, les fondations des premières autorités politiques et sociales commencent à se faire percevoir sur les côtes et pour les bassins fluviaux de l'Asie du Sud-Est. Leur émergence peut être perçue comme un phénomène multilatéral où toutes les régions de l'Asie du Sud-Est ne connaissent pas les mêmes évolutions à la même période, dépendant fortement de leur situation géographique et des influences auxquelles elles sont soumises. En

effet, les premiers signes de leur établissement émergent parallèlement pour plusieurs zones géographiques entre la fin du premier millénaire av. J.-C et le milieu du premier millénaire ap. J.-C, principalement sur les côtes et dans les bassins fluviaux majeurs (N. C. Kim, 2013; M. T. Stark, 2015; B. Bellina, 2018 a). On peut nommer notamment le site fortifié de Co Loa (400/300-100 av. J.-C) au nord du Vietnam appartenant à la culture de *Dong son* (N. C. Kim, L. Van Toi, et T. H. Hiep, 2010; N. C. Kim, 2013), les sites de la culture *Sa Huynh* au centre du Vietnam qui ont donné naissance au *Linyi* et au *Champa* (IVème siècle ap. J.-C) dont Tra Kieu est la principale cité (I. C. Glover et M. Yamagata, 1995; M. Yamagata, 1997, 2007), les sites à fossés du plateau du Khorat comme Noen U-Loke ou Non Ban Jak, les sites liés au royaume du *Fu nan* (I-VIèmes siècles ap. J.-C) comme Oc Eo et Angkor Borei dans le delta du Mékong (E. Bourdonneau, 2003, 2005; M. T. Stark, 2003; P.-Y. Manguin, 2009 a), les premières « cités-Etats » (P.-Y. Manguin, 2000) de la péninsule Thaï-malaise (Figure 5), ou encore les sites monumentaux en briques des *Pyu* au Myanmar (P. Gutman et R. Hudson, 2004). Les exemples de Khao Sam Kaeo/Khao Sek (B. Bellina, 2018 a) et Angkor Borei/Oc Eo, évoqués juste avant, illustrent bien l'un des premiers exemples de ces premières formes pré-étatiques ainsi que la mise en place de proto-cités-États portuaires stimulées par le commerce maritime durant la seconde moitié du premier millénaire av. J.- C.

À la même période (≈400-300 av. J.-C), certaines communautés de l'intérieur des terres évoluent selon un modèle différent (B. Bronson, 1978) et demeurent visiblement dans l'âge du Fer. Elles profitent de la stimulation offerte par la mise en place de ces grands centres, notamment en demande de matières premières et pour l'acquisition de biens issus des échanges maritimes. À l'intérieur des terres pour certaines régions, la mise en place de sociétés centralisées et hiérarchisées semble globalement plus tardive (C. F. Higham, 2014, p.287). Pour certaines zones à l'intérieur des terres jouissantes d'un emplacement géographique favorable, un bassin fluvial par exemple, les prémices d'implantation des premières formes organisations socio-politiques se font percevoir plus tôt (deuxième moitié du premier millénaire av. J.-C) comme dans le delta du Mékong, notamment les sites d'Angkor Borei (M. T. Stark, 2003, 2015) et Oc Eo (L. Malleret, 1959; E. Bourdonneau, 2003; M. T. Stark, 2003, 2015; P.-Y. Manguin, 2009 a).

En premier lieu, l'émergence d'une complexification sociale et politique en Asie du Sud-Est était en partie expliquée par le phénomène « d'indianisation » (G. Coedès, 1975; I. W. Mabbett, 1977; J. Wisseman Christie, 1984, 1990; H. Kulke, 1990; P.-Y. Manguin, 2000; B. Bellina, 2014) avec des modèles d'influences socio-politiques et religieux issus de contacts avec le sous-continent indien. Aujourd'hui, les données mettent en avant le rôle joué par l'économie politique et les fondations culturelles locales déjà en place dans l'émergence de ces premières cités (pour ne citer que quelques exemples : Bellina, 2017; Benda, 1962; Kim,

2013; Smail, 1962; Stark, 2015). Le rôle joué par les caractéristiques socio-politiques déjà en place semble tout aussi fondamental. L'émergence d'une complexification sociale et politique en Asie du Sud-Est résulterait d'influences du sous-continent indien sur des entités déjà développées en Asie du Sud-Est. On parlerait alors davantage d'un phénomène de « localisation » (O. W. Wolters, 1982) du modèle indien :

> *"From this perspective, the phenomenon impacting MSEA in the later first millennium BC, generally referred to as 'acculturation' […], 'Sanskritization' […] or 'Indianization', may be more accurately defined as a phenomenon of 'localization'. This term refers to a dynamic cultural process in which elements of a distinct exotic culture are independently selected, elaborated upon and manipulated to fit the ideological needs of a receptive local culture. "* (F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013, p.149).

Les premiers états d'Asie du Sud-Est trouvent donc leurs origines pour des sites comme Khao Sam Kaeo/Khao Sek en Thaïlande, les sites de la culture *Sa Huynh* au Vietnam et du *Fu nan* dans le delta du Mékong, ainsi que Co Loa au nord du Vietman. Ces premières formes pré-étatiques profitent de l'augmentation des échanges de longues distances, de la demande en biens importés de prestige, d'un accès important aux champs cultivables, ainsi que du contrôle de ressources stratégiques comme le sel ou les minerais. Les communautés de l'intérieur des terres, par exemple dans la vallée du Mékong, vont alors être stimulées et profiter de cet accroissement des échanges maritimes et la mise en place des réseaux. En effet, certains territoires comme la chaine annamitique, principalement au Laos, sont riches en ressources et matières premières comme les minerais, dont les grands centres seraient en demande afin de pourvoir leurs besoins propres et les réseaux d'échanges.

Les ressources en or, abondantes en Asie du Sud-Est auraient également contribué aux développements des échanges avec les entités voisines de Chine et d'Inde qui auraient connaissance de la richesse de la région, d'où pourrait provenir son nom dans les textes indiens : *Suvarnabhumi* (*Terre de l'or ;* Bennett, 2009) pour le continent et *Suvarnadvipa* (*Iles de l'or* ; Manguin, 2000, p. 154) pour les iles d'Asie du Sud-Est. Les objets en or sont mentionnés dans les rapports archéologiques pour des contextes aux environs de 400 av. J.-C pour l'Asie du Sud-Est, parallèlement aux premières formes de contacts avec le sous-continent indien et l'arrivée de la métallurgie du fer (A. Bennett, 2009). Ces premiers objets se retrouvent principalement sous la forme de perle et également de feuille d'or, comme pour les sites de Giong Ca Vo (III-IIèmes sicèles av. J.-C, Vietnam) et Khao Sam Kaeo (IVème siècle av. J.-C-IIème siècle ap. J.-C). À la fin de l'âge du Fer, des concentrations plus importantes d'objets

en or sont mises en évidence, notamment à Prohear (A. Reinecke, V. Laychour, et S. Sonetra, 2009), ou à Oc Eo qui semble être un centre de production d'objets en or (L. Malleret, 1959).

On perçoit ici le rôle clé joué par l'accroissement des échanges durant l'âge du Fer qui permettent de renforcer les contacts de longue distance avec d'autres régions comme la Chine et le sous-continent indien, en permettant la circulation des biens, des cultures matérielles, des répertoires stylistiques, des techniques, d'artisans/communautés, mais également de modèles religieux, politiques et sociaux pour l'ensemble de l'Asie du Sud-Est qui ont ainsi participé au développement de sites de plus en plus hiérarchisés et organisés.

I.1.3 L'importance des interactions avec la Chine et l'Inde

Comme nous venons de le voir, les périodes Néolithique, de l'âge du Bronze et du Fer sont caractérisées par différentes transmissions technologiques et culturelles ayant notamment amené l'agriculture, les métallurgies du cuivre et du fer. Les deux premières traditions technologiques semblent trouver la même origine, sur le territoire de l'actuelle Chine. Il semble donc essentiel de présenter les principales caractéristiques historiques et évènements ayant lieu en Chine pour l'époque contemporaine à notre période d'étude, d'environs 1000 av. J.-C à 500 ap. J.-C. En plus de la Chine, l'Inde semble avoir également instauré une influence clé en Asie du Sud-Est à partir du milieu du premier millénaire av. J.-C, notamment par des échanges intensifiés de techniques, de styles, de matières premières et potentiellement d'artisans. Cette partie n'a pas pour objectif de faire une présentation exhaustive de l'histoire chinoise de cette époque, car cela n'est pas le propos, mais de décrire les évènements clés qui auraient pu avoir, d'une façon ou d'une autre, une influence en Asie du Sud-Est. Il s'agira également de discuter des différents éléments attestant d'échanges avec l'Inde à partir de 500 av. J.-C.

1. Le contexte en Chine durant le premier millénaire av. J.-C et au début du premier millénaire ap. J.-C (500)

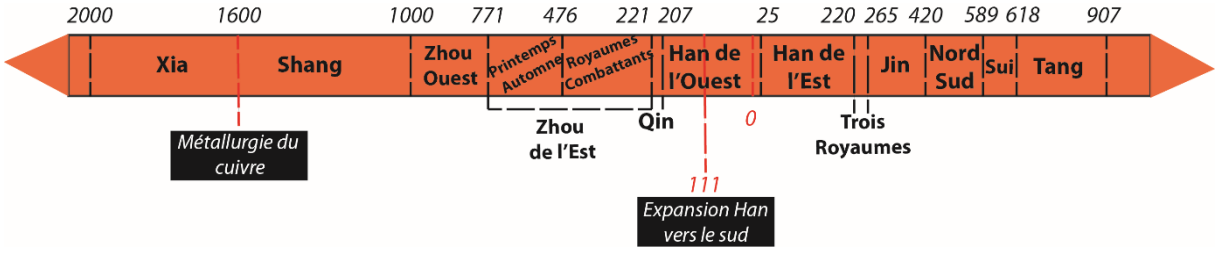


Figure 6 : Chronologie des dynasties chinoises, de la première, celle des Xia, jusqu'à celle des Tang au Xème siècle ap. J.-C.

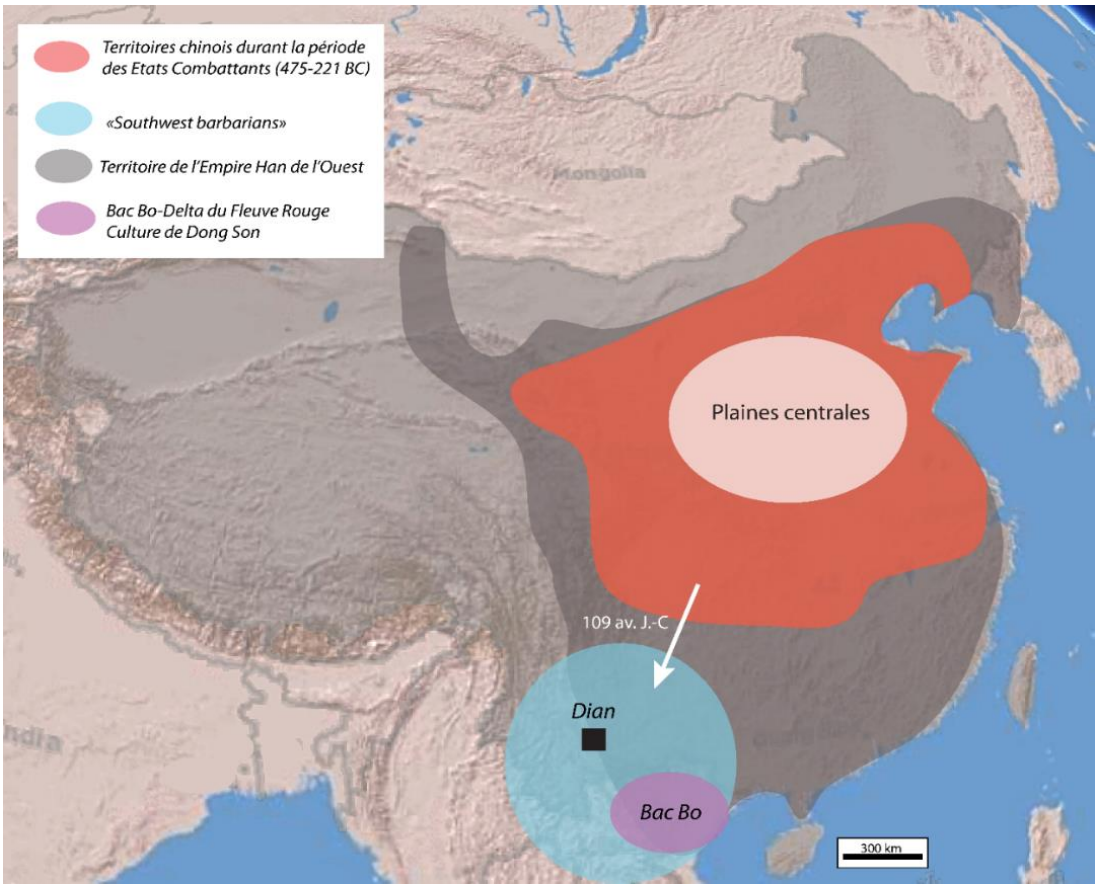


Figure 7 : Localisation du territoire de l'actuel PRC avec les différents territoires/cultures, empires mentionnés dans cette partie (crédit carte de base : ESRI).

A. Les plaines centrales : centre de l'Empire chinois

Les Plaines Centrales de la Chine situées en grande partie dans l'actuelle province du Henan, où coule le fleuve Jaune, est une région fertile ayant vu la naissance des premières formes d'agriculture, les premières dynasties chinoises et la métallurgie du cuivre/bronze et du fer (Figure 7). Durant l'âge du Bronze qui est divisé en trois grandes périodes, Erlitou (1900-1600 av. J.-C), Shang-Erligang (1600-1300 av. J.-C) et Shang-Yin (1300-1045 av. J.-C), la métallurgie du cuivre/bronze arrive des Steppes Eurasiennes dans les Plaines Centrales (K. M. Linduff, R. Han, et S. Sun, 2000; J. Mei, 2009; J. Mei et al., 2012) et donnera durant la période Shang l'apparition d'une technologie complexe. La période Shang est également considérée comme la première des grandes dynasties chinoises (si on met de côté la mythique dynastie des Xia). Les archéologues chinois étendent l'âge du Bronze jusqu'au début de l'époque des Royaumes Combattants (476-221 av. J.-C) ou même le début de la dynastie Qin (221 av. J.-C) avec le premier empereur et la mise en place d'un Empire chinois centralisé (Figure 6). Pourtant, le fer serait apparu dans la vallée du Yangtzé au début du premier millénaire av. J.-C (Falkenhausen, 2006, p. 3 ; He, 1983). En effet, avant l'établissement de la dynastie des Qin le territoire chinois était enclin à de fortes instabilités et fragmentations politiques, tout particulièrement durant l'époque des Zhou.

La Dynastie Han (207 av. J.-C – 220 ap. J.-C, qui succède à celle des Qin (221 – 207 av. J.-C), est l'une des dynasties chinoises majeures. En effet, la période des Han voit la naissance des fondations de la civilisation chinoise en termes d'administration centralisée et de monarchie impériale (L. Feng, 2014), notamment en étendant ses frontières à presque tout le territoire qu'on lui connait actuellement[10].

Les textes rédigés par les Chinois sont une source importante et précise d'informations sur les différents évènements de cette époque depuis l'apparition de l'écriture (1200-1000 av. J.-C) en Chine à la fin de la dynastie Shang (Boltz, 1986, 2000). Les textes de la dynastie Han, malgré un point de vue unilatéral (F. Allard, 2015) permettent notamment une immersion intéressante dans la mise en place d'un pouvoir centralisé aux vues expansionnistes de l'Empire chinois, à la fin du premier millénaire de notre ère, sur les territoires du sud, le Yunnan et le nord du Vietnam.

B. La périphérie et les « cultures barbares »

Le sud de la Chine

L'archéologie au sud du fleuve *Yangtze* a débuté ces trente dernières années et n'a pas reçu autant d'attention que les plaines centrales au nord (F. Rispoli, 2007, p.243; X. Wu et al., 2019). Durant le premier millénaire av. J.-C, en périphérie du cœur des dynasties chinoises centré sur les plaines centrales au nord, le sud de la Chine et notamment les actuelles provinces du Yunnan et du Guizhou, regroupe différentes communautés tribales décrites par les Han comme « barbares du sud-ouest » dans les textes (*southwest barbarians*, Allard, 2015 ; Yao, 2017). Ces communautés se seraient alors développées en marge des états chinois classiques et selon un modèle différent (F. Allard, 1998; A. Yao et al., 2020). Cette région montagneuse de Chine regroupe de vastes ressources minières, notamment de cuivre et d'étain, mais également d'argent et de plomb, qui en font une zone attractive, vraisemblablement exploitée dès la période Shang (1600-100 av. J.-C, W. Zhou et al., 2009 ; X. Fan et al., 2016 ; M. A. Pollard et al., 2017). La question du contrôle de ces matières premières reste sujette à débat. Les premières preuves historiques d'un contact direct entre les plaines centrales et les régions du sud de la Chine proviennent de rapports écrits de la Dynastie Qin durant le IIIème siècle av. J.-C (X. Wu et al., 2019). Il est également possible que les territoires du Yunnan n'aient pas eu de contacts directs avec les plaines centrales avant la conquête des Han, mais des contacts indirects (*down-the-line*), via les communautés du Sichuan par exemple, comme certains chercheurs l'ont suggéré (P. Chiang, 2008, p.97-98; X. Wu et al., 2019).

[10] Hormis les territoires de l'ouest, Mandchourie, Tibet et Taïwan qui ne seront conquis que sous les Ming au XVIIème siècle).

Parmi ces royaumes, *Dian* (Yunnan) est le plus important. Il apparaît dans les textes comme un des plus influents du IVème siècle av. J.-C à 109 av. J.-C. Mais il n'est pas le seul de ces royaumes barbares, nous pouvons également citer les sites associés à la culture de *Yelang* dans l'actuelle province de Guizhou. Les vues expansionnistes Han durant le IIème siècle av. J.-C vont progressivement mener à la conquête des territoires de *Dian* en 109 av. J.-C selon les archives chinoises de *Shiji* (F. Allard, 1998; A. Yao, 2017). Il semblerait que les expansions Han vers le sud aient eu en premier lieu le but d'établir des routes de commerces stables vers l'Asie du Sud et du Sud-Est afin d'importer et d'exporter des biens luxueux. La conquête Han des territoires du sud-ouest a également entraîné l'immigration de populations dans ces territoires pour des raisons multiples : le commerce, la mise en place d'une administration, l'établissement de peuplements ou une expansion de l'agriculture.

L'acculturation unilatérale des populations locales, la « sinisation », est en revanche moins évidente et serait au contraire un processus à long terme éclectique, malgré l'implantation de l'administration Han (P. Chiang, 2008; F. Allard, 2015; X. Wu et al., 2019). Les éléments de la culture matérielle Han/Chinoise étaient déjà connus dans la région du lac Dian avant la conquête, notamment dans les sépultures où ont été découverts des objets de style Han. Ils n'étaient pas nécessairement associés à des défunts Han, mais également à des locaux, et ce, avant comme après la conquête. Néanmoins, il a été montré que la conquête n'a pas fait disparaître la culture de *Dian* avant le Ier siècle ap. J.-C, période durant laquelle les assemblages funéraires deviennent à majorité de styles Han (F. Allard, 2015).

Le nord du Vietnam

Une seconde région a été influencée par les expansions Han à partir du IIème siècle av. J.-C. Il s'agit de la région de Bac Bo, du fleuve rouge au nord du Vietnam, où se situe durant l'âge du Fer la culture de *Dong son* (600 av. J.-C - 200 ap. J.-C), à l'origine de la fabrication de tambours à base de cuivre dit de *Dong son* dont nous reparlerons (Chapitre VIII). Antérieurement à la conquête Han, les découvertes archéologiques ont permis de montrer que le nord du Vietnam abrite durant l'âge du Fer, à partir de 300 av. J.-C, une des premières formes indigènes de complexité et de hiérarchisation socio-politiques d'Asie du Sud-Est, principalement représentées par le site de Co Loa (N. C. Kim, L. Van Toi, et T. H. Hiep, 2010; N. C. Kim, 2013). Co Loa s'étend sur environ 600 hectares et comprend différentes enceintes associées à des canaux et des fossés. Les fouilles archéologiques ont révélé une séquence continue de la période de Phung Nguyen (1600-1200 av. J.-C), Go Mun (1000-600 av. J. –C) et *Dong son* (600 av. J.-C – 200 ap. J.-C). Les remparts et fossés auraient été principalement érigés entre 400 av. J.-C et les premières années du premier millénaire de notre ère (N.C. Kim, L. Van Toi et T. H. Hiep, 2010) durant la période de *Dong son*. La mise en place de remparts et de fossés autour du site de Co Loa à partir de 400 av. J.-C a été perçue comme une potentielle réponse face à

la naissance de conflits et la matérialisation d'un contrôle et d'une gestion des ressources par les élites de *Dong son*.

Bien avant la conquête, la question des échanges et des contacts avec le sud de la Chine se pose pour le nord du Vietnam, bien plus que pour d'autres régions d'Asie du Sud-Est. En effet, les données archéologiques rendent compte d'échanges et de parallèle entre les cultures matérielles du nord du Vietnam et des régions de Lingnan et du Yunnan en Chine (Allard, 2014 ; Yao et al, 2010) qui s'intensifieront à partir de l'époque Han. Ce partage de culture matérielle est particulièrement bien représenté par les tambours à base de cuivre qui sont connus pour la culture de *Dong son* et de *Dian* au Yunnan (A. Calo, 2009, 2014). La situation au nord du Vietnam apparaît différente du restant de l'Asie du Sud-Est. La région de Bac Bo devient une commanderie Han et est intégrée dans l'empire avec la mise en place d'une administration chinoise durant le Ier siècle ap. J.-C (C. F. Higham, 2014). Le territoire de la culture de *Dong son* abrite alors trois commanderies Han : Jiuzhen, Jiaozhi (région du fleuve rouge) et Rinan (au nord de la province de Quang Nam où se trouve la culture *Sa Huynh*). Antérieurement, les relations d'échanges et de contacts avec la Chine et d'autres régions d'Asie du Sud-Est (M. T. Stark, 2006 b; N. C. Kim, L. Van Toi, et T. H. Hiep, 2010) auraient également stimulées une société hiérarchisée indigène déjà établie.

C. La production de cuivre en Chine : état des connaissances.

L'intégration de quelques réflexions autour de la métallurgie chinoise lors de ce travail de thèse apparaît tout particulièrement pertinente alors que le principal modèle de diffusion de la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale proviendrait de transferts technologiques depuis la Chine actuelle.

Vers le milieu/fin du IIIème millénaire av. J.-C, la métallurgie à base de cuivre voit le jour au nord-ouest de la Chine (C. F. Higham, 1996; K. M. Linduff, R. Han, et S. Sun, 2000; J. Mei, 2009; J. Mei et al., 2012). À la fin du IIIème et au début du IIème millénaire, deux principaux centres de métallurgie du cuivre/bronze y sont connus. Le premier associé à la culture de Qijia (2200-1900 av. J. -C) qui utilisait préférentiellement des objets à base de cuivre, le second à celle d'Erlitou (1900-1600 av. J. -C) qui employait des alliages ternaires (Cu-Sn-Pb), coulés dans des moules à pièces. La technique des moules à pièces atteint son apogée sous la Culture d'Erligang et au début de la Dynastie Shang (1600-1300 av. J. -C) avec l'apparition d'une tradition métallurgique très sophistiquée à l'origine de nombreux objets cérémoniels, principalement des vaisselles (Ciarla, 2007).

Depuis une vingtaine d'années, les recherches paléométallurgiques en Chine ont progressivement évolué de l'étude systématique des objets sophistiqués datant des premières dynasties chinoises (en particulier des alliages) et des origines de la métallurgie,

vers des recherches davantage orientées vers des problématiques de production, de provenance et d'acheminement des matières premières vers les grands centres des plaines centrales et des régions périphériques comme le Yunnan-Guizhou (E. Chernykh, 2009; D. Larreina-García, 2017; G. Zou et al., 2019; R. Liu et al., 2019). Les données mettent maintenant en avant l'aspect multicentré des productions et des réseaux d'échanges de cuivre, plus simplement basé sur un modèle centre-périphérie des Plaines Centrales (K. Chen et al., 2016). Malgré cet intérêt, les recherches en sont à leur commencement et certaines régions dans ce vaste territoire de 9 millions de km^2 sont encore peu connues, comme c'est le cas notamment du Yunnan au sud.

À ce jour très peu de mines anciennes et de sites de productions primaires ont été étudiés en Chine comparée à l'importance de la production métallique perçue au travers des objets finis (J. Mei, K. Chen, et W. Cao, 2009). Quelques sites anciens commencent à être étudiés suivant des approches paléométallurgiques afin de reconstituer les différentes activités de productions, mais les données demeurent encore trop faibles afin d'avoir accès aux différentes traditions techniques, ainsi qu'à leurs évolutions (Y. Li et H. Wang, 1983; Z. Zhang, 2000; D. Larreina-García, 2017; G. Zou et al., 2019). De plus, beaucoup de références sont en mandarin et pour la plupart inaccessibles (rapports de fouilles, rapports non publiés, journaux locaux, etc.).

Pour les mines et sites de réduction primaire en Chine nous pouvons mentionner le site de *Tonglüshan*, dans la province de Hubei, qui est le plus connu et le plus étudié des sites miniers chinois anciens (K. Reinhardt, 1997; D. Larreina-García, 2017). Il aurait été actif à partir de la Dynastie des Zhou de l'Ouest et potentiellement dès l'époque Shang, mais les datations absolues manquent. *Tonglüshan* est un site minier avec des puits de mine, mais également des signes d'extraction à ciel ouvert (P. J. Golas, 1999), autour duquel plusieurs zones de réduction ont été identifiées. Ensuite, on trouve la mention de beaucoup d'autres sites miniers fouillés, comme le site de la mine de *Tongling* à *Ruichang* ainsi que *Tongguanshan* à *Tongling* également (P. J. Golas, 1999, p.79-80; J. Hua, 2015) ou la région de *Anqing* à *Maanshan,* explorée dans les années 1980. Le site minier de *Tongling* couvre une surface d'environ 4000-5000 m^2 composé d'une extraction souterraine avec des puits de mine, supposés avoir été actif dès le milieu de la période Shang (1700-1450 av. J.-C) jusqu'à la période des Royaumes Combattants (J. Hua, 1994; P. J. Golas, 1999, p.79). La mine a été exploitée pour ses riches dépôts d'oxydes de cuivre (malachite et azurite). Le site minier et de réduction de *Tongguansha*n a été fouillé dans les années 1950, mais beaucoup de restes archéologiques ont été détruits. Il semble également contenir une concentration de sites miniers et de réduction avec des puits de mine et des fours qui ont été fouillés, mais dont on a peu d'informations.

Les sites anciens liés à la métallurgie du cuivre sont également connus pour le sud de la Chine, associés à la culture de Dian : *Wangjiadun* (Y. Li et H. Wang, 1983), *Citongguan*, *Hejiashan* (Z. Zhang, 2000, p.49), et *Yubeidi* (F. Yang, 2016). Un site de production de cuivre/bronze potentiel a été observé à environ 10 km de la mine Han de *Jiudingshan*. Un petit nombre de scories et des objets à base de cuivre du site de *Guangfentou* daté grâce au mobilier archéologique de la période Zhou à celle des Han ont récemment été analysés en laboratoire (G. Zou et al., 2019) montrant la pratique de la réduction, de l'affinage et de l'alliage. La signature isotopique obtenue pour dix échantillons de ce site est très dispersée, mais offre des données comparatives pour la région du Yunnan.

Enfin, on peut noter l'accroissement de l'application des analyses isotopiques du plomb à l'étude des objets à base de cuivre chinois depuis les années 1980 (W. Zhou et al., 2009; D. Mu et al., 2014; X. Fan et al., 2016; M. A. Pollard et al., 2017; Y. Z. Zhangsun et al., 2017). Ces études ont permis d'amorcer les premières réflexions sur l'exploitation et l'acheminement des matières premières pour la production des objets. Elles ont également permis la caractérisation de sources de plomb fortement radiogéniques identifiée pour des bronzes Shang dans la province du Henan, ainsi que pour des bronzes du Sichuan (*Sanxingdui* et *Jinsha*). La création d'une base de données sur des minerais modernes, de galène et de feldspaths potassiques, a même été initiée (Y. K. Hsu et B. J. Sabatini, 2019) et permettra d'enrichir les recherches sur les sources et la circulation des matières premières du cuivre dans la Chine ancienne. Ces données apporteront également une dimension d'informations intéressantes pour les recherches en Asie du Sud-Est.

2. Période historique ancienne indienne et la baie du Bengale (500 av. J.-C/200 ap. J.-C)

Historiquement, la baie du Bengale est un espace maritime dynamique de l'Océan indien (A. Datta, 1998; S. Gupta, 2007) possédant des liens intensifiés avec l'Asie du Sud-Est (B. Bellina, 2014 ; B. Bellina, 2007 ; B. Bellina, 2003) et le monde méditerranéen dès la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. Avant l'établissement de l'Empire Maurya (321-185 av. J.-C) qui couvrira la majeure partie du sous-continent indien, son territoire était morcelé en plusieurs royaumes, particulièrement dans la partie nord du sous-continent, et le redeviendra à la suite de la chute de l'Empire Maurya. Pour la période de 500 av. J.-C à 200 ap. J.-C, le sous-continent indien est donc le témoin de la naissance de plusieurs royaumes rivaux comme le Chera ou le Pandya, basés sur un système de castes avec pour langue le Sanskrit et la mise en place des religions bouddhiste et du brahmanisme. Les premières formes d'urbanisation du sous-continent indien naissent dans la vallée de l'Indus au Pakistan actuel, accompagné d'une intensification des échanges qui fait émerger un répertoire commun de céramique, de motifs et de formes. Aux alentours de 1900 av. J.-C, la civilisation de l'Indus décline et une seconde

va se développer autour de la vallée du Gange (R. Coningham et R. Young, 2015). Le développement de l'urbanisation et de la hiérarchisation dans la vallée du Gange va mener à celui des routes commerciales et des contacts avec les côtes et les voies maritimes pour l'aquisition de denrées, notamment avec le Deccan (H. P. Ray, 1989).

Au cours de ce qui est nommé période historique ancienne (« *Early Historic Period »)*, du IIIème siècle av. J.-C au IVème siècle ap. J.-C, des sites complexes de l'âge du Fer avec des fossés et des remparts, similaires à ceux de la vallée du Gange au nord, font leur apparition sur les côtes est du sous-continent indien. Ces cités ne présentent pas d'unité politique, mais partagent des liens sociaux et économiques (M. L. Smith, 2006). Les signes d'un contact avec le monde méditerranéen à la fin du premier millénaire av. J.-C ont également été découverts sur la côte sud-est du sous-continent, notamment à Arikamedu (V. Begley, 1996; H. P. Ray, 2014). Ces découvertes regroupent des amphores, des céramiques, des seaux ou encore des pièces de monnaie. Le sous-continent indien est alors très actif dans les réseaux d'échanges maritimes (H. P. Ray, 1991), mais également terrestres qui permettent l'échange de biens, mais également la circulation culturelle, sociale, religieuse (Bouddhisme), technologique, etc. vers d'autres régions, notamment l'Asie du Sud-Est. Des ports majeurs s'y développent durant la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C avec la mise en place de guildes, comme le fameux site d'Arikamedu (R. E. Wheeler, K. Deva, et A. Ghosh, 1946; V. Begley, 1996; A. Datta, 1998) sur la côte de Tamil Nadu au sud de la péninsule (Figure 8) ou encore le site de Mantai au Sri Lanka actuel (V. Shinde, 1987). La côte est semble alors appartenir aux mêmes réseaux. Un autre élément marquant est la présence de différentes guildes, connues au travers des textes, impactant les échanges et possédant une influence financière et sociale avérée (H. P. Ray, 1986). Il semblerait que ces voies commerciales n'étaient pas dirigées par une entité politique mais par les guildes et les marchants.

En Asie du Sud-Est, l'influence du sous-continent indien sur la métallurgie locale se fait particulièrement percevoir par la présence de bols en bronze à forte teneur en étain qui représentent un des premiers signes d'interaction avec l'Asie du Sud. Nous avons également mentionné que la métallurgie du fer pourrait être arrivée en Asie du Sud-Est par des contacts avec l'Asie du Sud. Les bols à haute teneur en étain avec une couleur dorée sont ornés de motifs issus de répertoires décoratifs indiens. Les premiers bols riches en étain découvert en Asie du Sud-Est proviennent de contextes datés du IVème siècle à Ban Don Ta Phet en Thaïlande (W. Rajpitak, 1983; A. Bennett et I. C. Glover, 1992). D'autres bols riches en étain de forme similaire ont été découverts à Khao Sam Kaeo, Ongbah, Pak Beung en Thaïlande ou encore au Cambodge à Prohear (A. Reinecke, V. Laychour, et S. Sonetra, 2009) ainsi qu'au nord du Vietnam dans des tombes de *Dong son* et au centre pour des sépultures de la culture *Sa Huynh* (I. C. Glover et A. Bennett, 2012). Un corpus de quarante vaisselles à haute teneur en étain

d'Asie du Sud-Est a été étudié (W. Rajpitak, 1983), révélant des teneurs au-delà de 20 %mass. d'étain. Les vaisselles ont des parois très fines suggérant un travail postérieur à l'opération de fonderie (travail à chaud, trempe et recuit variables). L'alliage utilisait rend pourtant le travail du métal très difficile, ce qui démontre alors un savoir-faire élevé de la part des artisans à l'origine de leur fabrication et donc un transfert de technologie par des artisans expérimentés. Un petit nombre de vaisselles avec cet alliage ont été recensées par Rajpitak et Seeley (1979) en Asie du Sud à Adichanallur, Coimbatore et Taxila ainsi qu'au sud de l'Inde pour la période contemporaine dans le Kerala (S. Srinivasan et I. C. Glover, 1995). Un site de production de bronze riche en étain est également connu à Tilpi à l'ouest du Bengale (P. K. Datta, P. K. Chattopadhyay, et P. Ray, 2007; P. Chattopadhyay, P. K. Datta, et T. O. Pryce, 2013) qui a livré des céramiques techniques proches de celles découvertes à Khao Sam Kaeo (T. O. Pryce et al., 2017) pour lequel une production de bronze riche en étain est également supposée. Les plus anciens contextes du sous-continent indien où ce type de bol est répertorié sont datés du premier millénaire av. J.-C (S. Srinivasan et I. C. Glover, 1995; S. Srinivasan, 2010). L'origine de cette technique a parfois été perçue comme indigène à l'Asie du Sud-Est à cause de ses vastes dépôts d'étain (W. Rajpitak et N. Seeley, 1979), mais il semblerait que cette tradition technique puisse être originaire du sous-continent indien (S. Srinivasan, 2010). Les matières premières utilisaient pour la fabrication de ces objets semblent montrer des origines variées (S. Srinivasan et I. C. Glover, 1995). De plus, la présence d'artisans indiens et un transfert de technologie a déjà été évoqué pour les ornements en pierre dures dans la péninsule Thaï-Malaise (B. Bellina, 2007 ; B. Bellina, 2014).

3. Natures des interactions avec l'Asie du Sud-Est

Les entités socio-politiques présentes en Chine et dans le sous-continent indien à la fin de la période préhistorique sud-est asiatique (à partir de 500 av. J.-C et plus particulièrement au début du premier millénaire) ont fortement interagi avec les communautés d'Asie du Sud-Est, par la circulation de biens, mais également de technologies, de modèles religieux et socio-politiques, plus particulièrement pour l'Inde. Durant la période Néolithique et l'âge du Bronze, les contacts avec la Chine, même indirects, semblent plus marqués en Asie du Sud-Est avec l'arrivée des premières formes d'agricultures/élevages et de la métallurgie du cuivre. En effet, avant 500 av. J.-C, les traces découvertes d'un contact avec l'Inde sont encore minces, quelques signes se retrouvent tout de même pour la péninsule Thaï-malaise. Les contacts sont ensuite croissants, et deviennent plus intenses, à partir du milieu du premier millénaire av. J.-C (P. S. Bellwood, 1992; I. C. Glover, 1996; L. Dussubieux et al., 2012; B. Bellina, 2014, 2018 a; I. C. Glover et B. Bellina, 2018). Ces contacts/échanges se font de manière progressive et se perçoivent dans un premier temps par la découverte d'objets locaux inspirés de la culture matérielle indienne, en Thaïlande, tout particulièrement pour les sites de Khao Sam Kaeo ou

Ban Don Tha Pet (I. C. Glover, 1990; B. Bellina, 2003, 2018 a; I. C. Glover et B. Bellina, 2018) et sur les côtes du Vietnam (I. C. Glover et M. Yamagata, 1995). Par la suite, vers le début du premier millénaire ap. J.-C, le modèle indien semble avoir participé à la création d'entités politiques et sociales en Asie du Sud-Est, comme le royaume du *Champa* au centre du Vietnam, *Chenla* au Cambodge, *Dvaravati* dans la région de Lopburi en Thaïlande, ou encore le royaume *Pyu* au Myanmar, selon un modèle parfois nommé « indianisation » ou encore « localisation » (O. W. Wolters, 1982; J. Wisseman Christie, 1984, 1990) comme nous l'avons vu. L'influence religieuse et politique de l'Inde se ressent dans l'émergence de ces entités en Asie du Sud-Est sans que ces états ne soient pour autant intégrés à l'Inde (P. Wheatley, 1979; O. W. Wolters, 1982; J. D. Legge, 1992). L'Inde semble ici servir de modèle à l'émergence des états, selon un schéma d'appropriation et de sélection par les communautés locales d'Asie du Sud-Est déjà établies. En effet, l'Inde semble bâtie selon un modèle multicentre (M. L. Smith, 2006), contrairement à la Chine qui se développe selon un centre unique avec des vues expansionnistes. La Chine va alors exercer un plein contrôle sur les territoires conquis du sud de la Chine et au nord du Vietnam, qui sont intégrés en tant que commanderies à l'Empire des Han à partir de la fin du premier millénaire av. J.-C. Ces expansions Han vers le sud semblent être motivées par des raisons commerciales afin d'avoir accès aux réseaux maritimes vers l'Asie du Sud. L'implication des Han dans les réseaux de la mer de Chine à la fin de la période préhistorique demeure peu connue. Certains types d'objets de la culture matérielle chinoise se retrouvent pour des sites d'Asie du Sud-Est, particulièrement au Vietnam, sous la forme de miroirs à base de cuivre, de vaisselles ou encore de céramiques (M. Yamagata, D. Manh Pham, et B. Chi Hoang, 2001; M. Yamagata, 2007). Le site de Khao Sam Kaeo dans la péninsule Thaï-malaise a également mené à de telles découvertes et constitue un des corpus les plus importants de biens attestant d'échanges avec la Chine en dehors du Vietnam (S. Peronnet et S. Srikanlaya, 2017). Le modèle politique chinois, développé à partir d'un centre unique d'autorité centralisée avec des vues expansionnistes, aurait alors moins influencé la création des premiers états d'Asie du Sud-Est. Le nord de l'Asie du Sud-Est était alors davantage soumis à l'influence chinoise de par sa proximité géographique (Allard, 1998; Ciarla, 1988). La nature et l'extension des influences Han/Chinoises en Asie du Sud-Est ne sont pas encore pleinement appréhendées, même au centre et au sud du Vietnam.

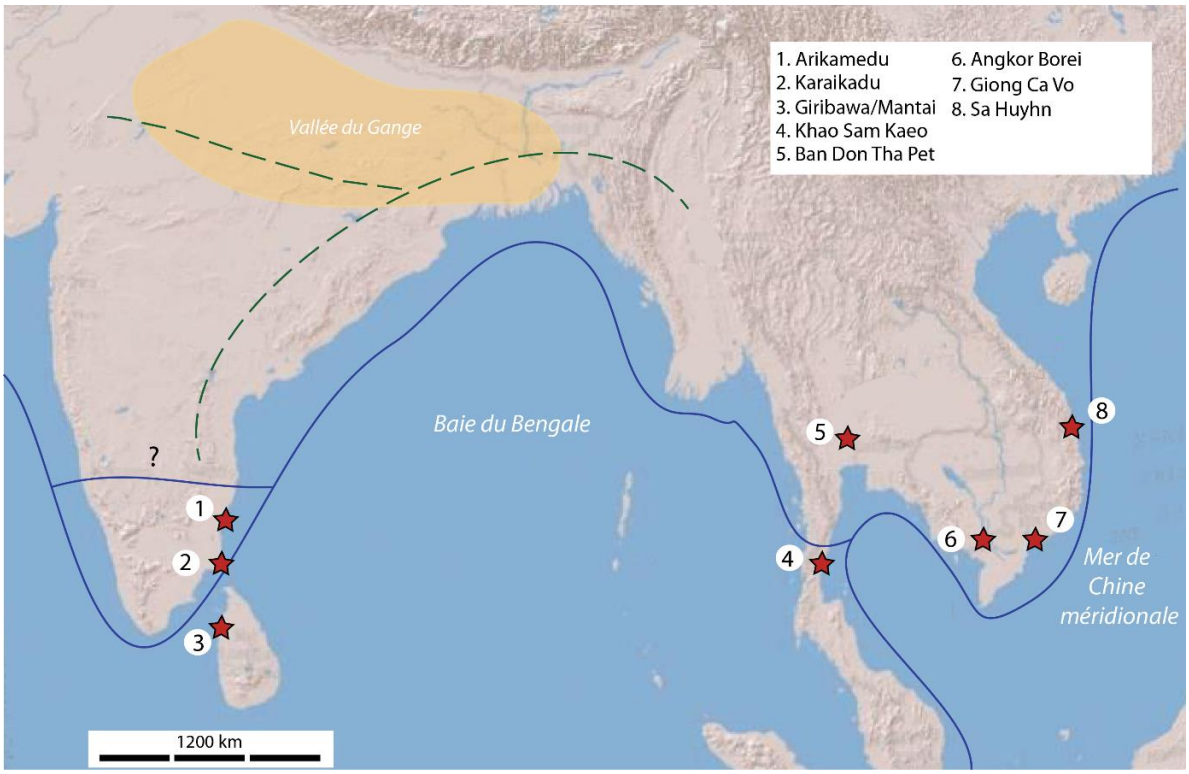


Figure 8 : Réseaux d'échanges entre l'Asie du Sud-Est et le sous-continent indien avec la localisation des principaux sites archéologiques évoqués (crédit carte de base : ESRI).

Les contacts avec l'Asie du Sud se distinguent par deux périodes. Une première période (400 av. J.-C-100 ap. J.-C) caractérisée par la présence d'objets produits localement inspirés de la culture matérielle avec des techniques indiennes ainsi que de matières premières en Asie du Sud-Est. Une seconde (100-300 ap. J.-C) qui se caractérise par des échanges intensifiés avec l'Asie du Sud, par des objets, mais plus encore avec la circulation de culture matérielle, religieuse, socio-politique et toujours une transmission technologique avec la fabrication d'objets hybrides. Les biens définis comme non régionaux ne sont pas nécessairement importés, mais beaucoup d'entre eux sont produits localement selon des styles et des techniques importées et hybrides. Pour illustration, les céramiques aux lustres noirs et rouges découvertes à Khao Sam Kaeo seraient issues de techniques et de formes indiennes et Sud-est asiatiques (P. Bouvet, 2017). Ces deux périodes d'échanges ont notamment été mises en évidence par l'étude des ornements en pierres dures et en verre (B. Bellina, 2001, 2003; A. K. Carter, 2015). En effet, au début du premier millénaire ap. J.-C, plusieurs régions d'Asie du Sud-Est adoptent des idéologies religieuses et politiques indiennes (B. Bellina et I. C. Glover, 2004; B. Bellina, 2014; A. K. Carter, 2015). Le processus d'« indianisation » est alors fortement relié à l'expansion des réseaux d'échanges.

Les poteries de type *Rouletted Ware* originaire de la vallée du Gange et dont certains centres de productions se retrouvent également sur la côte est, comme Arikamedu, illustrent également les contacts avec le continent et les iles de l'Asie du Sud-Est (Figure 8) au tournant

des premiers millénaires avant et après J.-C, puisqu'on les retrouve jusqu'à Bali et Tra Kieu au centre du Vietnam (I. W. Ardika et P. S. Bellwood, 1991; I. W. Ardika et al., 1993; P. Bouvet, 2012). D'autres biens hybrides inspirés de l'artisanat indien se retrouvent largement dans des contextes sud-est asiatiques à partir de 500 av. J.-C :

– Des perles en pierres semi-précieuses (agate et cornaline), par exemple à Ban Don Tha Phet au centre de la Thaïlande, dans la péninsule Thaï-malaise ou encore pour les sites de la culture *Sa Huynh* au centre du Vietnam (I. C. Glover, 1996; B. Bellina, 2001, 2007, 2014; B. Bellina et I. C. Glover, 2004) ;

– Du verre, notamment les perles nommées *Indo-Pacifique* (I. C. Glover et J. Henderson, 1995; L. Dussubieux et B. Gratuze, 2003; L. Dussubieux et al., 2012; A. K. Carter, 2016; L. Dussubieux et T. O. Pryce, 2016), dont l'apparition en Asie du Sud-Est semble suivre celle du fer au milieu du premier millénaire av. J.-C, en premier lieu dans la péninsule Thaï-malaise ;

– Des bols en bronze à forte teneur en étain avec des décors inspirés des répertoires d'Asie du Sud (W. Rajpitak et N. Seeley, 1979; M. Murillo-Barroso et al., 2010; I. C. Glover et A. Bennett, 2012).

Les objets ne sont pas seulement importés du sous-continent, mais inspirent également l'artisanat sud-est asiatique local. Pour certains contextes, il a également été montré que des technologies indiennes étaient employées sur place en Asie du Sud-Est, vraisemblablement transmises par des artisans indiens, pour une demande locale (B. Bellina, 2001, 2007).

I.1.4. Recherches archéologiques au Laos

Le territoire du Laos actuel est enclavé (Figure 9), partageant des frontières avec la Chine et le Myanmar, au nord, le Vietnam à l'est, le Cambodge au sud et la Thaïlande à l'ouest. Il se compose principalement d'un territoire montagneux avec quelques plaines, comme celles de Vientiane ou Savannakhet. Le Laos est lié au fleuve Mékong qui traverse le pays dans sa quasi-totalité, du nord au sud. Le pays possède donc un axe de communication majeur et se situe à la convergence de plusieurs territoires. De plus, comme nous le verrons aux Chapitres II et VIII, le Laos est riche en ressources minérales, ce qui en fait également un territoire attractif pour les extractions minières, depuis l'ouverture de son territoire à des investissements étrangers dans les années 1990 (É. Mottet, 2013).

Les recherches archéologiques au Laos ont longtemps été rendues difficiles par les conflits et les régimes politiques au cours du XXème siècle. Elles avaient pu être initiées par les Français durant la colonisation au début du XXème siècle. Progressivement, à partir de la création de la République démocratique populaire lao (*Lao People's Democratic Republic*, Lao PDR) dans les années 1970, le Laos ouvre ses portes et permet le développement des recherches

scientifiques. Les connaissances archéologiques sur le pays sont principalement centrées sur la période historique, à partir du Royaume de Lān Xāng (naissance au XIVème siècle ap. J.-C), mais comme Michel Lorrillard, spécialiste de la période historique le mentionne :

> « *Concerning the period prior to the emergence of the Lao kingdom of Lān Xāng (fourteenth century AD), the country still appears as a large blank spot on the published historical maps where only the site of Wat Phu is sometimes mentioned* » (M. Lorrillard, 2014, p.188)

Michel Lorillard souligne alors l'importance de remplir ce blanc afin de mieux appréhender l'histoire de la région dans sa globalité :

> « *This observation does not only affect the history of Laos itself; the damage caused by the lack of documented research also severely impacts the overall vision and the degree of knowledge that we can achieve when dealing with regional history. As long as we ignore this territory, in spite of it being geographically located at the crossroads of the great civilisational currents of Southeast Asia, many key questions cannot be satisfactorily addressed*. »

Les sites de Vat Phu dans la Province de Champassak au sud (Figure 9) sont connus pour avoir été intégrés dans l'Empire khmer (802-1431), reliés à Angkor par une voie de communication de près de 100 km (M. Hendrickson, 2010, 2011). Les vestiges du site de Vat Phu suggèreraient une période d'activité du Vème au XIIIème sur toute la durée de l'ancienne histoire khmère (M. Santoni et C. Hawixbrock, 1998; M. Santoni, C. Hawixbrock, et V. Souksavatdy, 2008). Le site se compose principalement d'un complexe monumental religieux de style khmer classique et d'une ville de période préankgorienne (VIème-VIIème siècles) située près d'une montagne sacrée. Vat Phu, connu depuis le XIXème siècle, a fait l'objet de recherches intenses (H. Parmentier, 1914; M. Santoni et C. Hawixbrock, 1998; M. Santoni, C. Hawixbrock, et V. Souksavatdy, 2008; M. Lorrillard, 2011). Vat Phu aurait pu jouer une place prépondérante dans l'Empire khmer avant que sa capitale ne soit installée à Angkor. Le site se situe à la confluence de plusieurs voies de communication qui en font un point central. Depuis quelques années, les recherches au Laos s'éloignent quelque peu du site phare de Vat Phu pour tenter de comprendre l'organisation et l'expansion de l'influence khmère, mais également Môn (thaï) sur le territoire lao dans les régions du centre.

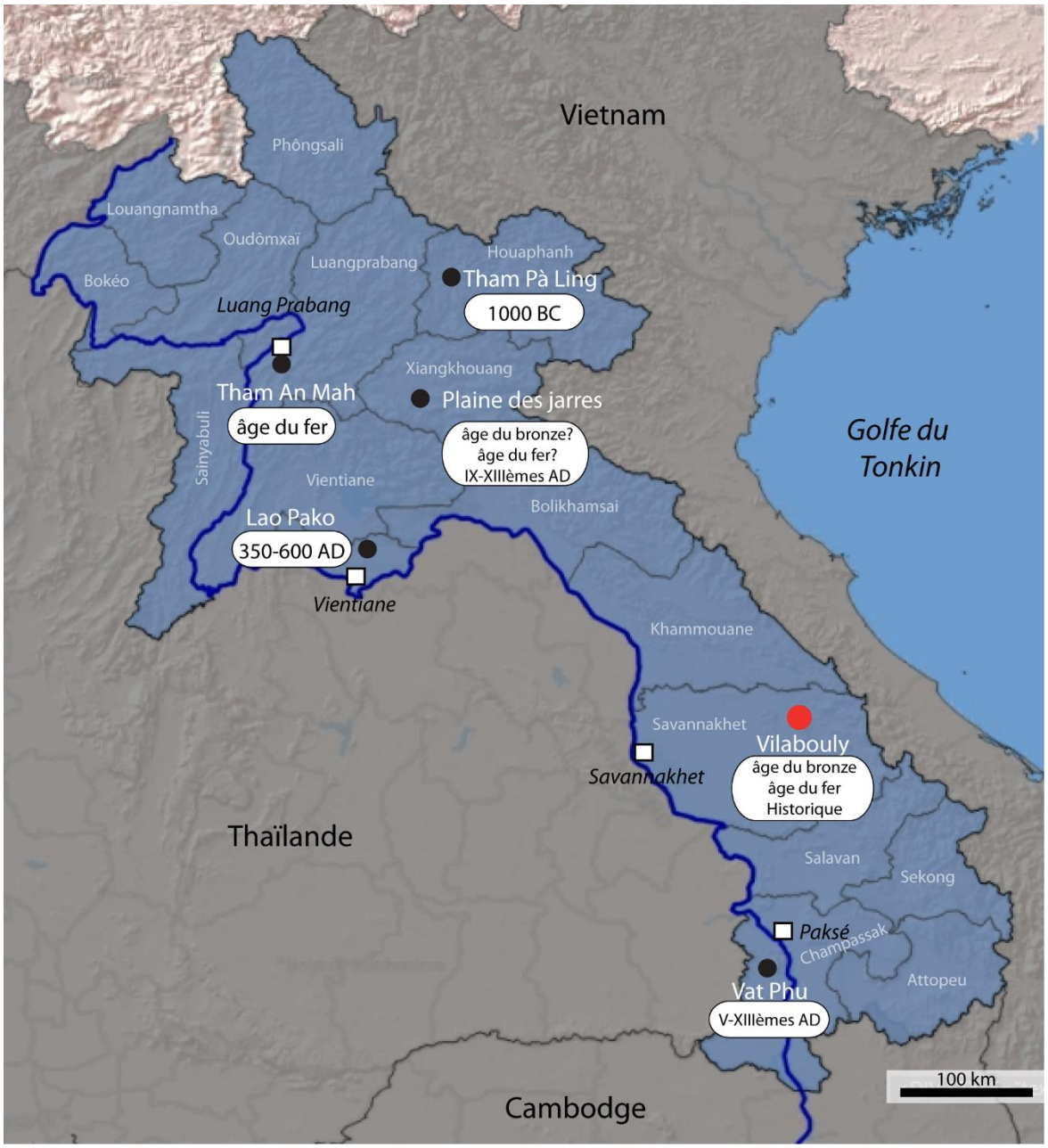


Figure 9 : Localisation des différents sites archéologiques mentionnés dans le texte (crédit carte de base : ESRI).

Bien que de plus amples recherches soient encore nécessaires, les études récentes de sites de la période préangkorienne et angkorienne ont permis d'aborder le territoire du Laos avant l'établissement du Royaume de Lān Xāng au XIVème siècle. Cependant, lorsqu'on aborde la question des périodes plus anciennes (âge du Bronze et âge du Fer), les manques sont encore plus grands. En effet, très peu de sites de ces époques ne sont actuellement connus au Laos.

Nous pouvons mentionner le célèbre site de la Plaine des Jarres dans la Province de Xieng Khouang au nord (Figure 9), classé au patrimoine mondial de l'UNESCO, étudié pour la première fois par Madeleine Colani dans les années 1930 (M. Colani, 1935). Les sites de la Plaine des Jarres ont été nommés ainsi, car ils se composent de jarres en pierre, creuses, larges

et oblongues de dimensions variables, dont la fonction reste encore incertaine. Jusqu'à maintenant, environ 118 sites avec jarres mégalithiques ont été répertoriés. La zone fait toujours l'objet de recherches, notamment par un actuel projet Lao-Australien (D. O'Reilly et al., 2019) ayant précisément pour but d'étoffer les connaissances sur la nature des dépôts archéologiques associés aux jarres. Les sites de la Plaine des Jarres sont clairement associés à des rituels mortuaires, avec des inhumations en jarres notamment, avec une activité semblant principalement se situer entre le Xème et le XIIIème siècle de notre ère pour les zones fouillées (D. O'Reilly et al., 2019, p.983-984). D'autres datations récentes obtenues par radiocarbone et OSL semblent montrer une période d'activité entre 700/900 et 1200 ap. J.-C, avec quelques dates de l'âge du Bronze pour une zone (L. Shewan et al., 2021). Hormis ces datations, les signes (culture matérielle) de cette occupation ancienne durant l'âge du Bronze sont encore manquants. Ces sites ont souvent été datés de l'âge du Fer, par l'observation des mobiliers associés aux jarres (T. Sayavongkhamdy et P. S. Bellwood, 2000; C. F. Higham, 2002; D. J. W. O'Reilly et L. Shewan, 2019; D. O'Reilly et al., 2019), notamment par Madeleine Colani. Le mobilier découvert se compose d'objets en pierre, de poteries, d'objets cuivreux (bracelets, cloches, spirales) d'objets en fer, de verre (présents pour des contextes à partir de l'âge du Fer en Asie du Sud-Est), de perles en néphrite et en cornaline, ainsi que de restes humains. La période d'activité des sites de la Plaine des Jarres reste donc encore assez floue. En se basant sur la découverte de certaines poteries et perles, Colani (1940) suggère que les sites de la Plaine de Jarres aient pu avoir un lien avec la culture *Sa Huynh* au Vietnam central. Une culture qui pratiquait l'inhumation en jarre et la crémation à la fin de la période préhistorique comme nous l'avons vu précédemment.

D'autres sites vraisemblablement associés au complexe de la Plaine des Jarres ont également été identifiés dans les environs de Luang Prabang (Figure 9), dans la province du même nom. Ces sites, tous en grottes, ont été découverts lors de prospections du MMAP (*Middle Mekong Archaeology Project*) en association avec le Département d'Héritage culturel lao (Lewis et al., 2015; White et al., 2009; White et Bouasisengpaseuth, 2008) avec pour but d'amorcer des recherches sur les peuplements anciens de cette région, dont la géographie en fait une potentielle voie de circulation. Quatre grottes ont ainsi pu commencer à être fouillées : l'abri de Phou Phaa Khao, la grotte de Tham Vang Ta Leow, l'abri de Tham Sua et la grotte de Tham An Mah. La grotte de Tham An Mah a permis la découverte de jarres céramiques inhumées. L'une de ces jarres contenait trois crânes humains et squelette partiels. Le site de Tham An Mah comprend des restes humain et animal, des coquillages, des charbons de bois, des poteries, des objets lithiques et quelques objets en fer. Le site a été associé à une activité de l'âge du Fer, datation issue de l'étude du mobilier, en l'absence, pour l'instant, de datation absolue. De plus, deux autres sites fouillés durant ce projet, Phou Phaa Khao et Tham Sua ont

livré des datations de l'âge du Fer (J. C. White et al., 2009). Le mobilier découvert à Tham An Mah amène également les chercheurs à faire un rapprochement avec les sites de la Plaine des Jarres.

Un des seuls autres sites connus et fouillés de la fin de la période préhistorique au Laos est le site de Lao Pako. Lao Pako est proche de la rivière Nam Ngum dans la Plaine de Vientiane, à 40 km de Vientiane (Figure 9). Le site, situé sur une colline, a pour la première fois été fouillé en 1994 par Viengkeo Souksavatdy, étude ensuite poursuivie sous la direction d'une équipe suèdo-lao (Karlström et Källen, 1997). Le site daté par radiocarbone et l'étude du mobilier entre 350 et 600 ap. J.-C semblent montrer une période d'utilisation courte (A. Källen et A. Karlström, 1999). Les fouilles ont livré un grand nombre de céramiques domestiques dont 76 intactes, étudiées par Källen (A. Källen, 2004) et également un artisanat textile, avec la découverte de fuseaux et de sceaux en argile. Le site a également livré 346 perles en verre, principalement découvertes en contexte funéraire. Enfin, des évidences d'une métallurgie du fer avec des scories, tuyères, objets ferreux et argiles rubéfiées ainsi que quelques objets cuivreux ont pu être identifiées. Un des objets cuivreux découverts possède une forme proche d'un petit tambour de *Dong son* (voir Chapitre VIII) avec un tympan de 23 cm de diamètre orné d'une étoile. Les autres sont des objets ornementaux, des bracelets et des bagues. Des scories potentiellement liées à une activité de production secondaire de cuivre ont également été découvertes, mais jamais analysées, ainsi que des fragments de moule.[11]

Enfin, on peut citer les sites du massif de *Pà Hang* (F. Demeter et al., 2015) situés à un carrefour entre le sud de la Chine, l'est de la Thaïlande et le Vietnam. Ils sont plus particulièrement connus pour les études sur les premiers peuplements humains d'Asie du Sud-Est, mais ont également livré des traces de l'âge du Bronze en 2017. La grotte de *Tam Pà Ling* dans la province de Huaphanh au nord du Laos datée à 70 ± 8 ka possède la présence du plus ancien fossile d'Homme moderne d'Asie du Sud-Est (F. Demeter et al., 2015). Les fouilles de 2017 ont également permis la découverte d'une activité plus récente, avec la mise au jour d'une tombe, dite de *Jack le guerrier,* datée de la transition entre la période Néolithique et l'âge du Bronze, vers 1000 av. J.-C (2865 ± 29 BP/1122-931 BC, datation ^{14}C d'une prémolaire mandibulaire) à laquelle un riche mobilier funéraire était associé. Cette datation de l'âge du Bronze est la première pour le nord du Laos, ce qui en fait à ce jour la plus ancienne trace de métallurgie du cuivre/bronze pour cette région. Le mobilier se compose d'un ensemble de céramiques avec un décor incisé *cordmarked*, ainsi que des éléments de parures : coquillages marins, perles de coquillages en forme de disque, perles en pierre, un bracelet en pierre fait

[11] À Lao Pako, des jarres inhumées ont été mises au jour, de différentes tailles, avec des décors *cordmarked* et *striped and incised,* mais aucun reste humain n'a été retrouvé associé à ces jarres (Karlström et Källen, 1997)

de néphrite ou de serpentine, de quatre grandes barres cylindriques en ocre ainsi qu'une hache en bronze qui est intégrée à l'étude de BROGLASEA (voir partie I.2, Cameron et al., 2018, p. 171-185; Pryce et Cadet, 2018, p. 206-207). [12]La hache mise au jour est la plus ancienne trace découverte à ce jour et le seul objet de la métallurgie du cuivre daté au nord du Laos. Elle se compose d'un alliage inhabituel pour l'Asie du Sud-Est à la fin de la préhistoire, de cuivre (80 %mass.) et d'arsenic (11 %mass.) avec 2 %mass. de bismuth (T. O. Pryce et M. Cadet, 2018). Cette tombe reste pour l'instant une découverte isolée, malgré de nouvelles recherches en 2018 auxquelles j'ai participé. Un autre site du massif de *Pà Hang*, *Tam Hang* possède également des traces d'une occupation de la toute fin de l'âge du Fer, avec des datations débutant aux alentours de 600 av. J.-C. La principale découverte est un disque en pierre gravé similaire à ceux découverts à proximité de la Plaine des Jarres (E. Patole-Edoumba, 2018, p.147-152).

Des prospections dans les régions du nord du Laos ont été effectuées par T.O Pryce (CNRS) afin de mettre au jour des sites de la fin de la préhistoire dans une région où elles font défaut à ce jour. T.O Pryce évoque le manque de données et de découvertes archéologiques dans les hautes terres d'Asie du Sud-Est : « *little 'upland archaeology' has been done in Southeast Asia, and in particular there is a near complete dearth of the funerary assemblages which might permit the phenotypic and isotopic studies that are showing promise in lowland areas, as well as the technically difficult prospect of DNA research.* »(T. O. Pryce, 2013, p.28). Aucun site de la fin de la période préhistorique, hormis la Plaine des Jarres et les quelques sites autour de Luang Prabang, n'était alors connu dans cette région nord du Laos. C'est ce qui a motivé les prospections de T.O Pryce (aidé par Olivier Evrard, IRD) avec l'aide des compagnies minières (géologues et experts en déminage) dans les zones métallogéniques connues afin d'identifier ces potentiels vestiges. Les prospections n'ont pas permis de découvrir ces sites. En revanche, un site lié à la métallurgie du fer, daté des débuts de la période historique (VIIIème-IXème siècle apr. J.-C) a été étudié dans la province de Luang Namtha (T. O. Pryce et al., 2011 b) durant ces prospections. Le site archéologique se compose principalement de fours circulaires composant un atelier de réduction de fer. Antérieurement aux prospections de Pryce, Thongsa Sayavongamdy, à cette époque Directeur du département d'Héritage Culturel Lao, avait déjà tenté de découvrir des sites anciens de l'âge du Bronze, sans succès également. Ce manque de découvertes de sites de l'âge du Bronze dans la partie nord du Laos pose alors question : est-ce que la transmission de l'âge du Bronze depuis la Chine serait passée par le nord du Laos ? Serait-il envisageable que ces courants de transmissions aient suivi d'autres voies

[12] Le mobilier présente des similitudes avec celui de Ban Non Wat qui date de la même période. L'étude des céramiques associées à la tombe a révélé deux groupes, l'un provenant d'une même production potentiellement locale et le second avec des décors peints provenant d'une production distincte.

(potentiellement maritimes) vers l'Asie du Sud-Est ? (T. O. Pryce et al., 2014; T. O. Pryce, 2018) Beaucoup du territoire du Laos reste encore à être explorer, dans un pays où les recherches archéologiques n'ont débuté que depuis une trentaine d'années.

Hormis ces quelques sites évoqués, le Complexe de Vilabouly dans la Province de Savannakhet, qui sera abordé durant cette thèse, est donc un des principaux sites connus et le seul site de production métallurgique de cuivre pour le Laos de la fin de la période préhistorique, avec une activité principale datée de l'âge du Fer régional et très probablement de l'âge du Bronze. Son étude apparaît donc cruciale pour commencer à remplir le blanc laissé pour l'instant dans les connaissances archéologiques préangkoriennes du territoire lao.

I.2. La métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale : caractéristiques et développements

En plus des divers types d'objets évoqués (céramiques, ornements en pierre dure, verre, etc.), le cuivre et ses alliages dérivés représentent également des matériaux tenant une place prépondérante dans les réseaux d'échanges en Asie du Sud-Est continentale à la fin de la période préhistorique. Comprendre leurs modes de productions et d'échanges apparaît donc important afin d'appréhender le développement des sociétés protohistoriques. Le cuivre, ainsi que ses éléments d'alliages (étain, plomb), représentent des matières premières stratégiques qui ne sont pas disponibles à proximité immédiate de toutes les régions en Asie du Sud-Est continentale. La consommation de cuivre/bronze, tout comme celle d'autres types d'objets, semble s'intensifier durant l'âge du Fer (potentiellement dès la fin de l'âge du Bronze[13]). Cette intensification est notamment observée pour les sites funéraires, dont certaines tombes contiennent davantage d'objets (ex : Noen U-Loke), mais également pour les sites de production primaire comme Nil Kham Haeng (vallée de Khao Wong Prachan), que nous allons présenter. Ainsi, le cuivre semble associé à une valeur sociale et symbolique, puisqu'on le retrouve dans les tombes, mais probablement aussi une approche plus mercantile. Des mécanismes d'échanges et de contacts pour l'acquisition du cuivre devaient donc être en place à la fin de la préhistoire.

Les recherches sur la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est ont longtemps été principalement orientées sur les origines de la métallurgie du cuivre et la nature de ces transferts technologiques stimulant l'âge du Bronze régional. Depuis la fouille et l'étude des premiers sites avec des preuves d'une métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est, comme Ban Chiang ou Non Nok Tha dans les années 1960-70, d'autres ont été découverts et les connaissances en matière de métallurgie protohistorique régionale progressent au fil des

[13] Il faut tout de même rappeler que les sites de l'âge du Bronze connus sont également en nombre bien inférieur par rapport à ceux de l'âge du Fer.

décennies. Les recherches sont maintenant axées sur l'étude des caractéristiques et du développement de la métallurgie à l'échelle de microrégions. Malgré la faible densité d'archéologues, particulièrement d'archéomètres, à l'échelle de la région, l'accroissement des découvertes, notamment des sites de production dont le Complexe de Vilabouly est le dernier en date, depuis les années 1980 permet aujourd'hui d'aborder la question des développements et des caractéristiques de la métallurgie du cuivre pour des zones localisées. Comme c'est le cas pour le nord-est de la Thaïlande (J. C. White et E. G. Hamilton, 2019). Depuis une décennie, l'application des études de provenance est venue également enrichir les données et le débat sur le développement et les caractéristiques de la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014; Y. Hirao et J.-H. Ro, 2013) en permettant la constitution de bases de données, illustrant la complexité et l'intensification des échanges de cuivre à la fin de la préhistoire.

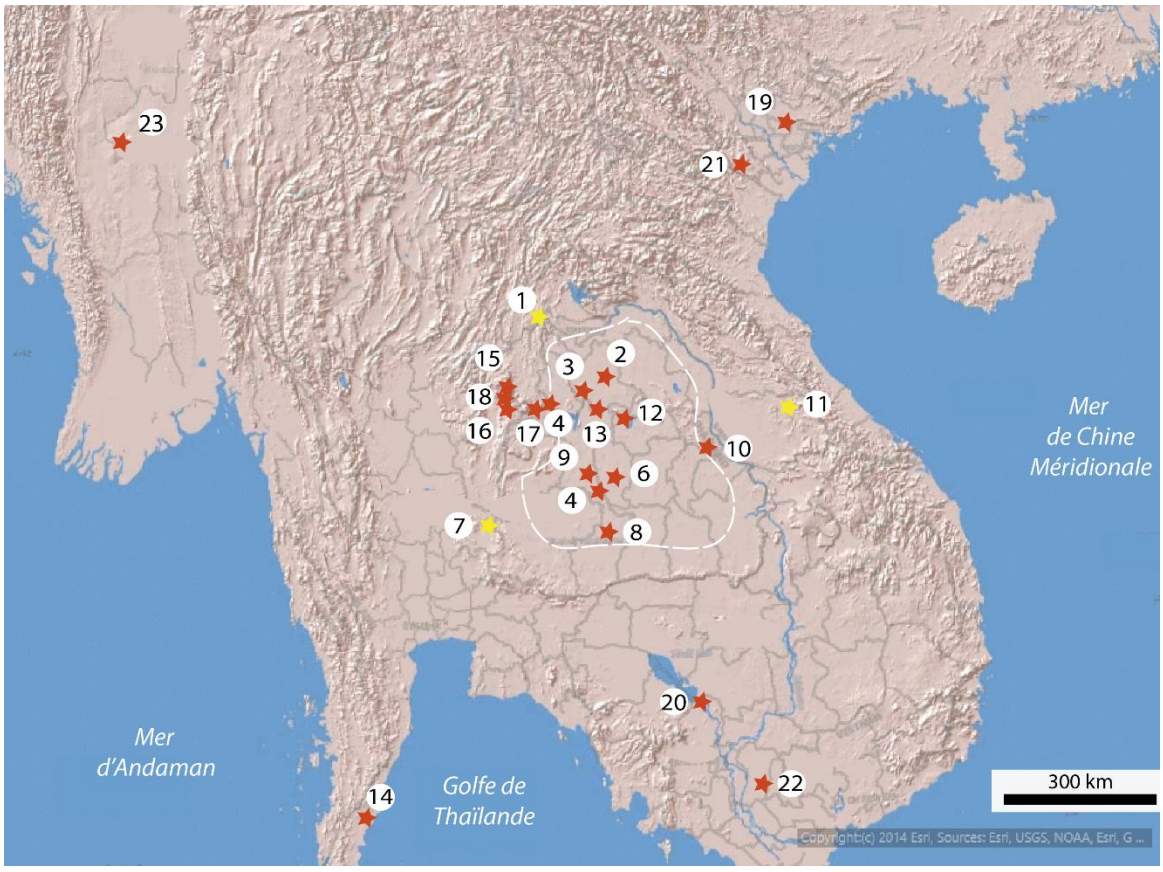


Figure 10 : Carte de l'Asie du Sud-Est continentale localisant les principaux sites avec des signes de métallurgie primaire (étoile jaune) et secondaire (étoile rouge) : 1= Phu Lon, 2= Ban Chiang, 3= Don Klang, 4=. Non Nok Tha, 5=Noen U-Loke, 6= Ban Lum Khao, 7= Vallée de Khao Wong Prachan, 8=Non Ban Jak, 9= Ban Non Wat, Non Nong Hor, 11= Vilabouly, 12= Ban Chiang Hian, 13= Non Chai, 14= Khao Sam Kaeo, 15= Ban I Loet, 16= Non Kaw Wong, 17= Non Pa Kluay, 18 : Ban Puan Phu, 19= Co Loa, 20= Samrong Sen, 21= Than Den, 22= Go O Chua, 23= Oakaie (crédit carte de base= ESRI).

Malgré ces développements, beaucoup de régions demeurent encore à être explorées et la recherche n'a pour l'instant accès qu'à une fenêtre restreinte des pratiques métallurgiques régionales. En effet, les signes archéologiques de la présence de la métallurgie du

cuivre/bronze en Asie du Sud-Est continentale se retrouvent seulement pour trois sites de production de cuivre primaire pour la fin de la préhistoire : la vallée de Khao Wong Prachan et Phu Lon en Thaïlande, et le Complexe de Vilabouly au Laos central (Figure 10). On identifie ensuite des sites avec des signes d'une métallurgie secondaire : Ban Non Wat, Ban Chiang, Non Nok Tha, Ban Na Di, Dong Klang, Noen U-Loke (nord-est Thaïlande), Non Pa Kluay (upper Nam Phong), Ban I Loet (Petchabun Range), Non Khaw Wong (Petchabun Range), Ban Puan Phu (Petchabun Range), Ban Chiang Hian (nord-est Thaïlande), Non Chai (nord-est Thaïlande), Khao Sam Kaeo (péninsule Thaï-malaise), Go O-Chua (sud du Vietnam), Thanh Den (Vietnam), Oakaie 3 (Myanmar) ou encore Samrong Sen (Cambodge) pour lesquels des objets à base de cuivre, des creusets et/ou des moules ont été mis au jour, mais pas systématiquement étudiés (Tableau 1). Certaines régions, comme le Vietnam et le Laos, sont encore peu connues sur la carte de l'Asie du Sud-Est en matière de métallurgie. La région qui a pour l'instant reçu le plus d'intérêt est celle du nord-est de la Thaïlande. Malgré des études moins denses, la région qui compte la plus forte concentration de matériel archéologique en lien avec la métallurgie est le Vietnam, particulièrement sous forme d'objets. Les sites avec des évidences de productions primaires et secondaires en Thaïlande ont déjà été largement répertoriés par Pigott, (2019) et White et Hamilton (2019). Nous ne reviendrons ici que sur les principaux, qui nous serviront par la suite dans l'étude comparative avec le Complexe de Vilabouly.

Site	*Chronologie*	*Fonction*	*Creuset*	*Moule*	*Scorie*	*Objet (Cu)*	*Autres*	*Inhumation*
Phu Lon	1er millénaire BC-1er millénaire AD ?	Mine, prod. primaire et secondaire	95	2	Oui	Oui	zones minières, minerais	Non
Non Pa Wai	Néolithique/âge du Bronze	Prod. primaire	Oui	Oui	Oui (tonnes)	Oui	minerais, foyer, cheminées	Oui
Nil Kham Haeng	âge du Bronze/début âge du Fer	Prod. Primaire, cimetière, habitat	Oui	Oui	Oui (tonnes)	Oui	minerais	Oui
Non Mak La	âge du Bronze/âge du Fer	Prod. primaire	Oui	Oui	Oui	Oui		Oui
Khao Sai On	début-milieu âge du Fer	Mine, prod. primaire	Oui	Oui	Oui	Oui	zones minières, minerais	Oui
Tha Kae	Néolithique/historique	Prod. primaire ? Cimetière, habitat			Oui	Oui		Oui

Thong Na Nguak	âge du Fer	Prod. primaire, cimetière	Oui	Non	Oui	Oui	minerais	Oui
Puen Baolo	Age du bronze/âge du Fer	Mine, prod. primaire et secondaire ?, cimetière	Oui	Non	Oui	Oui	zones minières, minerais	Oui
Ban Chiang	1500 BC/historique	Cimetière, habitat, prod. secondaire	92	4	Oui	169		Oui
Ban Na Di	milieu âge du Bronze/âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	162	11	Oui	115	Foyers ?	Oui
Ban Phak Top	Néolithique/historique	Prod. secondaire	2		Non	7		Non
Don Klang	début âge du Bronze/historique	Cimetière, habitat, prod. secondaire	3	1	Oui	63		Oui
Non Nok Tha	1500 BC/fin de l'âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. Secondaire	4	19	Non	192		Oui
Non Pa Kluay	début âge du Bronze/âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire		8	Oui	66		Oui
Ban I Loet	milieu âge du Fer	Prod. secondaire	7	?	Oui	3		?
Ban Puan Phu	milieu âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	5		Oui	3		Oui
Non Nong Hor	âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	Oui	Oui	?	Oui		Oui

Site	*Chronologie*	*Fonction*	*Creuset*	*Moule*	*Scorie*	*Objet (Cu)*	*Autres*	*Inhumation*
Lao Pako	âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	Non	Oui	Oui	23	Tuyère (fer ?)	Oui ?
Ban Chiang Hian	milieu âge du Bronze/historique	Cimetière, habitat, prod. secondaire	14	Oui	Non	2		Oui
Non Chai	âge du Bronze/âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	16	14	Oui	69		Oui
Ban Lum Khao	âge du Bronze/âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	Non	Oui	Non	Oui	Foyers ?	Oui
Ban Non Wat	1400-1200 BC/milieu âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	664	400	Oui	1320	3-4 foyers	Oui
Noen U-Loke	fin âge du Bronze/âge du Fer	Cimetière, habitat, prod. secondaire	?	Oui	Oui	Oui	Tuyère ?	Oui
Go O Chua	âge du Bronze		?	Oui	?	Oui		?
Samrong Sen	âge du Bronze		2	Oui	?	Oui		
Thanh Den	âge du Bronze		20	46	?	Oui	Four frag	?

Tableau 1 : Caractéristiques des principaux sites de production primaire et secondaire connus en Asie du Sud-Est. Les chronologies utilisées se veulent volontairement imprécises, car certains sites ne possèdent pas de datations absolues afin de placer leur période d'activité. Abréviations : Pot. = poterie, Prod. = production. Références : White et Hamilton, 2019 ;Higham et al, 2020 ; Bayard et Solheim, 2009 ; Higham, 2012 ; Higham et al, 2009 ;Källen et Karlström, 1999 ;Higham et al, 2015 ;Higham et al, 2020 ;Pigott et al, 1997 ;Pigott, 2019 ; Cadet et al, 2019 ; Rispoli et al, 2013.

I.2.1. Les sites de production primaire

La vallée de Khao Wong Prachan et Phu Lon ont été fouillés par le TAP (*Thailand Archaeometallurgy Project*) codirigé par Vincent Pigott et Surapol Natapintu. Puis le LoRAP (*Lopburi Regional Archaeology Project*) dirigé par Roberto Ciarla, Pakpadee Yukongdi et Fiorella Rispoli depuis les années 1980, a fouillé les sites adjacents de Khao Sai On et Tha Kae.

1. *Phu Lon*

Phu Lon est un complexe minier situé le long du fleuve Mékong au nord-est de la Thaïlande, dans la province de Nong Khai (Figure 10). Il possède une séquence archéologique perturbée due à un effondrement de la zone minière, qui n'est donc pas précisément datée, du premier millénaire av. J.-C au premier millénaire ap. J.-C. Les débris observés peuvent s'étendre jusqu'à dix mètres de profondeur, sur plusieurs hectares, et doivent l'être encore davantage, signifiant qu'un large volume de minerais a dû y être exploité (Pigott and Weisgerber, 1998; Pigott, 2019). Les zones qui entourent les puits de mine possèdent des dépôts de roches pulvérisées, parfois concassées, à une taille relativement uniforme, ainsi que de nombreuses aires suggérant des zones de concassages avec des pierres à enclume probablement de la rivière, parfois associées à des fragments de malachite. Le principal minerai exploité serait la malachite. La malachite est présente abondamment dans les dépôts de surface, associée à des veines de quartz et des oxydes de fer, pour laquelle deux zones de préparation ont été identifiées autour de la mine. Les premières méthodes minières pour l'extraction consistaient à creuser la surface avec des pierres de rivière, menant à des fosses rondes (V. C. Pigott et S. Natapintu, 1996, p.789-790). Durant les périodes plus tardives de l'exploitation, des puits de mine suivant les veines de minéralisations peuvent être identifiés sur le site.

Les seuls signes rattachés à la production du cuivre se retrouvent sur une zone nommée *Pottery flat* qui est également la principale zone d'exploitation minière, avec une grande concentration de puits de mine et de galeries (V. C. Pigott, 2019, p.11). Les fouilles ont notamment livré 95 fragments de creusets, quelques scories, deux fragments de moules et un objet en métal. Très peu d'éléments découverts à Phu Lon se rattachent à l'activité de réduction. Lorsque Phu Lon a été fouillé dans les années 1980, l'équipe de fouille n'avait pas connaissance que les scories pouvaient être concassées, ce qui pourrait également expliquer leur absence dans les registres. De plus, l'utilisation de malachite et de minerais riches peut mener à une production faible de scories. Le manque de données liées à une activité de réduction à Phu Lon provient certainement de la fouille qui n'a pas permis de les mettre au jour. Trois fragments de scories indépendants (T. O. Pryce et al., 2011 a) correspondent à une activité primaire, mais la nature du procédé demeure difficile à caractériser avec si peu d'échantillons. L'étude des résidus internes aux fragments de creusets a révélé la présence d'étain, ce qui montre également la présence d'une métallurgie secondaire à Phu Lon (W. W. Vernon, 1996). L'étain n'est en revanche pas présent dans la géologie locale, il devait donc provenir d'un autre lieu.

Deux types de creusets semblent se distinguer parmi les fragments mis au jour : un type dont les parois plutôt planes s'affinent vers le haut, associé à un bec de coulée, et le second avec des parois uniformes et un bord arrondi (W. W. Vernon, 1996). Vernon (1996-97) a proposé

un diamètre entre 60 et 75 mm et une profondeur de 30-35 mm pour les creusets de Phu Lon. Les mêmes types de parois ont pu être identifiés à Ban Non Wat (voir dans la suite de ce chapitre). L'étude n'a pas permis de définir si ces deux types de parois appartiennent bien à des creusets différents, car ils étaient trop fragmentaires. La présence d'une couche protectrice interne[14] au creuset a pu être identifiée pour les creusets de Phu Lon. Cette couche est composée d'un matériau hautement réfractaire de grains de quartz finement concassés. Elle semble permettre de multiples usages du creuset. On la retrouve également pour les creusets des sites de Ban Chiang, Ban Na Di ou Ban Non Wat notamment, comme nous le verrons par la suite.

Aucun signe d'une occupation permanente dédiée à l'activité minière n'a été identifié, même si ces signes sont souvent difficilement identifiables par le biais de l'archéologie, en l'absence de structure. De plus, les structures auraient été difficilement identifiables dans les dépôts perturbés de Phu Lon. Quelques traces d'habitat sont présentes à Phu Lon : des fragments de céramiques domestiques, une herminette, une figurine et une broche, mais aucune évidence d'os d'animaux ou de structure. L'exploitation de Phu Lon a donc été qualifiée d'activité saisonnière (White and Pigott, 1996) mais sans données à l'appui à ce jour.

Phu Lon apparaît en premier lieu comme une zone d'extraction des minerais. Les 95 fragments de creusets découverts semblent le relier à une activité secondaire, bien que l'analyse de trois fragments de scories, ainsi que le large volume de minerais extrait, laisse fortement penser qu'une activité primaire s'y tenait également. De plus, le large volume de minerai exploité montre que le site a dû être intensivement employé. Le minerai principal exploité serait la malachite, un carbonate de cuivre, connu pour être un des minerais les plus simples à réduire en une seule étape réductrice, sans le besoin de structures complexes, et qui peut mener à une production de scories faible lorsque le minerai est riche. La signature isotopique de Phu Lon, obtenue dans le cadre de SEALIP (*Southeast Asian Lead Isotope Project* ; Pryce et al., 2014, 2011a) sur sept échantillons de minerais, un de scorie et deux de métal (une hache en bronze et une goutte de bronze), indique une signature très dispersée, reflétant une variation dans les minéralisations de cuivre (T. Kamvong et K. Zaw, 2005, 2009). Celle-ci rend l'exploitation des données isotopiques difficile.

[14] *Lagging*

2. La Vallée de Khao Wong Prachan[15]

La Vallée de Khao Wong Prachan (noté KWPV) a livré une séquence archéologique complexe, avec des signes d'extraction et de production du cuivre, des traces d'habitats et de cimetières, pour les sites de Non Pa Wai et Nil Kham Haeng. Ensuite, on trouve des sites satellites à la vallée : Non Mak La, Tha Kae, Phu Noi, Khok Din/Khao Sai On et Noen Din qui seront plus brièvement décrits. Les restes archéologiques de KWPV ont donc permis une plus grande immersion dans les pratiques métallurgiques de la fin de la préhistoire, via des fouilles archéologiques étendues des années 1986 à 1990 avec un large corpus archéologique (Pigott et Natapintu, 1988; Pigott et al., 1997). Le site a notamment été étudié par :

– Anna Bennet (A. Bennett, 1988 a; b) qui a analysé du mobilier provenant de Non Pa Wai et Non Mak La, avant que Nil Kham Haeng ne soit fouillé ;

– William Rostocker (W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989) qui s'est concentré sur la question des minerais, et a notamment mis en évidence l'utilisation d'un mélange de minerais ;

– Une étude de 1998 centrée sur Nil Kham Haeng (D. N. Wang, V. C. Pigott, et M. R. Notis, 1998) ;

– T.O Pryce (T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010) qui a pu étudier les deux sites principaux de Nil Kham Haeng et Non Pa Wai.

En comparaison aux autres sites décrits durant cette thèse, KWPV serait le témoin d'une intensification dans la production et un accroissement de communautés spécialisées. Contrairement à la situation décrite pour Phu Lon, KWPV a livré des signes de toutes les étapes de production, de l'exploitation minière (pas d'exploitation préhistorique datée) en passant par la réduction, jusqu'à la fonderie.

Les deux principales zones de productions de cuivre sont Non Pa Wai (noté NPW) avec une séquence du Néolithique (2000 av. J.-C) à l'âge du Bronze, avec une activité principale autour de 1000-800 av. J.-C, et Nil Kham Haeng (noté NKH) avec une activité principale durant l'âge du Bronze entre 900 et 400 av. J.-C, se terminant au début de l'âge du Fer. Une réévaluation récente (T. Higham et al., 2020) de la période d'activité des sites de KWPV, place une partie de l'activité des deux sites de Non Pa Wai et Nil Kham Haeng durant une époque contemporaine (Figure 11). Auparavant, Non Pa Wai était perçue comme une production de

[15] Les photos présentées dans cette partie ont été prises par l'auteure au LAPA (CEA) de Saclay sur une partie du mobilier archéologique de KWPV disponible au laboratoire (LAPA) dans le cadre de BROGLASEA. Le mobilier disponible ne compte pas la totalité des découvertes de KWPV, qui sont bien plus vastes, et conservées au Pennsylvania Museum, aux Etats-Unies.

l'âge du Bronze, précédant celle de Nil Kham Haeng à l'âge du Fer. C'est d'ailleurs sur cette séparation chronologique que Pryce a pu établir ses principales conclusions (Pryce et al, 2010 ; Pryce, 2008). En effet, l'étude conjointe des deux sites lui avait permis de mettre en évidence une séquence évolutionniste des traditions techniques avec l'apparition de biens importés, d'Inde notamment, durant l'âge du Fer, passant d'une technologie hétérogène (NPW) vers une technologie homogène plus maîtrisée (NKH, Pryce et al., 2014, 2010). Ces nouvelles datations viennent donc déplacer ces interprétations, toujours applicables, pour une période plus ancienne que précédemment, puisque l'activité de Nil Kham Haeng semble principalement correspondre à l'âge du Bronze et non à l'âge du Fer.

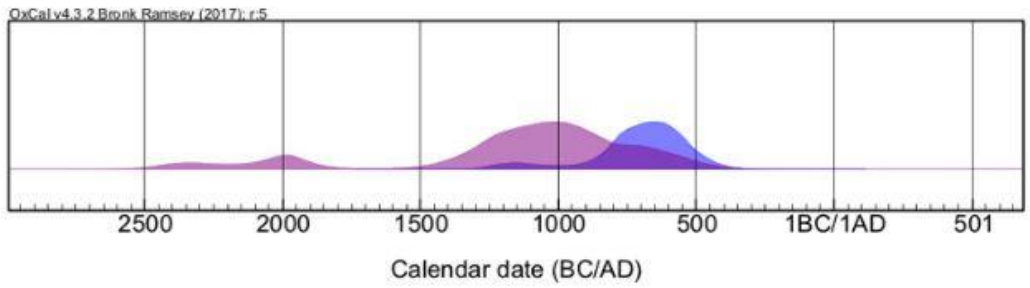


Figure 11 : Diagramme KDE pour NPW (violet) et NKH (bleu) montrant la superposition d'une partie des périodes d'activité des deux sites (image : Higham et al, 2020, p. 961).

Non Pa Wai compte un cimetière où différents types d'artéfacts ont été mis au jour : haches, moules bivalves pour la fonte de haches et un hameçon. Ensuite, on trouve des débris de production : minerais concassés, scories, fragments de creusets, des fragments de cheminées de four et des fragments de moules en céramique dans un dépôt s'étendant sur 3 m d'épaisseur et 5 hectares. Le type de moule dominant est identifié comme conique (Figure 12) avec une forme et des dimensions appropriées à la fonte de lingots (V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997). De manière moins commune (quelques centaines), on trouve des moules bivalves pour de petits instruments, comme des haches. L'absence de structure de réduction fixe et la grande quantité de fragments de creusets découverte suggèrent qu'une réduction en creuset devait être en place, ce qui est renforcé par les analyses de Pryce (2008). Seuls des lingots et des objets en cuivre semblent être produits. De plus, aucune évidence de la présence locale d'étain ni d'imports n'a été identifiée. Bien que le site de Non Pa Wai ait livré une forte concentration de moules, très peu d'objets y ont été découverts, et aucun lingot.

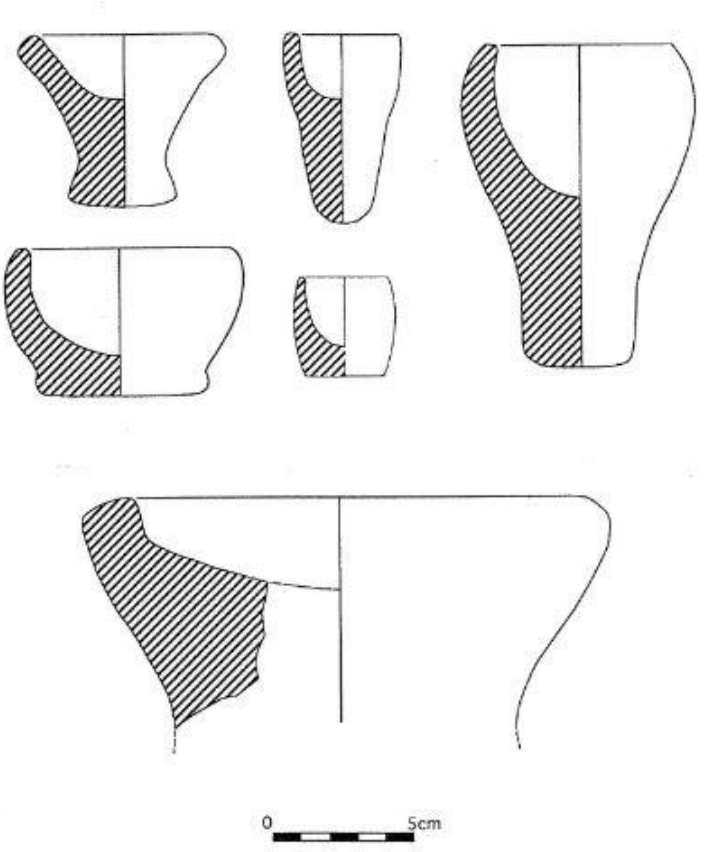


Figure 12 : Différents exemples des moules découverts à Non Pa Wai (image : White et Pigott, 1996, p.163).

La morphologie des scories de NPW se présente principalement sous forme plan-convexe, pour les exemples complets, d'environ 15 cm de diamètre pour 1,5 kg nommé *slag cakes* (Figure 13) et comparables à la forme des creusets (Pryce, 2008, p.140). Leur morphologie suggèrerait qu'elles aient été coulées dans une dépression dans le sol, à la suite de l'opération de réduction. Leur microstructure est très hétérogène avec la présence de minéraux ayant partiellement ou non réagi.

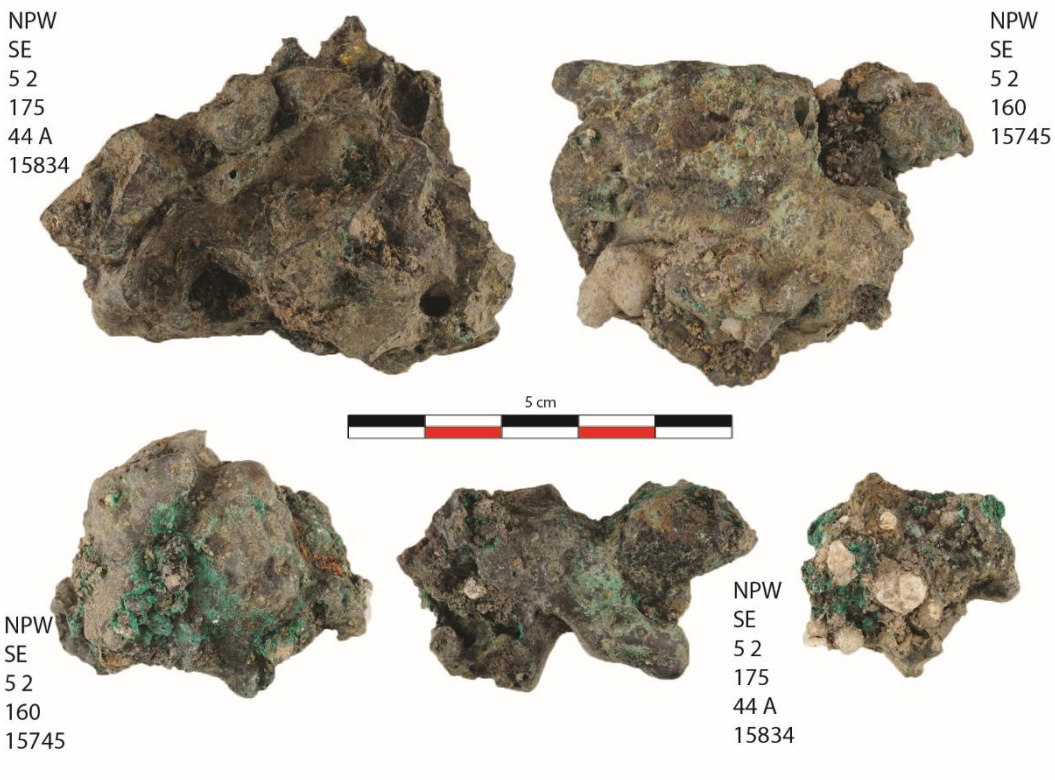


Figure 13 : Exemples de fragments de scories découvertes à Non Pa Wai.

Concernant les céramiques techniques de Non Pa Wai, deux types peuvent être distingués (Pryce, 2008, p.119) : des fragments de four/chemisages de fosse et des fragments de creusets (Figure 14). Les fragments ont une épaisseur d'environ 40 mm, ils ont une forme cuboïde et présentent des traces de détérioration faible à la chauffe, sans trace de vitrification. Les fragments de creusets de NPW peuvent être identifiés comme fragments de paroi, de lèvre et de base avec une épaisseur entre 10 et 60 mm et un diamètre entre 50 et 150 mm dont la forme semble homogène. Les fragments ont été comparés au seul exemple de creuset complet (« *Mr Crucible* ») découvert à NPW, auquel ils correspondent (T. O. Pryce et al., 2010). Ce creuset possède un diamètre de 200 mm avec une base hémisphérique épaisse de 60 mm et des parois s'affinant vers la lèvre. Tous les fragments de creusets possèdent des signes forts d'une exposition directe à une chauffe externe, avec un gradient thermique, la présence de vitrification et pour certains, des surfaces internes scoriacées. La microstructure et la composition de la couche de scorie adhérente indiquent des températures au-delà de 1000°C, ainsi qu'une faible standardisation de la charge/technique lors de la réaction. Aucun bec de coulée ni de couche interne protectrice (l*agging*) n'a été identifié pour les creusets de NPW. Certains de ces fragments pourraient également correspondre à des cheminées de four, comme celles retrouvées dans des tombes de NKH et Khao Sai On (Pigott et al, 1997). Ces cheminées sont des structures portables, de forme cylindrique avec des perforations. Le rôle précis de ces cheminées lors de l'opération métallurgique reste encore à établir. Les

réductions expérimentales menées par Pryce (2008) ont démontré que ces structures ne devaient pas être employées pour l'opération de réduction à KWPV, car les cheminées expérimentales étaient vitrifiées, avec des résidus de scories suite à l'opération, contrairement aux exemples archéologiques.

Le procédé de réduction de NPW utilise donc pour réacteur des creusets, potentiellement associés à des fosses, lors d'un procédé à la fois inefficace et non standardisé. Il faisait entrer en jeu un procédé de réduction avec un mélange de minerais variable de malachite et de chalcopyrite, réalisé à une température minimale moyenne de 1240°C (T. O. Pryce, 2008, p.162; T. O. Pryce et al., 2010). Durant ce procédé, un mélange de minerais de cuivre oxydés et sulfurés devait être utilisé, ainsi que des fragments d'oxydes de fer dont la fonction n'a pas pu clairement être définie par l'étude de Pryce. De plus, ces fragments d'oxydes de fer sont présents en grande quantité, bien plus que nécessaire pour un fondant. Le procédé était inefficace, car il menait à une perte importante de cuivre métallique dans les scories étudiées, avec des teneurs de 1 à 15 %mass. (CuO). Un autre signe de l'inefficacité et de la non-standardisation du procédé de NPW, se retrouve dans l'hétérogénéité des scories qui contiennent des inclusions de minéraux ayant partiellement réagi, notamment de magnétite. Cette hétérogénéité pourrait provenir de conditions non maîtrisées, comme la température et/ou une charge de minerais fortement variable (T. O. Pryce, 2008, p.164-166).

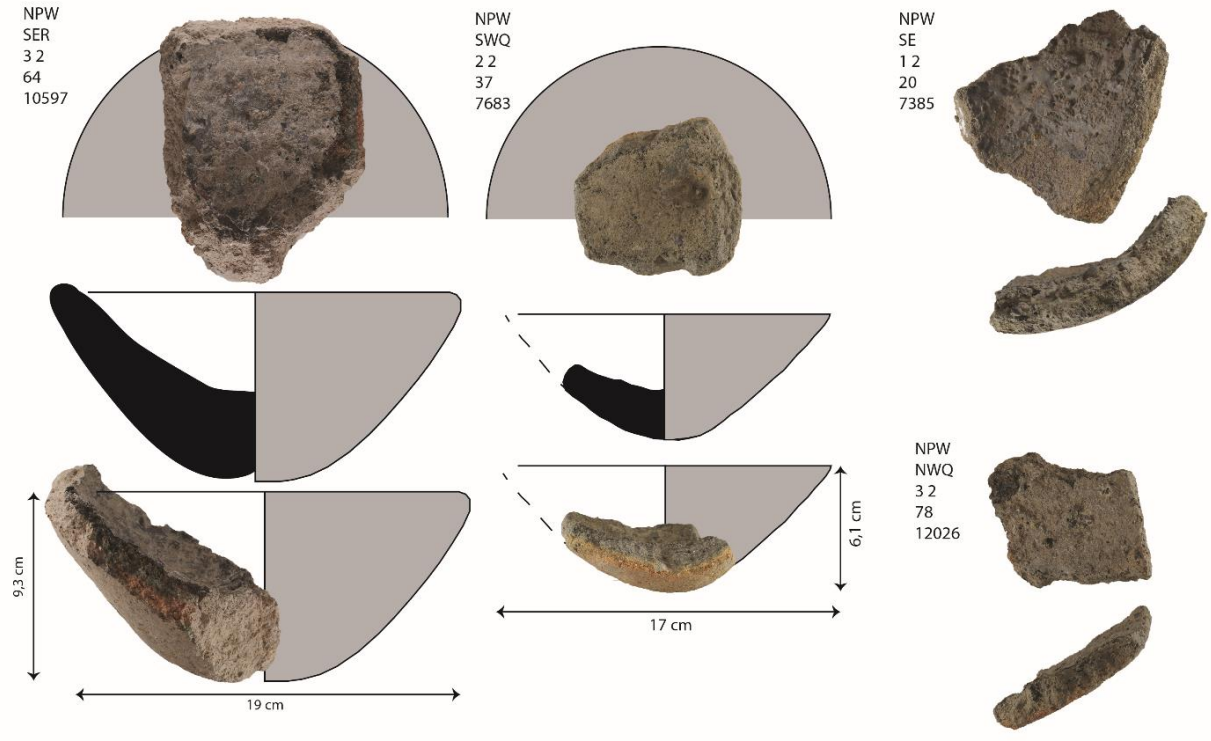


Figure 14 : Exemples de creusets découverts à Non Pa Wai.

A Nil Kham Haeng (noté NKH), situé à trois kilomètres au sud de NPW, les dépôts font trois hectares et jusqu'à six m de profondeur de minerais concassés et de scories, accompagnés de contextes funéraires et d'habitats mélangés (V. C. Pigott et S. Natapintu, 1988; V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997; V. C. Pigott, 1999; F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013). NKH possède de plus fortes traces d'habitats que NPW. Les tombes montrent également une augmentation dans la quantité d'objets produits. Dans la région de la vallée de Khao Wong Prachan, durant le milieu-fin du premier millénaire av. J-.C, les premiers signes archéologiques d'un contact avec le sous-continent indien émergent (F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013).

À NKH, les fouilles ont permis la découverte de creusets fragmentés, ainsi que de cheminées perforées dans des tombes, dont quatre complètes. La présence de creusets pour NKH a longtemps été inconnue, car ils ont été découverts très fragmentés et possèdent des caractéristiques qui les rendent très friables (V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997; T. O. Pryce, 2008). La présence de moules bivalves et d'objets en cuivre dans les contextes funéraires montre que la production était orientée vers un type particulier d'objets cordiformes en plaque (Figure 15). Dans quatre tombes, un type particulier d'objets en cuivre cordiforme a été mis au jour, ainsi qu'un exemplaire de moule pour ce type d'objet. Leur étude montre qu'ils sont composés de cuivre non allié (A. Bennett, 1989; T. O. Pryce et al., 2011 c). Le soufre contenu dans les inclusions de matte se retrouve jusqu'à 20 %mass. Vincent Pigott et T.O Pryce proposent que ce type d'objet puisse être une forme standard de lingot associé à KWPV et adapté aux échanges (V. C. Pigott, 2019, p.40).

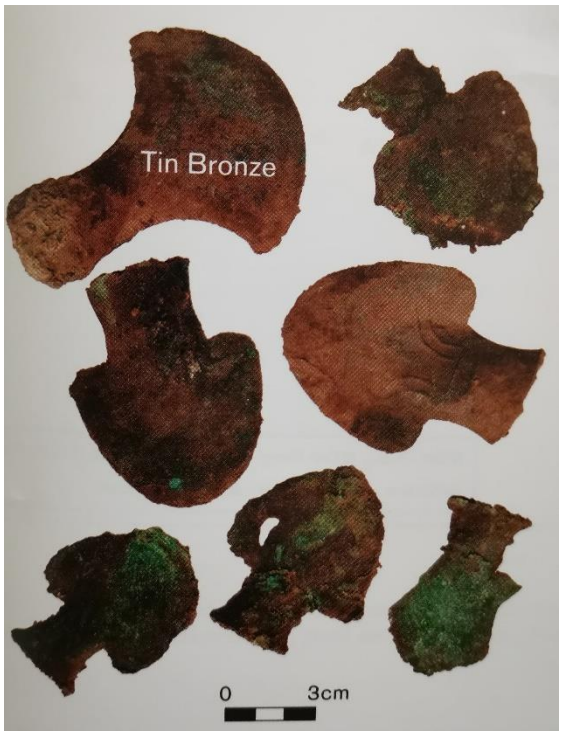


Figure 15 : Exemple des plaques cordiformes en cuivre découvertes à NKH (image : Pigott, 2019, Fig.2.28).

Les scories identifiées pour NKH sont de deux types : des scories dites *cakes* (Figure 16) et *slag cast* (Figure 17). Les scories *cakes* suggèrent des dimensions originales de 7 à 10 cm de diamètre et jusqu'à 0,5 kg donc inférieures aux *slag cakes* de NPW (Pryce, 2008). Le second type de scories, dit *slag cast* a été ainsi nommé par Vincent Pigott (V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997), car leur morphologie suggère qu'elles ont solidifié dans un moule. Les exemples complets de *slag cast* donnent des dimensions de 5 à 6 cm de diamètre, et de 50 à 100 g.

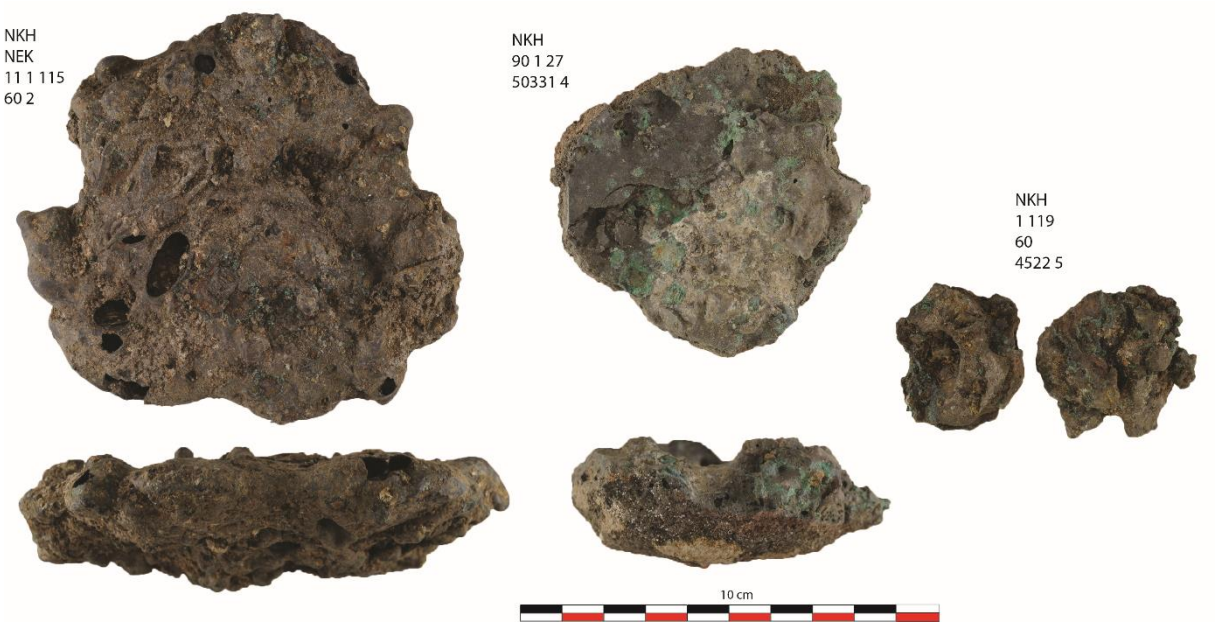


Figure 16 : Exemples de scories cakes *de Nil Kham Haeng.*



Figure 17 : Exemples des scories dites slag cast *de Nil Kham Haeng.*

Les scories de NKH semblent suggérer un accroissement de l'homogénéité du procédé, qui s'approche davantage d'une standardisation. Contrairement aux scories de NPW, celles de NKH apparaissent homogènes, sans large part de minéraux ayant partiellement réagi. La production de NKH semble également plus efficace dans la récupération du cuivre métallique avec un maximum de 3 %mass. de CuO résiduel (T. O. Pryce et al., 2010). Aucune différence de composition majeure n'a pu être identifiée entre les scories *cakes* et les *slag cast* (Pryce, 2008). Le calcul des températures atteintes durant la réduction donne des gammes similaires entre NPW et NKH. L'accroissement de l'homogénéité pourrait donc provenir d'un meilleur contrôle de la charge de réduction et d'un meilleur maintien des conditions, notamment de la chauffe (Pryce, 2008).

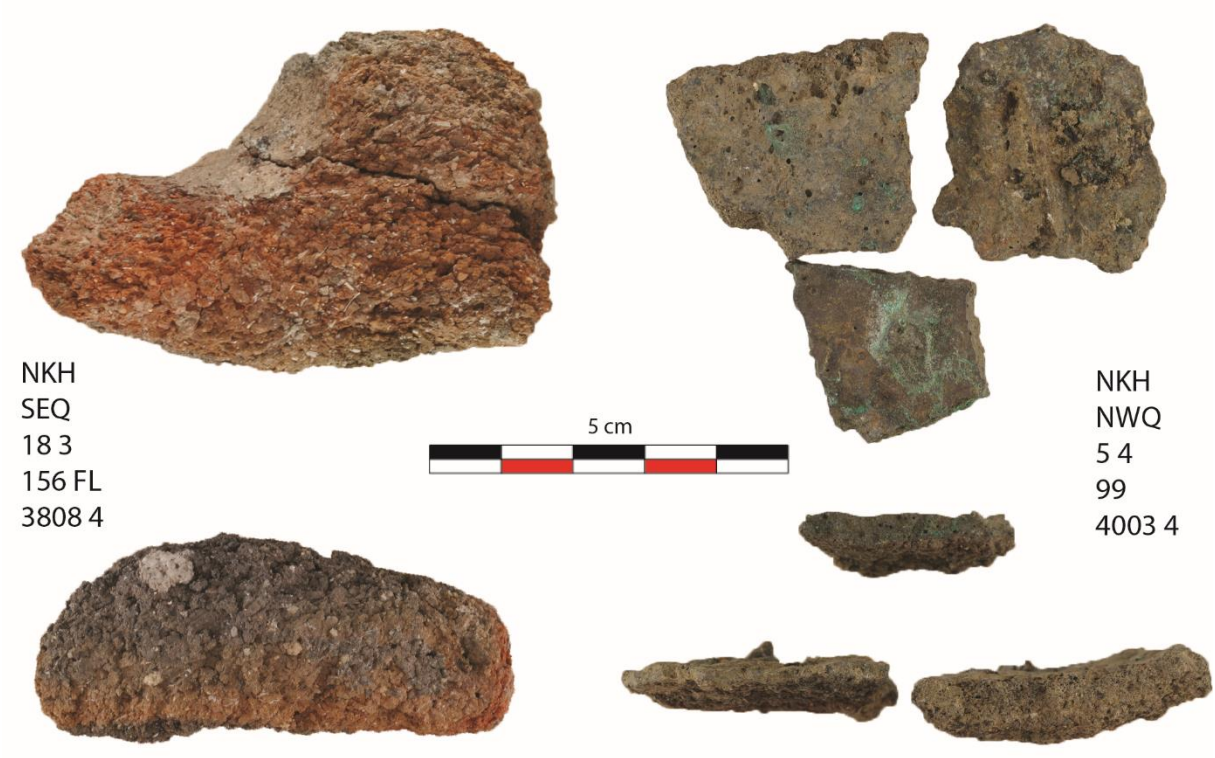


Figure 18 : Exemples de fragments de parois de four/chemisage (à gauche) et des « slag-skin » qui seraient en fait des fragments de creusets (à droite).

À l'origine dans l'assemblage de NKH, T.O Pryce identifie durant sa thèse deux types de céramiques techniques : le premier associé à des fragments de parois de four et le second nommé « *slag-skin* » [16]correspond à des fragments de céramiques associés à une fine couche de scorie adhérente (Figure 18 et Figure 19), provenant potentiellement de chemisages de fosse de vase-four (V. C. Pigott, 1999). Par la suite, l'observation de certains fragments fera revenir T.O Pryce sur cette identification, car certains présentent alors des morphologies qui se rapprochent de fragments de creusets, mais composés d'un matériau très friable (Pryce et

[16] Nommé ainsi par Vincent Pigott.

al, 2011). Les fragments de creusets étudiés par T.O Pryce ont une épaisseur entre 10 et 15 mm et un diamètre entre 30 et 50 mm. Les fragments de four/chemisage quant à eux mesurent entre 40 et 50 mm d'épaisseur avec un diamètre de 50 à 130 mm. Les fragments ont une forme cuboïde. Certains fragments présentent l'évidence d'une perforation. Leur couleur indique une détérioration par la chauffe, mais aucun signe de vitrification n'a pu être observé. En effet, l'exposition à de hautes températures est davantage observée pour les fragments de creusets qui possèdent une couche de scorie, signe qu'ils étaient en contact direct avec le mélange en fusion (Pryce, 2008, p. 187-188).



Figure 19 : Exemples de potentiels fragments de creusets de Nil Kham Haeng.

La reconstitution technologique fournie par T.O Pryce durant sa thèse l'a amené à suggérer que les différences enre les technologies de NPW et NKH proviendraient d'une maîtrise plus

grande du procédé à NKH (Pryce, 2008, p. 276). En effet, les preuves archéologiques de NKH ont démontré une maîtrise et un niveau d'expertise plus élevés que NPW. Pryce et consorts ont interprété ce changement comme une réponse culturelle et technique face à une augmentation dans la demande régionale en cuivre, utilisé à la fois pour un but funéraire et social à la fin du premier millénaire av. J.-C et au début du premier millénaire ap. J.-C. Les indicateurs archéologiques de KWPV semblent montrer une accélération dans l'augmentation de la complexification sociale perçue dans le mobilier associé aux tombes. Cette augmentation est concomitante à l'intensification de l'activité métallurgique, particulièrement à NKH (R. Ciarla, 2007, 2008), mais également à Khok Din et Noen Din. L'absence de zones d'activités spécialisées et les similarités dans la production partagée par NPW et NKH suggèreraient que le travail était pratiqué par de petits groupes, opérant indépendamment et non sous une certaine forme de contrôle commun. Même si les signes de ce contrôle sont souvent difficiles à identifier par le biais de l'archéologie. Les productions de cuivre de KWPV s'inséraient dans un modèle de pratique communautaire (« *community practice* » ; T. O. Pryce et al., 2011 d; V. C. Pigott, 2019, p.44). Au niveau des contextes funéraires, un cercueil creux a été découvert à NKH (op. 1, Burial 8). Ce mode de tombe peut être comparé à celui identifié pour les sites contemporains de *Dong son* au Vietnam comme Chau Can ou Phu Luong (T. T. Luu, 1977; V. T. Ha, 1994) ainsi que le cimetière de l'âge du Bronze de Ban Non Wat (C. F. Higham et A. Kijngam, 2012).

Ensuite, le TAP, puis le LoRAP, ont mis au jour plusieurs sites satellites à la vallée de Khao Wong Prachan. Il s'agit des sites de Non Mak La, Tha Kae, Khao Sai On et Khok Din (V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997; F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013; V. C. Pigott, 2019) Non Mak La est un site funéraire et d'occupation qui serait contemporain aux sites de NPW et NKH, avec quelques preuves de la réalisation d'activités métallurgiques dont des scories, des fragments de creusets, des fragments de minerais, des moules coniques et bivalves, des fragments de cheminées, ainsi que deux lingots de forme plan-convexe en cuivre potentiels. Les deux lingots découverts à Non Mak La sont les seuls exemples de ce type de lingot pour l'ensemble des sites de KWPV (A. Bennett, 1988 b; S. Natapintu, 1988; V. C. Pigott, 2019, p.45). L'activité métallurgique de Non Mak La serait proche de celle de NPW et NKH, avec l'utilisation de creusets (A. Bennett, 1989).

Khao Sai On a été identifié par le LoRAP et se situe à 28 km des principaux sites de réductions de KWPV (R. Ciarla, 2007). A Khao Sai On, la présence d'une mine ouverte a été identifiée, plusieurs sites de réduction de faibles ampleurs, ainsi que des évidences funéraires, comprenant les sites de Khok Din et Noen Din. Les sites ont livré des fragments de creusets, fragments de minerais, des scories, des fragments de cheminées et des moules bivalves. Les découvertes de Khao Sai On semblent montrer que différentes communautés de petites

ampleurs et/ou plusieurs familles exploitaient le cuivre (T. O. Pryce et al., 2011 d) ce qui renforcerait alors l'hypothèse d'une pratique communautaire à KWPV.

Tha Kae est un cimetière et un site de peuplement de l'âge du Fer avec des signes d'occupation durant la période Néolithique également (F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013), pour lequel des objets avec des signes d'un contact avec d'autres régions ont été découverts, notamment des perles en pierres semi-précieuses, ainsi que des volants de fuseaux en plomb. Les fouilles ont montré des signes de la présence de remparts et de fossés. Des objets à base de cuivre ont été découverts dans les tombes, ainsi que des scories.

Les sites de Khao Sai On et Tha Kae sont toujours en cours d'étude et donneront prochainement lieu à des publications. L'étude de certaines scories provenant de ces sites est également incluse dans BROGLASEA.

Tout comme pour Phu Lon, SEALIP a permis de définir une signature isotopique pour la vallée de Khao Wong Prachan (Pryce et al, 2011 ; 2014). Ces données montrent une signature bien définie. Des échantillons analysés, une scorie ne correspondait pas à la signature principale ; ce qui indique l'utilisation de minerais avec du plomb très radiogénique et le second est une hache de l'âge du Bronze. T.O Pryce avance alors l'hypothèse (Pryce et al, 2011, p.3320), que les anciens métallurgistes de KWPV aient pu importer du métal et/ou des matières premières d'un autre lieu, malgré la production locale. De plus, de tous les échantillons d'objets régionaux à base de cuivre analysés durant SEALIP, très peu ne semblent finalement concordants avec la signature de KWPV. Comment l'expliquer ? T.O Pryce proposait alors que l'échantillonnage de SEALIP n'ait pas encore couvert les sites et/ou la période chronologique où les productions de KWPV étaient exportées, ou que le cuivre de KWPV ait été fortement recyclé (Pryce et al, 2014, p. 289). Avec les nouvelles datations, nous savons maintenant que la Vallée de Khao Prachan était principalement active durant l'âge du Bronze. L'échantillonnage de SEALIP/BROGLASEA comprend majoritairement des assemblages de l'âge du Fer[17] ce qui pourrait venir expliquer pourquoi la signature de KWPV est faiblement représentée (Pryce, *pers.comm.*).

I.2.2. Les sites de production secondaires

1. Le plateau du Khorat (Thaïlande)

A. Les sites de la culture de Ban Chiang

Ban Chiang est situé sur le Plateau du Khorat dans le bassin du Nakon Sakon (Figure 10), au nord-est de la Thaïlande. Les plus anciennes preuves d'une métallurgie du cuivre à Ban Chiang sous forme d'objets datent entre les XI-IXèmes siècles av. J.-C, durant l'âge du Bronze, après

[17] Egalement parce que les sites de l'âge du Bronze découverts en Asie du Sud-Est sont beaucoup moins nombreux.

réévaluation par C. Higham et al. (2011b). Le site a livré des signes de consommations de métal au tournant des second et premier millénaires av. J. -C, mais également d'une production secondaire. Les ressources en cuivre et en étain sont absentes du bassin du Nakon Sakon. Le métal doit alors provenir de zones situées au moins à 100 km, si ce n'est plus, de Ban Chiang, des contreforts de Petchabun comme Phu Lon, ou du Laos (T. O. Pryce et al., 2014; T. O. Pryce, 2019)

La découverte d'objets en bronze et d'éléments associés à la production secondaire dans des contextes funéraires et d'habitat du début du premier millénaire av. J. -C apporte des données sur la nature des technologies et des consommations. Ces traces ont été mises au jour à Ban Chiang, mais également pour des sites proches comme Ban Na Di, Ban Phak Top, Ban Tong et Don Klang, sur lesquels les caractéristiques de la culture de Ban Chiang ont été définies. La plupart des objets en métal de ces sites sont des objets ornementaux, particulièrement des bracelets et des chevillières. La présence de creusets, et la rareté des scories montrent que la fonte des objets devait prendre place dans ces villages du Nakon Sakon, mais pas la réduction. Les creusets sont similaires en technique à ceux de Phu Lon, mais avec des dimensions un peu plus larges (J. C. White et al., 1991).

92 creusets de Ban Chiang, deux de Ban Phak Top, six de Ban Tong et deux de Don Klang ont pu être analysés (W. W. Vernon, J. C. White, et E. G. Hamilton, 2018, p.104). Les creusets de Ban Chiang font entre 64-93 mm de diamètre, 117 mm de long et 30-48 mm de hauteur (Figure 20). Le volume utilisable des creusets de Ban Chiang a été évalué entre 58 et 162 ml, ce qui porterait les quantités de métal produites entre 464 et 1295 g, permettant uniquement la fonte de petits objets. Alors que les creusets de Phu Lon ont été évalués entre 35 et 65 ml (W. W. Vernon, 1996, 1997), et ceux de Ban Non Wat entre 55 et 65 ml (H. Cawte, 2012). Les exemples de creusets entiers ou quasiment entiers montrent la présence d'un bec de coulée pour la fonte. Ils sont de forme ouverte, avec un fond convexe. Dans les creusets de Ban Chiang, des inclusions provenant d'ajout volontaire ont été identifiées : balle de riz, autres matériaux organiques, quartz, chamotte, parfois des scories. La balle de riz est la principale inclusion, identifiée pour 63 échantillons.

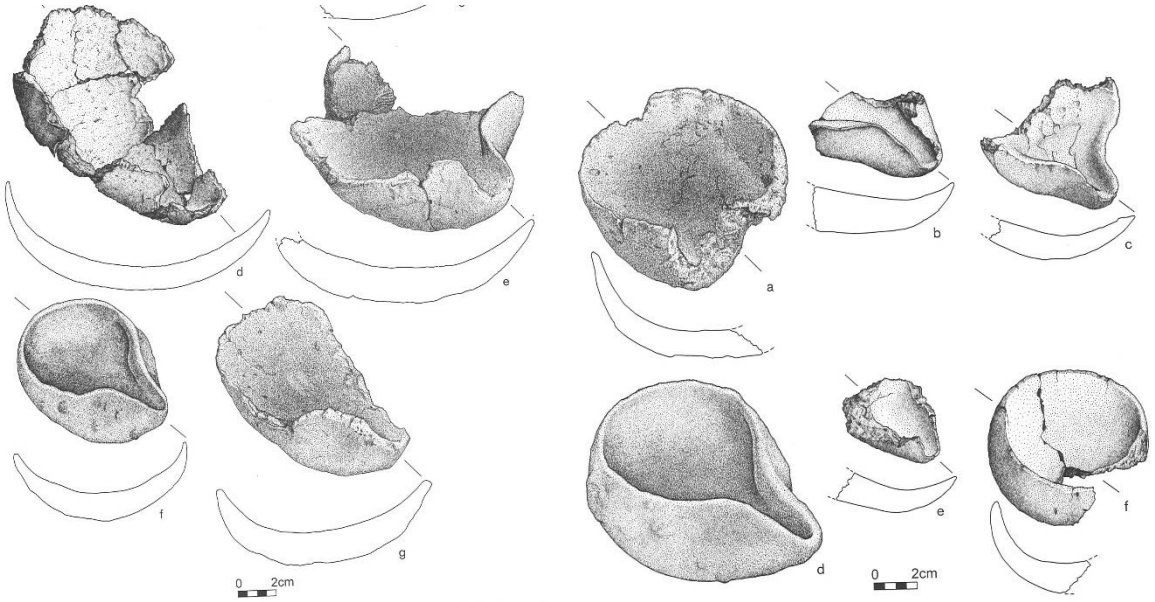


Figure 20 : Les creusets de Ban Chiang (image : Vernon et al, 2018, p. 106).

La présence d'une couche interne protectrice et de vitrification dans les creusets de Ban Chiang est une preuve indirecte d'une activité métallurgique (W. W. Vernon, 1997). La couche protectrice a pour la première fois été identifiée par William Vernon à Phu Lon. Cette pratique a depuis été observée pour la plupart des sites du nord de la Thaïlande (J. C. White et al., 1991; W. W. Vernon, 1996, 1997). La couche protectrice était présente pour 62 des 87 creusets et fragments de creusets de Ban Chiang, et 31 sur 96 de ceux de Phu Lon (W. W. Vernon, 1997). Cette pratique pourrait indiquer que les métallurgistes de Ban Chiang et de Phu Lon cherchaient à adapter les caractéristiques des céramiques techniques à l'usage auquel ils les destinaient. Cette pratique pourrait également provenir d'une transmission technique, appliquée par copie, et non d'une évolution entraînée par la pratique métallurgique locale. L'analyse des objets à base de cuivre découverts pour les sites de la culture de Ban Chiang semble démontrer que l'alliage majoritairement employé est le bronze (W. Rajpitak, 1983). Le répertoire des typologies d'objets est également assez restreint avec une préférence pour la fabrication de bracelets et d'outils (J. C. White et E. G. Hamilton, 2019, p.82).

Les creusets de Ban Phak Top, Ban Tong et Don Klang ont une composition similaire à celle des creusets de Ban Chiang. En revanche, le dégraissant est différent, notamment à Ban Tong. En effet, un mélange de chamotte et de balle de riz a été identifié dans les creusets de Ban Tong, suggérant une technologie différente de celle de Ban Chiang. Quelques fragments de moules en grès et en argile ont également été découverts à Ban Chiang, Ban Tong, Dong Klang et Ban Na Di (11 fragments de moules en argile principalement pour des bracelets), apparemment utilisés pour la fonte d'objets bivalves.

À Ban Na Di, une concentration importante de fosses liées à une activité métallurgique a pu être mise au jour (C. F. Higham et A. Kijngam, 1984; J. C. White et E. G. Hamilton, 2019, p.77). Ces fosses ont des diamètres entre 30 et 45 cm. Des fragments de creusets et de moules ont été découverts en association à ces fosses. Les fosses devaient surement être employées associées aux creusets comme foyer.

Les découvertes archéologiques de Ban Chiang, Don Klang et Ban Tong suggèrent que l'activité de ces sites était davantage axée sur une métallurgie secondaire de métaux à base de cuivre, pratiquée au sein d'un habitat où d'autres artisanats se retrouvent (W. W. Vernon, J. C. White, et E. G. Hamilton, 2018, p.122).

Les creusets découverts dans la région de Ban Chiang, et plus largement au nord de la Thaïlande, ont amené White et Hamilton à proposer l'existence de creusets qu'elles qualifient de « *Common Southeast Asian type* » (J. C. White et E. G. Hamilton, 2009) : des creusets ouverts avec de petites dimensions (environ 10 cm de diamètre) et un bec de coulée. Comme nous l'avons vu, les creusets de la vallée de Khao Wong Prachan ne correspondent pas à ces caractéristiques, par leurs dimensions plus larges et l'absence de bec de coulé. White et Hamilton désignent les creusets de KWPV comme « *Khao Wong Prachan crucible production type* ». T.O Pryce propose alors, assez logiquement, qu'il puisse exister des traditions de creusets différentes en fonction de l'usage et du type de site où ils sont employés : production primaire versus secondaire, activités de réduction versus fonderie (T. O. Pryce et al., 2010) plutôt que l'existence de types régionaux, comme nous le verrons aussi pour Vilabouly. De plus, les creusets découverts à Phu Lon sont très fragmentaires ce qui empêche d'estimer leurs dimensions.

B. Non Nong Hor

Le site de Non Nong Hor est connu pour être un des seuls exemples de site de production secondaire de tambours à base de cuivre d'Asie du Sud-Est. Il se situe à Ban Na Udom, dans l'actuelle Province de Mukdahan (16 °14'N, 104°37' E), à 160 km à vol d'oiseau du Complexe de Vilabouly. Il a été découvert en 1993-94 et a été exploré à plusieurs reprises par les archéologues de la 11ème FAD de l'office régionale (Ubon Ratchathani) afin de documenter les éléments archéologiques issus de découvertes des villageois ou de pillages. Ces éléments incluent des restes humains, des poteries, des pierres semi-précieuses (cornaline et agate), un collier avec un pendant en forme de lion, des ornements à base de cuivre, des cloches à base de cuivre (similaires à celles découvertes dans la vallée du Mun), des outils et des cloches ferreuses, des creusets, des moules pour haches et des lingots en cuivre qui n'ont jamais été analysés (S. Baonoed, 2010).

En 2009, le site a été exploré une nouvelle fois par la FAD afin de réaliser des prospections et des fouilles. Les prospections ont permis la découverte d'éléments à base de cuivre. Ces éléments incluent des tambours miniatures[18], deux fragments de tambours, des fragments de moules pour la fonte de tambour (18 fragments, conservés au Musée local de Na Udom-Non Nong Hor) et cinq noyaux d'argile, à priori liés à l'utilisation de la fonte à la cire perdue. Les fragments de moules possèdent des décors comparables aux tambours de type *Heger I* découverts en Thaïlande (S. Baonoed, 2016). Les fouilles ont montré la présence d'habitats, de contextes funéraires et de production de métal sur le site. Il semblerait qu'un atelier de production secondaire de cuivre soit en place, plus particulièrement pour la réalisation de tambours, ainsi qu'une métallurgie ferreuse.

White et Hamilton (2019, p. 94-95) font également mention de la présence de *slag cast* à Non Nong Hor, mais des informations plus précises nous sont manquantes. Ces artéfacts recensés comme *slag cast* pourraient également correspondre ici à des lingots coniques. Malgré l'absence pour le moment de datation absolue, les types d'artéfacts découverts semblent montrer une occupation de l'âge du Fer aux débuts de la période historique. Ces communautés auraient pu avoir un contact direct ou indirect avec les régions voisines et les côtes, en atteste la présence de biens importés, notamment les ornements en cornaline/agate (S. Baonoed, 2010, 2016).

C. La région de Phu Wiang

La région de Phu Wiang est située dans le coin nord-ouest du Plateau du Khorat. Cette région démontre une potentielle spécialisation sub-régionale durant le premier millénaire av. J.-C pour la production de type particulier d'objets en cuivre (J. C. White et V. Pigott, 1996). Dans la région de Phu Wiang, les sites de Non Nok Tha et Non Pa Kluay ont livré plusieurs exemples de haches, un groupe de moules complets en grès pour la fonte d'objets bivalves, un moule vierge pour hache, ainsi que des creusets (D. Bayard et W. G. Solheim II, 2009) plus larges que ceux de Phu Lon ou du bassin du Sakon Nakon (J. C. White et al., 1991). À Non Nok Tha de nombreux creusets ont été découverts en contexte funéraire. La concentration de sites avec des traces d'une métallurgie secondaire dans la région de Phu Wiang pourrait provenir de la distribution des ressources en grès, une matière première nécessaire à la fabrication des moules, qui sont abondantes dans la région. Les sites de Phu Wiang se situent seulement à quelques kilomètres de la source de matière première pour les moules, alors que le grès est absent du bassin du Sakon Nakon, où se trouve Ban Chiang par exemple. En revanche, tout comme l'exemple du site de Ban Chiang, les minerais de cuivre ou d'étain ne sont pas présents

[18] Aucune définition formelle n'existe pour les tambours miniatures mais ils ont généralement un diamètre de 200 mm et une hauteur de 150 mm, alors que les grands tambours peuvent atteindre 600 mm de hauteur (C. Le Meur et al., 2021).

dans l'immédiate proximité du site. Les communautés de la région du Phu Wiang, tout comme celles de Ban Chiang, obtenaient leurs matières premières ailleurs.

Non Nok Tha a été fouillé par William Solheim en 1965-66 et Donn Bayard en 1968. Il apparaît principalement comme un site funéraire dont certaines sépultures ont livré des objets en cuivre (D. Bayard, 1984; D. Bayard et W. G. Solheim II, 2009, p.249-261) et pour lequel la présence d'une activité métallurgique peut également être décelée avec la découverte de déchets de coulées à base de cuivre et des creusets (Figure 21). La présence d'éléments liés à l'activité métallurgique dans certaines sépultures de Non Nok Tha a amené Solheim et Bayard (2009) à les associer à des « tombes de fondeurs » (*founder's burials*).

Quatre creusets ont été découverts complets ainsi que douze fragments. La forme des creusets de Non Nok Tha se rapproche une nouvelle fois de celles identifiées pour les creusets des sites associés à la culture de Ban Chiang, avec un bec de coulée et une forme ouverte (J. C. White et E. G. Hamilton, 2019, p.84). L'estimation du volume contenu dans les creusets a été placée entre 1 et 2,2 kg de métal fondu.

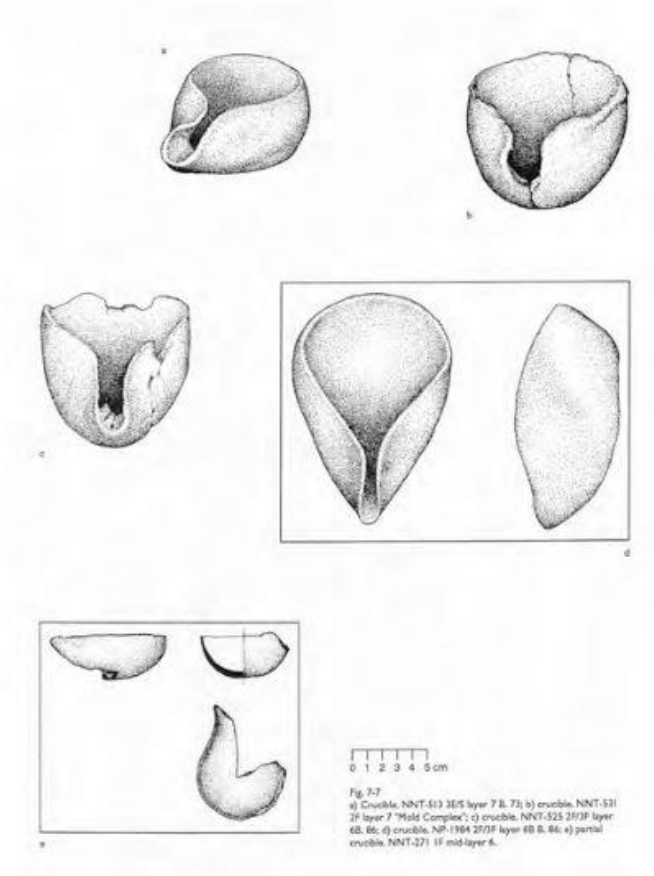


Figure 21 : Les creusets de Non Nok Tha (Bayard et Solheim, 2009, p. 260).

D. Ban Non Wat

Le site de Ban Non Wat au nord de la Thaïlande possède la séquence archéologique la mieux datée pour l'Asie du Sud-Est de la fin de la préhistoire, du Néolithique (1700 av. J.-C) à l'âge du Fer (500 ap. J. C). L'occupation du site se poursuit également durant la période historique. La transition entre le Néolithique et l'âge du Bronze a été datée de 1050-1000 av. J.-C, et celle avec l'âge du Fer vers 400 av. J.-C (C. F. Higham et T. Higham, 2009; C. F. Higham et A. Kijngam, 2012). Il occupe un emplacement privilégié dans la haute vallée de la rivière Mun durant presque deux millénaires, et se situe dans une région riche en sel (P. Rivett et C. F. Higham, 2007; A. Halliwell, A. Yankowski, et N. Chang, 2016). Les sept saisons de fouilles ont permis de mettre au jour un vaste ensemble funéraire (637 sépultures) ainsi que des zones d'habitat et d'artisanat, en particulier pour la métallurgie.

Les activités liées à la pratique de la métallurgie sont donc omniprésentes à Ban Non Wat, principalement pour la métallurgie du cuivre, mais également pour la forge de fer et la fonte de plomb (H. Cawte, 2012). Concernant la métallurgie du cuivre, des preuves de cette pratique se révèlent à la fois pour le mobilier funéraire retrouvé dans les tombes, mais également par la présence d'aires de travail visiblement associées à cette pratique, avec la découverte de fosses en argile et la distribution de creusets, ainsi que de moules (Higham et Kijngam, 2012). Le pic d'activité de cette production métallurgique semble se situer durant l'âge du Bronze, alors qu'un déclin dans la quantité de mobilier découvert s'observe durant l'âge du Fer. Une tombe (549), dite *tombe du fondeur*, a livré un assemblage très important de moules pour la fonte de bracelet (25), ainsi que quatre pour la fonte de haches.

Les creusets et les moules ont été étudiés par H. Cawte (2012, p.458-486). La majorité des creusets découverts à Ban Non Wat sont fragmentaires (Figure 22) et représentent environ 25 % de la forme complète. Cawte distingue deux types de creusets en observant la forme des parois : un type avec des parois arrondies, et l'autre plus fuselé. De manière intéressante, la forme des parois semble se corréler avec d'autres caractéristiques, suggérant un usage différent de ces deux types de creusets. Les fragments avec parois arrondies sont plus friables, et semblent avoir de plus larges dimensions avec une couche de scorie interne plus fine, composée en majorité de cuprite. Les creusets avec des parois fuselées sont de plus petites dimensions avec un volume de c.55-65 cc, moins friables, et possèdent un bec de coulée. Tous les creusets analysés ont démontré la présence d'éléments cuivreux, ou communs à la métallurgie du cuivre, comme l'étain.

Pour les creusets de Ban Non Wat, une couche protectrice interne riche en silice est également observée, souvent composée de plusieurs couches, alternée par des couches de scories. Ce revêtement est une technique similaire à celle observée pour Phu Lon, Ban Na Di ou Ban

Chiang. L'étude de ces creusets confirme donc que la métallurgie du cuivre était pratiquée à Ban Non Wat, elle correspond à une activité secondaire, car les creusets semblent montrer un usage préférentiel pour la réalisation d'alliage, peut-être également d'affinage et pour la fonderie. La pratique de la fonte d'objets est renforcée par la découverte de 379 moules, dont la majorité correspond à des moules bivalves. Deux catégories de moules semblent se distinguer : l'une pour la coulée de haches, burins et pointes, la seconde pour des objets ornementaux, principalement des bracelets.

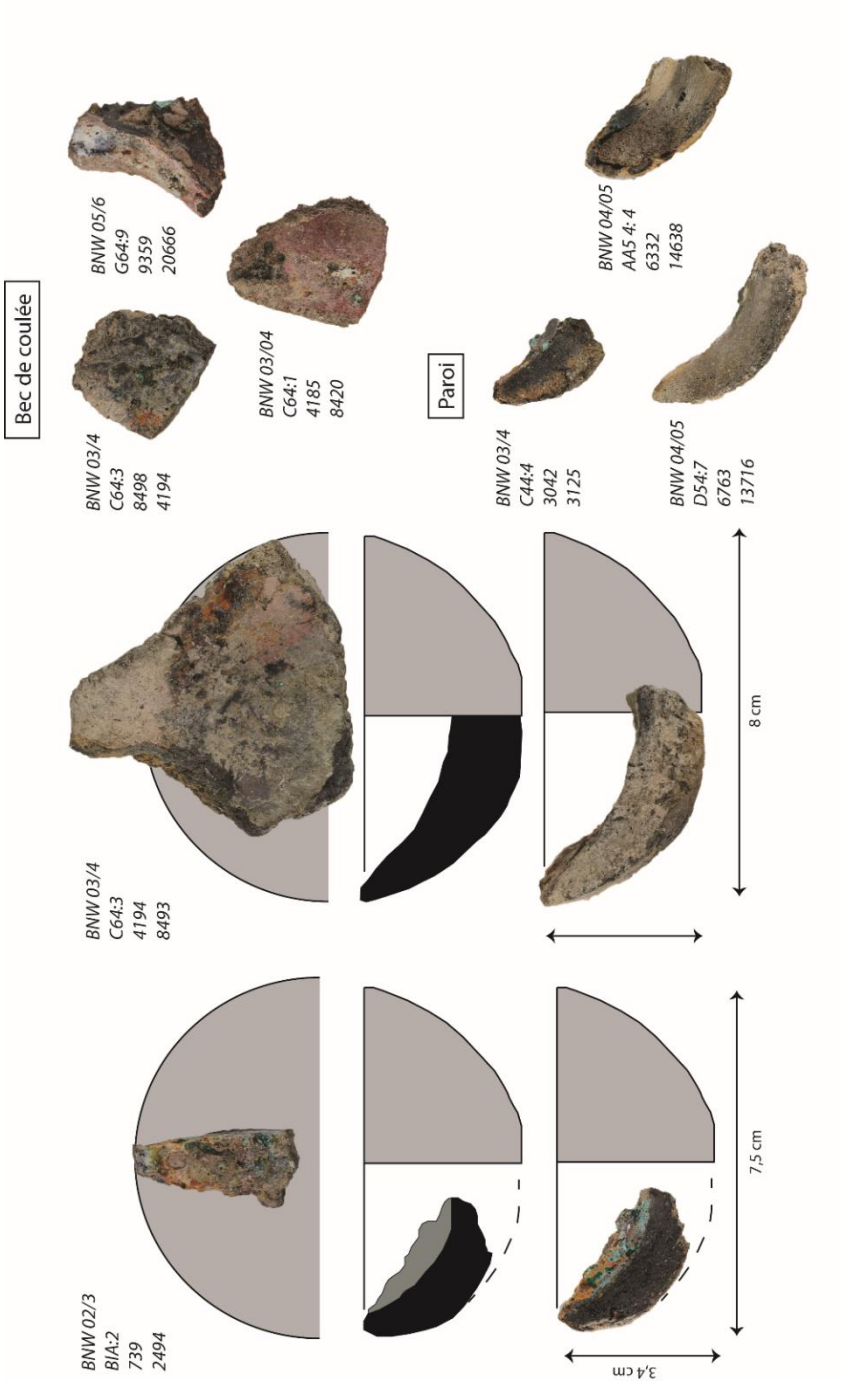


Figure 22 : Fragments de creusets de Ban Non Wat (image : auteure). Les fragments de creusets de BNW étaient disponibles au LAPA dans le cadre de BROGLASEA, courtoisie de C. Higham et A. Kijngam.

Une sélection de dix objets à base de cuivre de l'âge du Bronze du site de Ban Non Wat a été analysée par Pryce (2011), principalement des haches. Seule la composition élémentaire de trois échantillons a pu être déterminée à cause de l'état de corrosion très avancé des autres échantillons. Cinq échantillons, dont un non allié (BA2=1000-900 BC), ont alors été déterminés concordant avec la signature isotopique de la vallée de Khao Wong Prachan, alors que deux autres sont proches de celle du Complexe de Viabouly. Il semblerait donc que KWPV ait fourni en cuivre le site de Ban Non Wat au début de l'âge du Bronze.

2. Les sites portuaires de la péninsule Thaï-malaise

Une seconde région de Thaïlande mérite une attention particulière pour les sites de métallurgie secondaire. De plus, elle permet d'aborder une situation géographique, une organisation et une industrie différente des sites que nous venons d'évoquer. Il s'agit des sites côtiers de Khao Sam Kaeo (noté KSK) et Khao Sek (KS) au nord de la péninsule Thaï-malaise (voir aussi partie I.I).

Les traces d'une activité liée à la métallurgie se regroupent sur une des collines de KSK, dans un quartier, avec différents mobiliers : des objets en métal et des céramiques techniques de différents types (M. Murillo-Barroso et al., 2010). L'étude des objets en métal a permis de mettre en évidence des influences stylistiques provenant de lieux variés : d'Asie du Sud, de la culture de *Dong son* au Vietnam (tambours) et de la Dynastie des Han de l'Ouest en Chine (T. O. Pryce, B. Bellina, et A. Bennett, 2006). Parmi ces objets, un lingot de bronze à haute teneur en étain a également été découvert en surface. L'étude des céramiques techniques a permis de montrer la présence de moules, ainsi que de creusets, prenant visiblement part à la production de bronze. La nature exacte du procédé de production n'a pas été identifiée avec seulement deux fragments de creusets. Les fragments de céramiques techniques, vraisemblablement employées comme creuset, et comme moule, pour la métallurgie à base de cuivre ont des formes proches de céramiques techniques datées du premier millénaire av. J.-C au Bengale occidental (site de Tilpi) et au Rajasthan (T. O. Pryce et al., 2017), suggérant peut-être une origine de cette technologie du sous-continent indien.

Les signes d'une activité métallurgique à Khao Sek regroupent une céramique vitrifiée, un fragment amorphe de cuivre, un tambour de type *Dong son* et trois bols (T. O. Pryce et B. Bellina, 2017). Les résultats montrent que le tambour est composé majoritairement de cuivre avec environ 1 %mass. d'étain alors que les bols sont des bronzes à haute teneur en étain. Les caractéristiques des bols sont en accord avec les bols de type indien retrouvés en Asie du Sud-Est. Bien que le tambour possède une stylistique associée aux tambours dits de *Dong son,* sa composition et microstructure ne correspondent pas aux exemples connus qui sont généralement composés de bronze, ou bien de bronze au plomb. Le tambour de KS

apparaîtrait alors comme une imitation, potentiellement locale (T. O. Pryce et B. Bellina, 2017).

Les sites de KSK et KS possèdent donc les signes d'une métallurgie secondaire. La péninsule Thaï-malaise est connue pour ses riches dépôts en étain. En revanche, le cuivre en est presque absent. Le cuivre nécessaire à la réalisation des bronzes devait donc provenir d'une source externe, et avoir été importé. Une question demeure : est-ce que les objets en métal avec une typologie marqueuse d'échanges étaient produits localement ou étaient-ils importés ? L'identification d'un tambour à KS, reflétant une potentielle imitation ancienne locale, pourrait venir montrer que ces objets avec des typologies non régionales pouvaient potentiellement être produits localement selon des styles non locaux. L'analyse isotopique de 11 échantillons de métal de KSK (Pryce et al, 2011 ; 2014) ne montre pas de correspondances avec les sites actuels d'extraction et de production connus en Asie du Sud-Est. De plus, les résultats suggèrent des signatures très variées.

Contrairement aux autres sites de productions évoqués qui reflètent des productions développées à l'échelle de communautés, les preuves mises au jour à Khao Sam Kaeo et Khao Sek semblent montrer la présence d'une autorité hiérarchisée proto-urbaine (KSK) impliquée dans les échanges maritimes de différents biens (verre, objets en pierres dures, céramiques, métal), regroupant différents artisanats spécialisés, dont la métallurgie du cuivre.

3. Synthèse

La métallurgie du cuivre primaire de la fin de la période préhistorique en Asie du Sud-Est se caractérise à l'heure actuelle par trois sites : Phu Lon, la vallée de Khao Wong Prachan et le Complexe de Vilabouly, dont seule la vallée de Khao Wong Prachan a pu être largement étudiée selon une approche archéométrique. Son étude a permis de montrer la présence d'une activité de réduction employant un mélange de minerais et des creusets comme vaisselles de réactions, dont la production semble plus particulièrement orientée vers des lingots, en atteste la forte présence de moule conique et des fines plaques cordiformes en cuivre. L'utilisation des creusets semble être généralisée à la fin de la période préhistorique puisqu'on les retrouve également pour Phu Lon, ainsi que de nombreux sites de productions secondaires. Les creusets semblent avoir été employés pour différentes étapes du procédé métallurgique, de la réduction à la fonderie, en passant par la réalisation d'alliage, ou encore l'affinage. Hormis KWPV, qui a livré une vaste séquence archéologique et plusieurs tonnes de matériel en lien à l'activité de production, les autres sites de métallurgie du cuivre, plus particulièrement les sites secondaires, semblent être associés à d'autres artisanats à petite échelle pratiqués au sein de sites d'habitats comme Ban Chiang ou Ban Non Wat. Les objets produits sont en majorité composés de bronze, qui est l'alliage le plus fréquemment rencontré

pour les objets à base de cuivre de la fin de la préhistoire. Le second alliage majoritaire correspond à des bronzes au plomb (T. O Pryce et al, 2011 ; T. O Pryce et al, 2014). Les types d'objets produits demeurent dans un répertoire relativement restreint et simple, correspondant à des objets utilitaires, comme des haches ou encore des pointes de lances, ainsi qu'à des objets ornementaux comme des bracelets ou des bagues. Durant l'âge du Fer, des formes plus complexes d'objets commencent à se faire percevoir comme des spirales, des cloches ou encore les tambours dits de *Dong son*.

La production du cuivre de la fin de la préhistoire en Asie du Sud-Est continentale semble être associée à des procédés relativement simples qui auraient pu se développer indépendamment pour plusieurs zones géographiques. Ces procédés auraient pu parvenir en Asie du Sud-Est suivant des transferts initiaux d'idées et/ou de techniques qui pourraient n'être que partiels, car leur mise en place demeure accessible. Les caractéristiques ainsi mises en avant constituent des évolutions nécessaires pour la production du cuivre, répondant à des besoins généralisés (réduire, contenir du métal fondu, le couler, etc.). On les retrouve d'ailleurs pour les débuts de la métallurgie (plus anciens) sur d'autres sites en dehors de l'Asie du Sud-Est, comme en Géorgie (N. L. Erb-Satullo, B. J. J. Gilmour, et N. Khakhutaishvili, 2015), en Espagne (R. Saez et al., 2007; F. Nocete et al., 2008), au Portugal (E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010), en Iran (A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003) ou encore en Bulgarie (T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016).

4. SEALIP/BROGLASEA et Le Complexe de Vilabouly

Le Complexe de Vilabouly, découvert durant les années 2000 par les archéologues Viengkeo Souksavatdy et Thongsa Sayavonghamby du *Lao Department of National Heritage*, est le dernier des trois sites de production primaire actuellement connus. Il sera plus largement développé tout au long de cette thèse. Nous voulons dresser ici les fondements à l'origine de l'étude, notamment de la place qu'occuperait Vilabouly dans les réseaux d'échanges régionaux, mise en avant par l'application des études de provenance en Asie du Sud-Est.

Suite à sa thèse sur la reconstitution technologique de la vallée de Khao Wong Prachan (T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010), T.O. Pryce débute un projet en 2008, SEALIP (*Southeast Asian Lead Isotope Project*) qui est toujours en cours par le biais de l'ANR BROGLASEA (*Bronze and Glass as Cultural Catalysts and Tracers in Early Southeast Asia*) dans lequel s'insère cette thèse. Ces projets visent à la constitution d'une base de données pour les échanges de métaux non ferreux et non précieux en Asie du Sud-Est (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014), également comparés à ceux du verre avec la contribution de Laure Dussubieux. Cette base de données regroupe pour la première fois un nombre significatif d'objets en cuivre d'Asie du Sud-Est et vise notamment la réalisation d'analyses isotopiques du plomb afin de tenter d'obtenir des

proxys aux interactions sociales dans la région. Plus particulièrement lorsque la région manque d'une typologie céramique, car les études sont encore trop peu nombreuses afin d'obtenir des référentiels à l'échelle de l'Asie du Sud-Est. Avant cela, des analyses isotopiques avaient déjà été réalisées sur un nombre plus restreint de sites au Cambodge notamment (Y. Hirao et J.-H. Ro, 2013), sans la mise en place d'une reconstitution de réseaux.

SEALIP s'est fait de manière progressive. Les données de départs regroupaient principalement les trois sites de production primaire afin de confirmer les hypothèses de provenance. Puis au fil du temps les signatures d'objets de divers sites en Asie du Sud-Est sont venues les enrichir, datées principalement de l'âge du Fer d'Asie du Sud-Est continentale. SEALIP a démontré la complexité des réseaux d'échanges de métaux à la fin de la préhistoire, notamment par la présence d'imports pour le site de production de KWPV, le potentiel échange de matières premières entre Vilabouly et Phu Lon, ou des échanges de longues distances. De plus, les résultats ont permis pour la première fois de mettre en lumière la présence du Complexe de Vilabouly dans les réseaux d'échanges, avec des objets concordants en Thaïlande et jusqu'au Myanmar actuel. En effet, des échantillons provenant de 31 sites en Asie du Sud-Est (aujourd'hui ce nombre s'élève à 108 avec BROGLASEA) ont pu ainsi être analysés, et très peu semblaient correspondre à la signature de KWPV et de Phu Lon, qui étaient pourtant, à l'époque, les principaux sites connus. Bien qu'elles ne puissent pas toutes être définies comme parfaitement concordantes, une partie des signatures isotopiques se retrouvait proche de celle du Complexe de Vilabouly. Ces résultats suggèrent que Vilabouly, et/ou d'autres sites utilisant des dépôts avec des âges géologiques similaires aient fourni en cuivre une part des sites étudiés. Pour la première fois, ces données pourraient suggérer une intégration des communautés des montagnes (Pryce, 2013, p. 27-46) au sein des réseaux d'échanges en Asie du Sud-Est continentale, et peut-être même au-delà.

I.3. Problématiques : de la métallurgie extractive aux réseaux d'échanges

Nous venons de dresser un panorama des connaissances en métallurgie ancienne du cuivre en Asie du Sud-Est à la fin de la préhistoire. Une période charnière dans l'Histoire de la région, amenant l'Asie du Sud-Est vers un modèle de socialisation complexe avec la naissance d'autorités hiérarchisées. Il est maintenant largement accepté que la naissance progressive de ces autorités vient d'une forte interaction avec les régions voisines de Chine et d'Inde actuelles où elles ont déjà vu le jour, mais également via un processus d'appropriation et d'adaptation culturelle important avec des modèles déjà en place variant en fonction des régions et des sites. La région possède une longue et ancienne tradition de mobilité et de contacts ayant notamment mené à l'émergence de l'agriculture, puis de la métallurgie du cuivre/bronze vers les XIII/Xèmes siècles av. J.-C, bien que les circonstances en soient encore quelque peu débattues (J. C. White et E. G. Hamilton, 2009, 2018 a; F. Rispoli, R. Ciarla, et V.

C. Pigott, 2013; R. Ciarla, 2013). Cette grande mobilité et forte interaction se sont poursuivies et intensifiées durant l'âge du Fer, menant au partage de mêmes cultures matérielles autour de la mer de Chine méridionale sous la forme de différents biens marqueurs d'échanges (céramiques, objets en verre, néphrite/cornaline/agate, objets à base de cuivre). Cette mobilité inclut également la circulation de personnes/marchands/artisans liée à l'intensification des réseaux d'échanges, qu'on perçoit par exemple dans la péninsule Thaï malaise (M. Murillo-Barroso et al., 2010; B. Bellina, 2018 a; B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019). Cette période a également abouti à l'incorporation d'une partie de l'Asie du Sud-Est dans le territoire chinois, au nord du Vietnam dans le delta du fleuve Rouge, ainsi qu'à l'annexion de territoires sous le joug d'élites au sud de la Chine (communautés de *Nan Yue*). Ces expansions et annexions chinoises ne suivaient visiblement pas une évolution linéaire, mais étaient progressives et éclectiques, résultant en un nombre de schémas d'appropriations variés entre les Han et les communautés locales en fonction des lieux (F. Allard, 2015; X. Wu et al., 2019).

L'âge du Fer voit également apparaître les premières formes pré-étatiques, notamment pour les territoires maritimes et les bassins fluviaux qui, stimulés par l'augmentation des échanges, mettent en place des centres organisés contrôlant des territoires et des ressources stratégiques. La compétition entraînée par l'augmentation des réseaux d'échanges entre ces différents sites côtiers aurait ainsi grandement participé à la naissance des premiers états (B. Bellina, 2007, 2018 b). L'accroissement des échanges maritimes aurait également profité et stimulé les communautés de l'intérieur des terres en fournissant en matières premières les grands centres côtiers.

C'est dans ce contexte de naissance des premières autorités socio-politiques, et d'un accroissement des échanges qu'il faut replacer le territoire du Laos actuel de la fin de la préhistoire. Il s'agit d'une région enclavée, située au croisement de différentes zones d'influences technoculturelles, où de grands centres politiques et sociaux commencent à se mettre en place durant l'âge du Fer, comme les royaumes du *Champa* (I. C. Glover et M. Yamagata, 1995) et de *Fu nan* au Vietnam (L. Malleret, 1959). Les découvertes archéologiques, plus particulièrement au sud du Laos, montrent également l'influence croissante de l'Empire khmer et de la culture Môn au début de la période historique. La place de carrefour que constitue le territoire lao amène donc à penser qu'il était le lieu de voies d'échanges, encore à définir, entre ces différentes entités en quête de matières premières, de voies de communications et de biens prestigieux. Cette stimulation aurait pu contribuer au rayonnement des productions de cuivre, qui est pour cette période un matériau clé qui circule activement dans les réseaux d'échanges (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014). Comme nous l'avons vu, très peu de témoins archéologiques de la fin de la préhistoire au Laos ont permis jusqu'à

maintenant d'aborder ces questions et le Laos se présente encore comme un blanc sur la carte de l'Asie du Sud-Est à la fin de la période préhistorique.

Le Complexe de Vilabouly, site de production de cuivre actif durant l'âge du Fer et probablement à l'âge du Bronze, constitue donc un témoin privilégié, et à ce jour unique de la potentielle contribution du territoire correspondant à l'actuel Laos dans ces courants de diffusions technologiques, économiques et culturels. De plus, Vilabouly permet de s'éloigner des centres majeurs côtiers impliqués dans les réseaux d'échanges maritimes afin d'appréhender le rôle joué par un site de l'intérieur des terres, d'une région montagneuse, à priori éloignée des voies maritimes. De plus, les connaissances en métallurgie dans la région en sont encore à leurs débuts. Le Complexe de Vilabouly est seulement le troisième site de production primaire, le seul pour le Laos. Son étude permettrait donc d'enrichir notre compréhension des procédés métallurgiques anciens. Malgré sa découverte depuis les années 2000, aucune étude complète de vaste ampleur n'a encore été mise en œuvre afin d'essayer d'appréhender les techniques métallurgiques à Vilabouly.

Par l'étude du Complexe de Vilabouly et de sa production de cuivre, le but sera d'observer les potentiels transferts techniques et les développements de la métallurgie du cuivre pour cette région du Laos à la fin de la préhistoire, ainsi que leurs implications plus larges à l'échelle de l'Asie du Sud-Est continentale pour la connaissance des sociétés protohistoriques.

Un des objectifs est donc d'étudier les différents éléments archéologiques liés à la production du cuivre mis au jour au Complexe de Vilabouly, via la mise en place d'une méthodologie archéométrique adaptée en laboratoire, en suivant le concept de *chaine opératoire*. Cette méthodologie permettra de définir les caractéristiques principales de cette production et de proposer une reconstitution de la chaine opératoire, de ses potentielles variations temporelles et/ou technologiques pour sa période d'exploitation.

Étant seulement le troisième site de production primaire de cuivre découvert en Asie du Sud-Est, il pourra ensuite faire l'objet d'une étude comparative avec les autres sites connus, notamment à la reconstitution proposée pour la vallée de Khao Wong Prachan (T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010, 2011 c; V. C. Pigott, 2019) afin de déterminer si un schéma similaire peut être distingué dans sa production.

Au travers de l'étude de sa production de cuivre, le Complexe de Vilabouly sera ensuite appréhendé à l'échelle suprarégionale, et de ce qu'il peut nous apprendre des communautés présentes durant sa période d'exploitation, à l'âge du Bronze/âge du Fer avec les caractéristiques de ces communautés travaillant le métal. La place des productions de Vilabouly dans les réseaux d'échanges pourra également contribuer aux questions de

circulation des biens, des techniques et des populations durant cette période clé de fin de la préhistoire et début de la période historique, en mettant en lumière des lieux de circulations potentiels, et peut-être préférentiels, matérialisant des barrières politiques et/ou socio-culturelles.

Chapitre 2 : Contexte archéologique et sélection du corpus

II.1. Le Complexe de Vilabouly

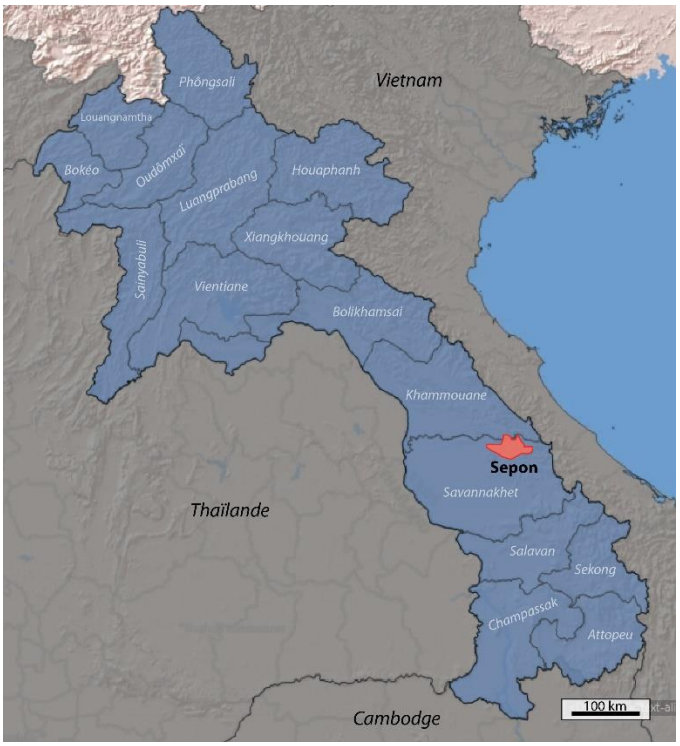
II.1.1. Historique des fouilles de sauvetage

Le Complexe de Vilabouly (anciennement connu comme *Sepon*, ou *Xepon*) se trouve au sein d'un district minier actif, d'extraction d'or et de cuivre, tenu par Chifeng/LXML (*Lane Xang Mineral Limited*, Figure 23). Les prospections et fouilles du Complexe de Vilabouly sont donc bien évidemment conditionnées par l'activité minière moderne, en suivant les plans de la concession, ainsi que des restrictions liées aux communautés locales[19]. Les équipes de fouilles ont seulement pu accéder à certaines zones dans la contrainte de l'emprise des plans miniers. L'évolution des plans d'extraction de la mine moderne a permis de mettre au jour de nouveaux sites anciens. Elle engendre aussi parfois, à terme, la destruction de certains, comme c'est le cas du site principal de l'étude, Puen Baolo, qui sera développé par la suite. La zone a également souffert des guerres d'Indochine durant la seconde moitié du XXe siècle, dont les stigmates ont laissé un grand nombre d'*UXO* (*UneXploded Ordnance*), nécessitant un déminage perpétuel, lorsque de nouvelles zones veulent être investies (S. Smith, D. Olberg, et A. Manini, 2005). Ces opérations de déminage à Vilabouly mènent parfois à la découverte de nouvelles zones et d'objets archéologiques, permettant ainsi d'orienter les recherches.

La richesse archéologique du Complexe de Vilabouly a pour la première fois été identifiée en 2001, commandée par LXML, lors de prospections du gouvernement lao dirigées par Thongsa Sayavonghandy et Viengkeo Soukstavatdy. Des campagnes de fouilles de sauvetage ont ensuite suivi à partir de 2008, dans le cadre d'une MoU (*Memorandum of Understanding)* entre l'Université James Cook (Queensland, Australie), le *Lao Department of National Heritage* de Vientiane, ainsi que la concession minière MMG/LXML, sous la direction de Thongsa Sayavongkhamdy, Viengkeo Souksavatdy et Nigel Chang. À partir de 2010 *The National University of Laos (NUoL) Faculty of Social Sciences* est également impliquée dans le projet pour l'apprentissage des étudiants, notamment. Ces équipes ont pu réaliser plusieurs saisons de fouilles de 2008 à 2016 dans différentes zones du Complexe de Vilabouly, s'étendant sur environ 10 km de long et 5km de large. Le Complexe de Vilabouly possède une longue période d'occupation, s'étendant du Néolithique (3000 av. J. -C), mais sans datation radiométrique, avec une activité principale durant la préhistoire tardive (env. 1000 av. J.-C – env. 700 ap. J.-C), jusqu'à la guerre d'Indochine au XXe siècle (A. Tucci et al., 2014). Des restes isolés de la période de Lane Xiang (1354-1707 ap. J.-C), représentés par des céramiques d'origines variées

[19] Certaines zones du Complexe de Vilabouly sont en effet associées à des croyances locales. C'est notamment le cas de Thong Na Nguak (*Dragon Field*) qui n'a pas pu être exploité par la mine moderne, ni fouillé par les équipes de recherche.

de cette période (Chine, Vietnam et Japon ; Shimizu et al., 2016), ont également été découverts. Le Complexe de Vilabouly possède une séquence d'activité majeure durant l'âge du Fer régional, avec des zones d'extraction et de transformation des minerais, ainsi que des évidences funéraires.



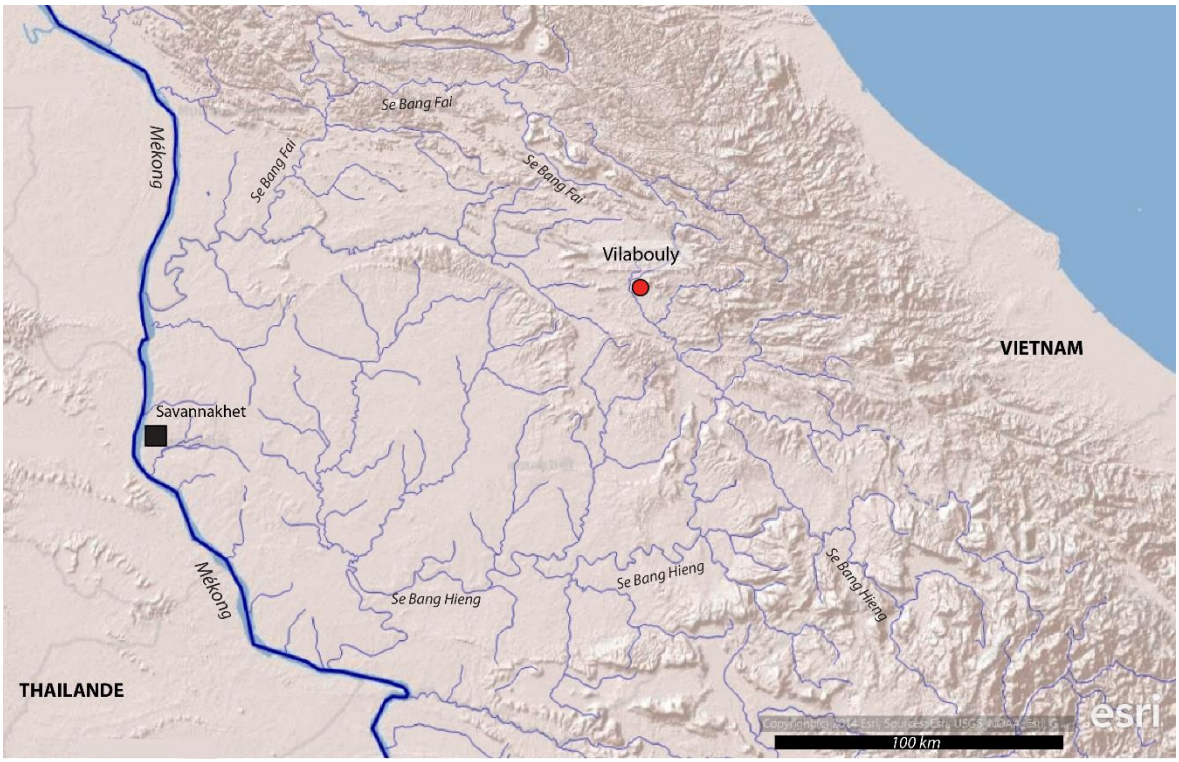


Figure 23 : En haut, localisation de la concession minière de Sepon (représentée par l'encadré rouge). En bas, la géographie de la province de Savannakhet (crédit carte de base : ESRI).

II.1.2. Géographie

Le Laos est un pays d'une superficie de 236 800 km^2, majoritairement montagneux. Sa densité de population est peu élevée par rapport aux autres pays d'Asie du Sud-Est continentale, avec seulement 31 habitants au km^2. Le Laos est encore peuplé par de nombreuses ethnies. 49 ethnies différentes sont officiellement référencées (G. Schlemmer, 2017), dont la plupart appartiennent à des minorités. Aujourd'hui, une distinction non officielle existe encore[20], principalement d'un point de vue de l'État, entre les lao bouddhistes vivant dans les plaines depuis longtemps intégrés dans un État, et les autres groupes animistes cultivateurs (agriculture sur brulis)[21] vivants en tribus dans les zones montagneuses. Les ethnies sont regroupées en trois grandes catégories : *Lao Lum* (Lao des plaines), *Lao Theung* (Lao vivants au pied des montagnes) et *Lao Sung* (Lao des montagnes) ; ainsi que quatre groupes linguistiques : Mon khmer (*Lao Theung*), Tai-Kadai (*Lao Lum*), Tibeto-Burmese et Hmong-Mien (*Lao Sung*).

Le Complexe de Vilabouly se situe au centre du Laos, à l'est de la province de Savannakhet (Figure 23), dont la population est majoritairement de langues Taï et austro-asiatique (G. Schlemmer, 2017, p.256) représentée par les ethnies *Lao*, *Phou Thay* et *Katang*. Cette région compte une zone de plaine à l'ouest, la plaine de Savannakhet, bordée par le fleuve Mékong qui constitue également une frontière naturelle avec la Thaïlande. L'est de la province est constitué de moyennes et de hautes montagnes avec la chaine annamitique à la frontière avec le Vietnam. Le Complexe de Vilabouly se situe dans une région montagneuse à 300 m au-dessus du niveau de la mer. La province de Savannakhet est également traversée par de nombreux cours d'eau, en plus du Mékong, dont les rivières Sé Bang Hien et Sé Bang Fai sont les principales. Selon la classification Köppen, le climat tropical de la province de Savannakhet, influencé par les moussons, est de type « Am » (climat de moussons) avec une saison humide de mai à octobre, une saison sèche froide de novembre à février et une saison sèche chaude en mars/avril.

II.1.3. Géologie

1. Contexte géologique

La structure tectonique de l'Asie du Sud-Est continentale est caractérisée par trois principales microplaques allochtones (terranes), comprenant des roches précambriennes et phanérozoïques. Le cadre géologique de l'Asie du Sud-Est continentale incluant le terrane Indochine nous intéressant a été décrit par différents auteurs (S. Bunopas et P. Vella, 1983; C. S. Hutchinson, 1989; R. B. Stokes, P. F. Lovatt Smitt, et K. Soumphonphakdy, 1996; C. Lepvrier

[20] Depuis la présidence de Kaysone Phomvihane, ces distinctions ont été remplacées par des catégories linguistiques.
[21] *Slash and burn agriculture*

et al., 1997; I. Metcalfe, 1999). Le terrane Indochine est un bloc allongé cratonique pouvant être divisé en terranes plus petits : le Massif de Kontum (Vietnam et sud du Laos), la ceinture Truong Son (Laos, Vietnam et Nord-Est du Cambodge, voir Hutchinson, 1989), la troisième est la ceinture Loei en bordure ouest de la terrane Indochine. La ceinture comprend des sédiments paléozoïques et des roches volcaniques entourant le terrane Indochine précambrien qui est répertorié pour contenir un certain nombre de dépôts hydrothermaux, particulièrement porphyre, épithermal, skarn, et des types de dépôts contenant des minerais. Le terrane Indochine (Indosinia) forme la région est de l'Asie du Sud-Est (Vietnam, Cambodge, Lao PDR, le centre et l'est de la Thaïlande) et est lié par le sud au terrane du sud de la Chine (Cathaysia), et à l'ouest au terrane Shan-Tai (Myanmar, ouest de la Thaïlande, Malaisie et Sumatra).

La cordillère Truong Son, ou chaine annamitique, à laquelle appartient le bassin de Sepon comprend un système allongé de montagnes consistant en des roches sédimentaires et volcaniques paléozoïques dans une ceinture nord-ouest, s'étendant le long de la bordure est de la terrane Indochine, du Vietnam central au nord du Laos. La géologie paléozoïque régionale de cette ceinture comprend des conglomérats, arkosiques, et des grès feldspathiques, des grès tufeux, shale, des calcaires variés, des siltites carbonatés et des calcaires dolomitiques.

Le Complexe de Vilabouly est situé au sein du District Minier de Sepon (SMD), dépôts d'or et de cuivre, sous la licence de Lane Xang Mineral Limited (LXML) sur environ 1250 km^2, en bordure sud de la cordillère nord-ouest Truong Son, sur la marge nord-est du terrane Indochine. Le dépôt Cu-Au de Sepon est le plus large dépôt polymétallique identifié jusqu'à ce jour au Laos. Il est également l'un des plus importants de la cordillère de Truong Son (Wang et al, 2020). Le bassin de Sepon est un bassin sédimentaire carbonaté et clastique de petite échelle, approximativement de 20 km de long pour 8 km de large, appartenant à un groupe de bassins de successions paléozoïques (P. Cromie et al., 2018). Le bassin de Sepon se compose de gneiss de la fin du paléozoïque, d'orthogneiss et de schiste appartenant au bloc indochinois (Figure 24). La concession est située à une altitude d'environ 300 m au-dessus du niveau de la mer, avec la partie centrale du district localisée à une longitude de 105°59'E et une latitude de 16°58'N. La stratigraphie du SMD comprend des sédiments continentaux fluviaux ainsi que des sédiments de zones marines peu profondes à profondes, d'âges dévoniens à carbonifères (R. H. Sillitoe, 1998; T. Manini et al., 2001; P. W. Cromie, 2010). Les gisements du Complexe de Vilabouly sont en majorité de type filonien. Au moins trois styles de minéralisations y sont identifiés : roches sédimentaires aurifères, des skarn auro-cuprifères et des filons de quartz porphyre à cuivre et molybdène. Trois types d'intrusions existent : rhyodacite-porphyre, stocks et dyke. Les ressources en cuivre ont été estimées à 1,336 million

de tonnes contenues dans quatre dépôts de cuivre supergène, nommés Khanong, Thengkham North, Thengkham South et Phabing. Khanong étant le dépôt le plus riche identifié. Les ressources en cuivre hypogène et supergène sont connues pour être majoritairement contenues dans des roches de types calcaires (formation dévonienne de Nalou et la formation Silurian-Dévonienne de Kengkeuk).

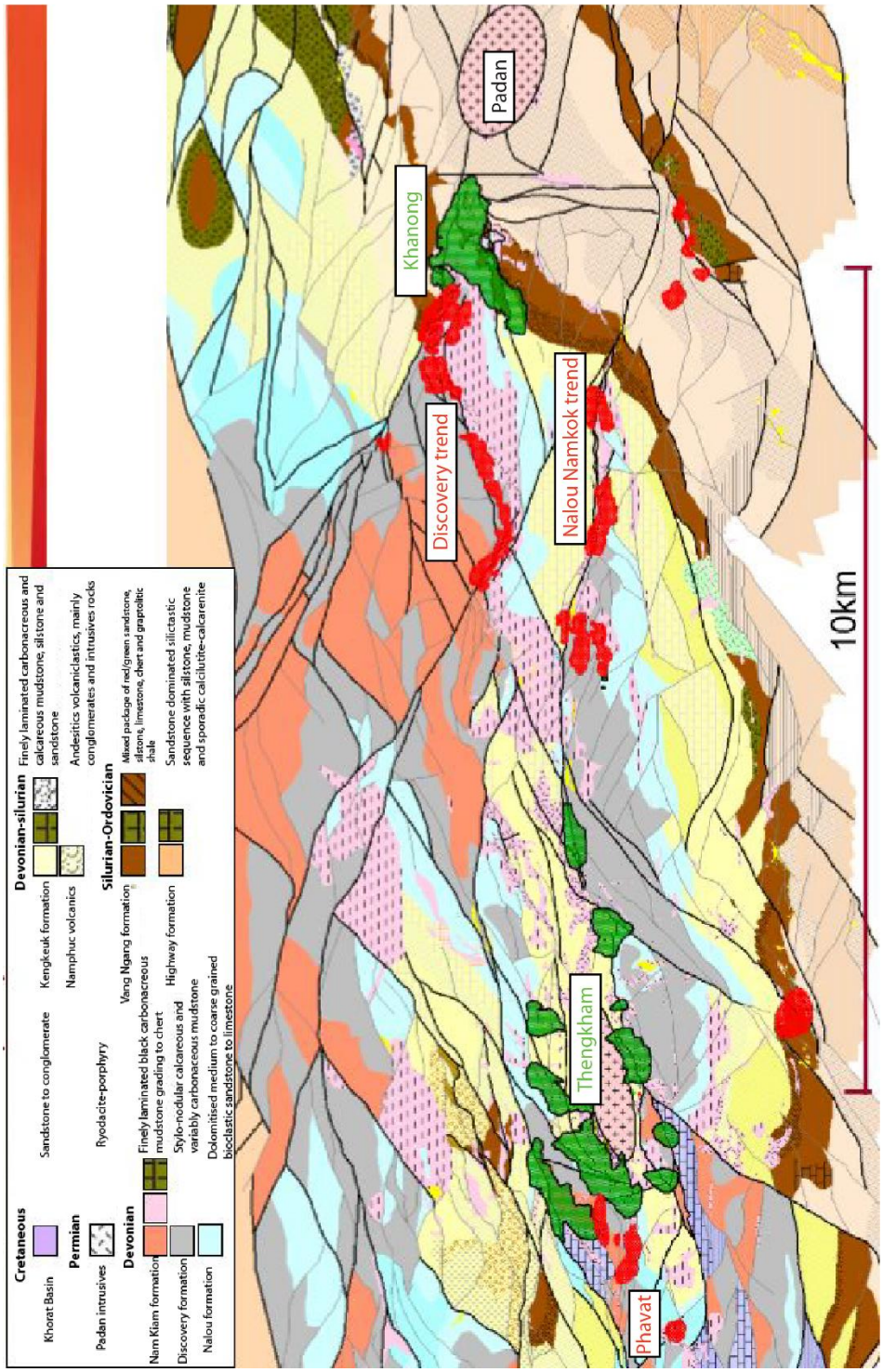


Figure 24 : Contexte géologique de la mine moderne de Sepon où se situent les sites archéologiques du Complexe de Vilabouly. En vert, ressources en cuivre et en rouge, ressources en or (d'après Cannell et al, 2015).

Khanong et Thenkgham sont les deux principales zones actuelles d'exploitations du cuivre (Figure 24). L'assemblage paragénétique du district semble être le même pour les deux zones, mais le dépôt de Khanong apparait plus riche en ressources supergènes, avec de larges dépôts de malachite ($Cu_2CO_3(OH)_2$) et de chalcocite (Cu_2S). Au moins trois principaux groupes de minéralisations de cuivre sont répertoriés pour le dépôt de cuivre de Khanong (Figure 25) : supergène, exotique et hypogène. Les deux principaux minerais de cuivre identifiés au Complexe de Vilabouly sont la malachite et la chalcocite. Les minerais de chalcocite tendent à être directement formés au-dessus des dépôts de cuivre primaire (chalcopyrite $CuFeS_2$ et pyrite FeS_2 principalement). Par endroits un mélange de pyrite/chalcopyrite primaire et de chalcocite se retrouve dans les dépôts. Les zones supergènes de malachite et de chalcocite ont des épaisseurs entre 20 et 100 m de profondeur pour l'ensemble du SMD. Les principales roches mères contenant les minerais de cuivre sont des skarn[22] et des calcaires, ainsi que de manière moins fréquente, des porphyres[23] et des schistes[24] noirs carbonatés. Il y a également des taux assez élevés de baryte ($BaSO_4$) secondaire remobilisés par les eaux souterraines, identifiés dans le SMD, souvent associés à la malachite. La pyrite (FeS_2) tend à être également fréquemment associée à la malachite dans les argiles qui entourent les minerais. Au-dessus de la couche supergène d'enrichissement, on trouve un profil bien développé, latéritique, formant des chapeaux de fer à la couche supergène, comprenant des blocs d'oxydes de fer et des argiles rouges ferrugineuses (J. Cannell, *pers. comm.*). Plus profondément dans les dépôts, des roches ferreuses massives sont également présentes formant de larges bandes, généralement identifiées à la bordure entre la chalcocite et la malachite sous-jacente (M. Stott, *pers. comm.*)[25].

Khanong (Figure 25) est environ long de 1,5 km, large de 0,5 km, et se compose d'une couche supergène riche en argile chalcocite (Cu_2S), associée à de la malachite ($Cu_2CO_3(OH)_2$), azurite ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$), cuprite (Cu_2O), cuivre natif et groupes de cuivre exotique. Les minéralisations de cuivre exotique consistent principalement en des oxydes de cuivre contenant du manganèse (MnO) et des agglomérats de cuivre-manganèse avec des taux de cuivre de 1,4 %mass. Ces deux types de minéralisations exotiques peuvent être associés avec de la malachite, azurite, cuprite et cuivre natif. Ce type de minéralisation se développe dans les premiers 25 m d'épaisseur, dans la zone supergène. La ressource principale de cuivre de Khanong correspond à des argiles chalcocite gris-noir, contenant de la chalcocite disséminée dans une matrice de kaolinite-séricite-quartz, avec le cuivre estimé à 4,9%. Des brèches et

[22] Une roche calcaro-silicaté
[23] Une roche magmatique
[24] Une roche sédimentaire, généralement formée par l'agglomération d'argile.
[25] James Cannell et Michaël Stott sont deux géologues de MMG et Chifeng-LXML respectivement qui ont travaillé pour la concession de Sepon.

agrégats de sulfure semi-massifs avec du quartz y sont également connus (S. E. Loader, 1999) pour traverser le principal horizon de cuivre chalcocite-argileux. Le cuivre hypogène à Khanong se retrouve dans des minerais massifs, semi-massifs et en veines comprenant des pyrites (FeS_2)-chalcopyrite ($CuFeS_2$) et de quartz-pyrite-chalcopyrite.

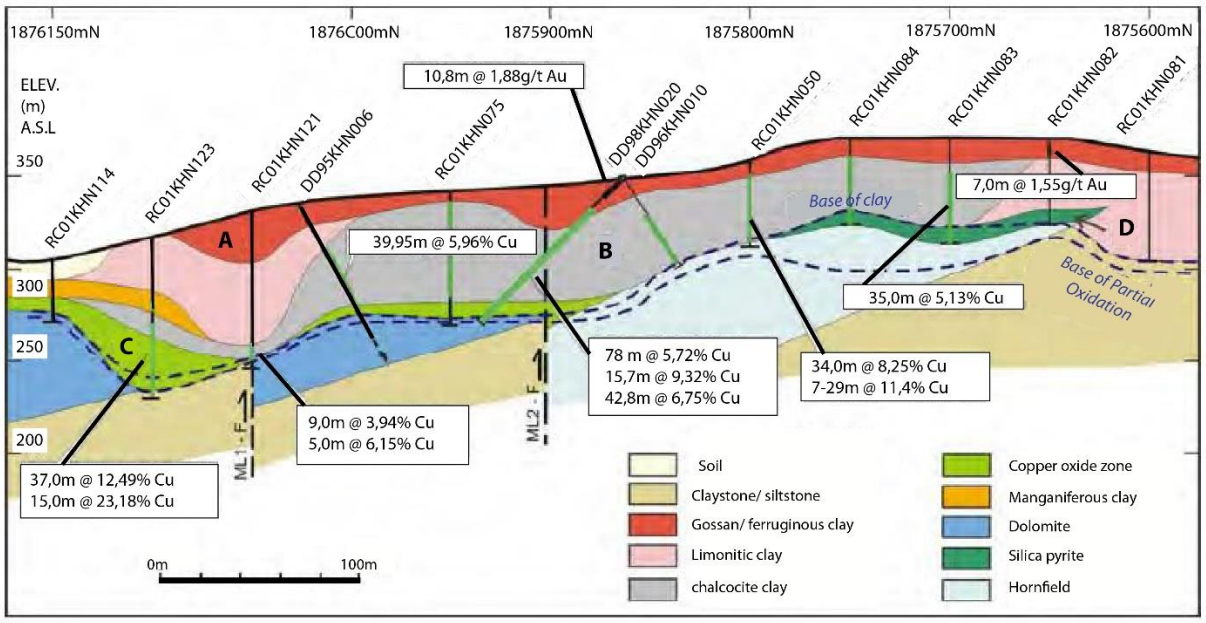


Figure 25: Coupe géologique du dépôt de cuivre de Khanong (image : Manini et al, 2001).

Thengkham se divise en trois dépôts principaux de cuivre (Figure 26) : *Thengkham South*, *Thengkham North* et *Phabing*. À Thenkgham South trois types de roches sont connus pour abriter des minéralisations sulfurées : des dykes fortement altérés par la séricite, contenant fréquemment des veines de quartz avec un peu de pyrite et de chalcopyrite, ainsi que des traces de molybdénite. Ensuite, on trouve des roches dolomitiques qui étaient originellement des calcaires bioclastiques altérés par des skarn rétrogrades contenant des assemblages de sulfures. Et enfin, le troisième type de roche est des schistes noirs et des schistes calcaires contenant de la pyrite. Thengkham est beaucoup plus influencé par la géologie des skarn que Khanong qui est purement supergène, ce qui mène à des degrés de contaminants plus élevés pour Thengham, comme le plomb, l'hématite, le molybdène ou le zinc (M. Stott, *pers. comm.*).

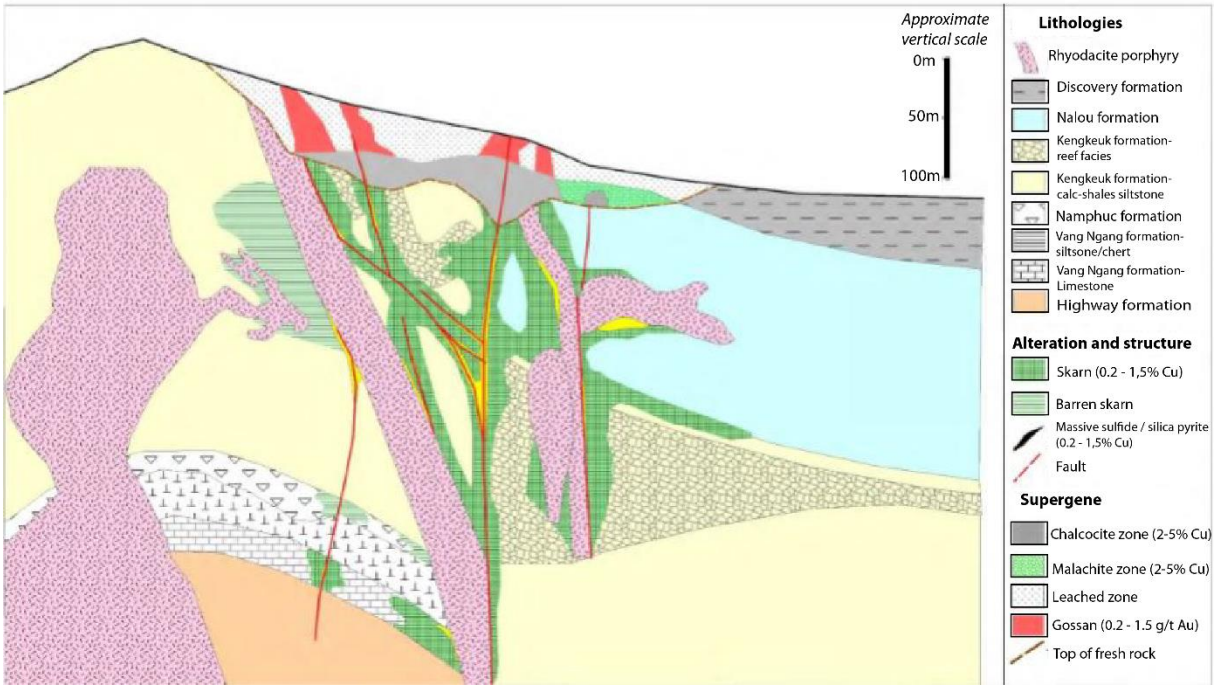


Figure 26 : Coupe géologique du dépôt de cuivre de Thengkham (d'après Cannell et al, 2015).

Au moins quatre types de minéralisations sont connus pour *Thengkham South* : des minéralisations de porphyres primaires cuivre-molybdène pauvre, des skarn prograde et rétrograde avec des sulfures de disséminés à massifs se retrouvant dans des poches, superposés. On retrouve également la chalcocite argileuse dans des poches. Enfin, on retrouve des minéralisations exotiques manganèse-cuivre. Les minéralisations de sulfures massifs primaires peuvent s'étendre jusqu'à 100 m d'épaisseur à *Thenkgham South,* contenant environ 0,5 à 1%mass. de cuivre. La zone de chalcocite recouvre la zone de sulfures, en formant souvent des dépressions et des poches.

Pour les dépôts de *Khanong*, le cuivre supergène est principalement associé à une couche de chalcocite (<75% de ressources en cuivre) et les restants se retrouvent pour la malachite, azurite et cuprite. Des poches de chalcocite (50% des ressources en cuivre) et le cuivre exotique sont également décrits pour la couche supergène de *Thengkham South* (P. W. Cromie, 2010). Les minéralisations hypogènes à *Khanong* et *Thengkham* sont principalement associées à des veines d'infiltrations de skarn rétrogrades avec des quartz-chlorite-épidote-chalcopyrite. Les minerais sulfurés présents dans la zone hypogène de *Khanong* et *Thengkham South* incluent : une base de veines métalliques avec de la pyrite, sphalérite et un peu de galène ; de la chalcopyrite et des traces de bornite dans des fractures et veines, et de pyrite riche en arsenic, remplissant les fractures des premiers sulfures. La gangue composant ces minerais inclut du grenat, épidote, chlorite, séricite, quartz, calcite et un peu de dolomite.

2. Historique des prospections minières

À partir de 1893, le Laos devient protectorat de la République française (M. Frometin-Libouthet, 2012). D'intenses prospections s'en suivent durant l'occupation française de l'Indochine, qui ont laissé de nombreux témoins. Les premières explorations se basant sur les récits de voyageurs et des populations autochtones s'intensifient également à cette époque. Il semblerait qu'il soit fait la mention de la région de Sepon dans un de ces récits. Une exploration de Ruhle, qui remonte la Sékong découvre le potentiel de la Haute Sésane et de la région d'Attopeu au sud du Laos où la Société d'Études des Mines d'Attopeu demande une concession en 1895, dans le bassin de la Sésouk pour l'exploitation de l'or (M. Mouscadet, 2013).

De nombreuses compagnies d'extraction minière voient le jour au Laos durant la période coloniale, conscients de la très grande richesse minérale du pays, par exemple la *Compagnie Minière du Haut-Mékong* ou encore la *Compagnie Générale des Mines de Thakhek* ayant pour but l'exploration des Provinces de Khammouane et de Savannakhet. Durant la période coloniale, les principaux minerais exploités sont le zinc et l'étain, mais la richesse en cuivre, or et plomb est également connue (M. Mouscadet, 2013). La *Compagnie Générale des Mines de Thakhek* réalise des sondages d'hydrocarbures à *Tchépone* (maintenant *Sepon* ou *Xepon* où se situe le Complexe de Vilabouly), mais les moyens mis en œuvre sont insuffisants et le forage, effectué jusqu'à 170 m, est abandonné. En 1928, il est question de la création de la *Société des Mines d'Or de Tchépone* comme gisement alluvionnaire, qui a visiblement perduré jusqu'en 1934. Le cuivre était également exploité dans les provinces d'Attopeu et Bassac sous forme de minerais sulfurés et carbonatés, en petites quantités (F. Blondel, 1932).

L'exploitation autochtone des gisements a persisté durant la période coloniale, car il s'agissait d'une exploitation saisonnière, de petite envergure ne gênant en aucun cas les volontés économiques du protectorat. Dans la Province de Savannakhet, les autorités françaises ont constaté que les locaux exploitent seulement l'or alluvial. Les villageois utilisent le plus souvent les ressources pour satisfaire leur propre besoin, également comme monnaie d'échange et d'impôt (M. Mouscadet, 2013). Les minerais proviennent en grande majorité des territoires ruraux montagneux peuplés d'ethnies, les *lao soung* (Hmong, Akha, Yao, etc.). Dans la culture lao traditionnelle, le rapport au sol a longtemps été perçu comme sacré (C. Archaimbault, 1985). L'exploitation traditionnelle des mines serait donc un exercice sacré, associé à nombreux cultes et cérémonies. Les villageois sont à la fois agriculteurs, mineurs et forgerons. D'après les observations de Gascuel dans la vallée de la Nam Pathène au début du XXème siècle, femmes et hommes sont présents lors de l'exploitation des gisements d'étain. Ils ont des rôles distincts : les hommes sont dans les puits pour exploiter les minerais et les femmes trient les minerais en surface, puis au village (Gascuel, 1905).

Après la fin de la Guerre froide dans les années 1990, le Laos commence à rechercher des investisseurs étrangers et ouvre les portes de ses ressources minières. Des opérations d'extraction de minerais d'or par la Russie ont été répertoriées entre 1983 et 1985 dans la région de Sepon (P. W. Cromie, 2010, p.4). En 1990, une prospection par la compagnie *Rio Tinto* a identifié le potentiel du district minier de Sepon (Vilabouly) comme une des trois aires sélectionnées en priorité pour les ressources en or du Laos (P. W. Cromie, 2010). La mine de Sepon a ensuite été pour la première fois exploitée en 2000, par *Oxiana Limited*, avec une première extraction d'or en 2002, alors que le cuivre a été exploité à partir de 2004. En 2009, la concession est rachetée par la compagnie chinoise MMG qui l'a exploité jusqu'en 2018, année durant laquelle elle a été vendue à la compagnie chinoise d'exploitation d'or *Chifeng*, qui l'exploite actuellement. Les échantillons dont nous disposons ont été obtenus en 2017 lorsque la concession était exploitée par MMG. Depuis le changement de propriétaire, en 2018, aucun retour n'a été possible à Sepon.

II.1.4. Archéologie

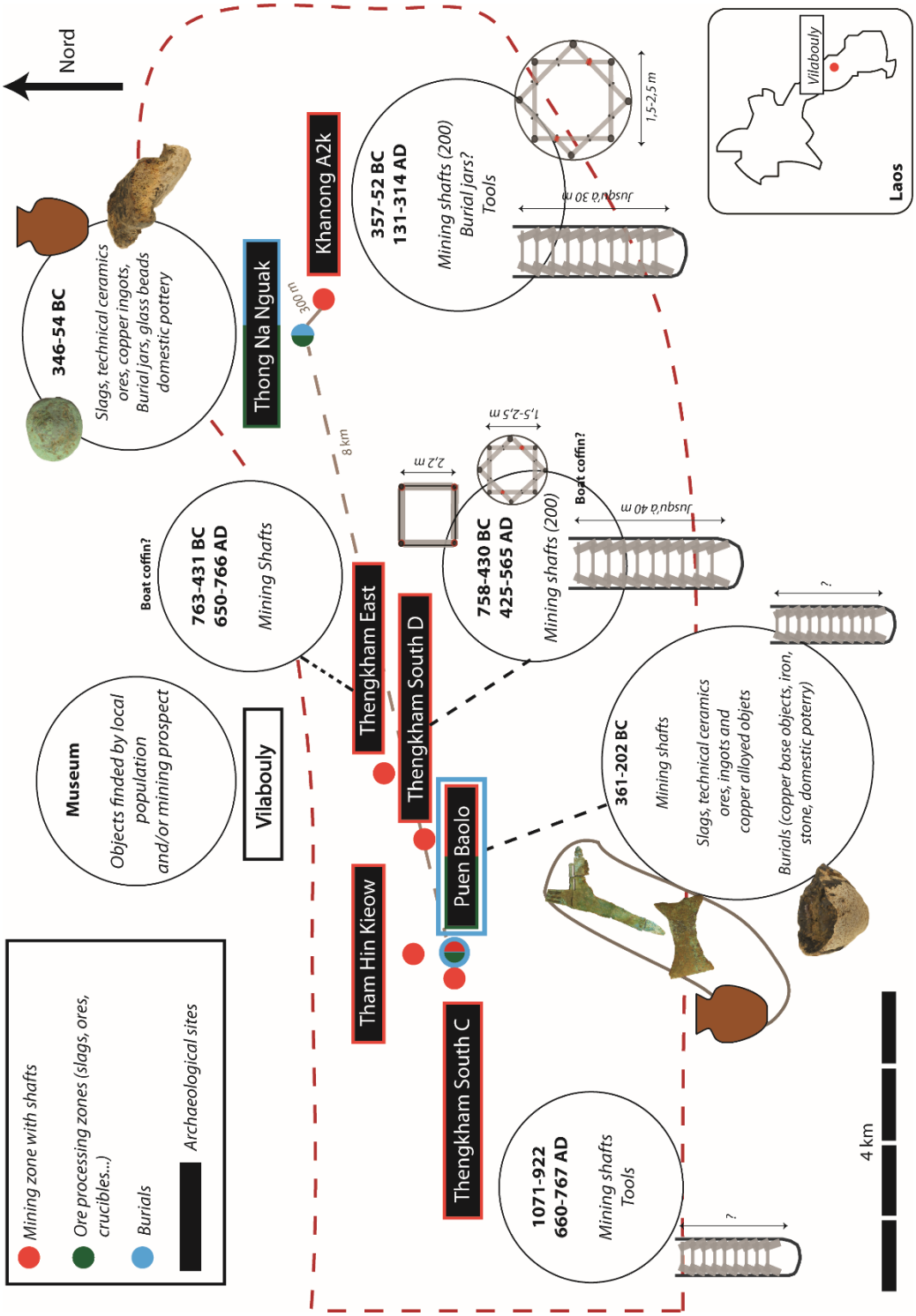


Figure 27: Schéma montrant les différentes zones archéologiques du Complexe de Vilabouly associées à leur datation et aux types d'éléments découverts.

1. Les aires d'exploitation minière

A. Khanong A2

Khanong A2 (Figure 27) est un site d'exploitation avec un vaste ensemble de puits de mine verticaux semblant lié au site de production de *Thong Na Nguak*, dont nous parlerons par la

suite. Une série d'échantillons provenant des structures d'étaiements en bambous/bois découvertes dans les puits de mine a pu être collectée. Huit ont permis des datations radiocarbones. Cette série de dates semble montrer deux périodes d'activités séparées par environ 200 ans : une première période vers 357-52 BC (2142+/-39 calBP, Tableau 2 et Figure 28) et une seconde vers 131-314 AD (1809 +/- 21 calBP).

Le site a pour la première fois été fouillé en 2009, avec environ 200 puits de mine verticaux séparés répertoriés. Certains d'entre eux contenaient des structures organiques d'étaiement en bois et en bambou préservées (A. Tucci et al., 2014, p.4) qui ont permis les datations. L'élargissement de la fosse minière moderne a permis une seconde série de fouilles en 2015. Cette dernière a nécessité une réponse rapide de l'équipe archéologique sur une très courte période afin de répertorier les potentiels restes archéologiques.

Ces deux séries de fouilles ont notamment permis d'observer pour la première fois les puits de mine verticaux, certains allant jusqu'à 30 m en dessous de la surface actuelle. La distribution des puits de mine s'étend de 150 m d'est en ouest, et de 60-70 m du nord au sud. Ils continuent vraisemblablement à s'étendre au-delà du puits de la mine moderne. Après la dernière fouille de 2015, il apparait clair que la zone de puits de mine s'étend davantage vers le nord, vers le site de *Thong Na Nguak* dont nous reparlerons. Le fond de la plupart des puits de mine semble atteindre la base de *Thong Na Nguak*, qui est adjacent. Les puits de mine représentent la profondeur à laquelle les principales minéralisations supergènes se retrouvent, puisqu'elles s'étendent entre 20 et 100 m de profondeur. Les puits de mine de Khanong s'étendent dans la zone supergène des dépôts de cuivre où se trouve de la malachite à 99%. Les 1% restants correspondent à de l'azurite et des traces cupro-allophanes contenues dans de l'argile manganésifère (M. Stott, *pers.comm.*). Les puits de mine ont été découverts dans la partie sud du dépôt de *Khanong* qui est plus riche en argiles ferreuses que la partie nord, rendant l'exploitation de cette zone plus simple pour les anciens métallurgistes, car le sol est plus tendre que la partie nord qui contient des roches dures. Les minerais sont moins riches dans la partie sud, mais la présence d'un sol plus tendre pourrait expliquer la concentration des puits de mine dans cette zone. Les fouilles n'ont en revanche pas permis de montrer si la zone des puits de mine s'étend davantage vers le nord, où se trouvent des dépôts plus riches en chalcocite, ce qui reste néanmoins probable. Certains géologues qui ont prospecté dans les années 1990 ont proposé que la partie nord (actuellement celle où se situe *Thong Na Nguak*) puisse être une zone d'exploitation à ciel ouvert, mais sans confirmation archéologique et aucune datation.

Il semblerait que les puits de mine soient des structures individuelles avec une extraction des minerais dans les 1,5-2,5 m de diamètre (Tucci et al, 2014, p.4). Le puits était ensuite

abandonné et rempli, un nouveau puits de mine construit à côté. À priori, aucune galerie horizontale ne semble exister entre les différents puits. Les caractéristiques de ces puits de mine laissent penser à des puits de recherches aveugles, ayant pour but la découverte de poches minéralisées. Une fois qu'une poche minéralisée était atteinte, elle était exploitée, puis le puits abandonné (F. Tereygeol*, pers.comm*.). Dans cette logique, les puits les moins profonds seraient alors les plus riches. Cela viendrait expliquer les différences de profondeur observées, le manque de galerie perpendiculaire et la concentration des puits de mine dans cette zone géologiquement riche en minerais de cuivre, comme le montre l'exploitation moderne de la zone.

L'équipe a également tenté de déterminer si des changements de structures pouvaient s'observer dans la profondeur des puits de mine à l'aide d'une petite pelleteuse. Aucun changement visible dans les structures d'étaiement en bois et en bambou n'a été observé. La structure d'étaiement a une forme d'étoile avec quelques variations. Elle se présente en deux parties, la première orientée à 45° (Figure 29) par rapport à la seconde, se répétant environ tous les 70 cm. La structure est maintenue à l'aide de fibres en rotins. Des panneaux en bambous et en bois servent à isoler verticalement le puits de mine de l'argile environnante (A. Tucci et al., 2014).

Le site de *Khanong* a également permis la découverte d'outils liés à l'activité d'extraction : un panier préservé à environ 25 m de profondeur ainsi que deux autres paniers en bambou tressés découverts dans deux puits de mine. À l'intérieur d'un puits de mine, une céramique brisée, mais intacte, a également été découverte. Elle contenait des fragments d'objets en fer non identifiés ainsi que des cendres, pouvant être associés à une urne funéraire.

Site	Date	Date calibrée
Puen Baolo	2204 +/- 20 BP	361-202 BC
	1940 +/- 20 BP	18-130 AD
Thengkham South C	2843 +/- 20 BP	1071-922 BC
	1309 +/- 20 BP	660-767 AD
Thong Na Nguak	2126 +/- 28 BP	346-54 BC
Khanong A2	2142 +/-39 BP	357-52 BC
	2094 +/- 20 BP	169-47 BC
	2090 +/- 21 BP	168-46 BC
	2126 +/- 22 BP	201-89 BC
	1809 +/- 21 BP	131-314 AD
	1818 +/- 21 BP	201-256 AD
	1826 +/- 21 BP	154-253 AD
	1829 +/- 23 BP	130-251 AD
	1845 +/- 21 BP	129-240 AD
	1889 +/- 38 BP	33-239 AD

Thengkham East	2464 +/- 26 BP	763-431 BC
	2295 +/-28 BP	406-352 BC
	2297 +/- 24 BP	405-356 BC
	1330 +/- 28 BP	650-766 AD
Thengkham South D	2461 +/- 26 BP	758-430 BC
	1552 +/- 27 BP	425-565 AD

Tableau 2 : Datations radiocarbones obtenus pour les différents sites du Complexe de Vilabouly.

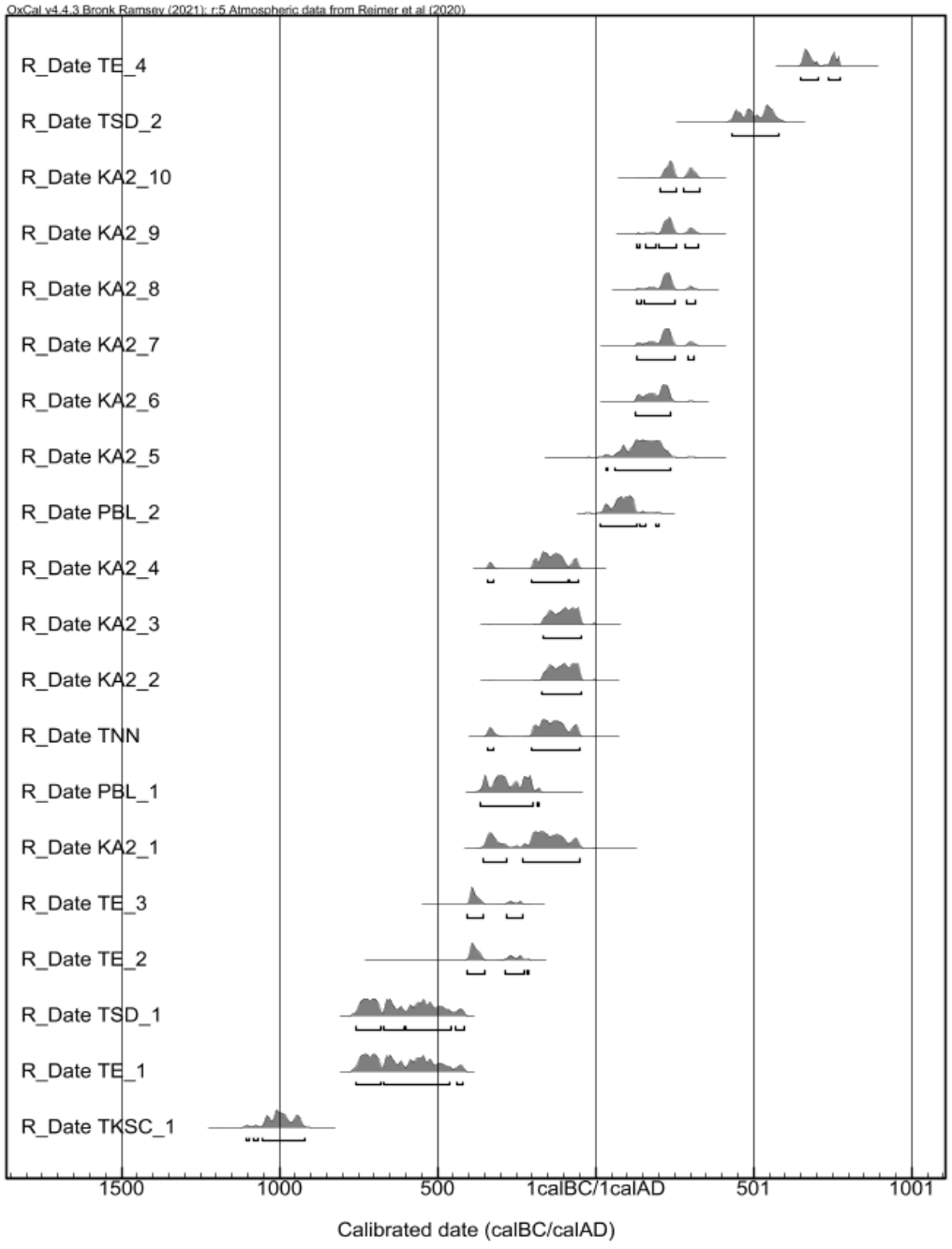


Figure 28 : Déterminations radiocarbones pour les sites du Complexe de Vilabouly. Le nom KA2 correspond aux dates de Khanong A2 ; TE à Thengkham East ; TSD à Tengkham South D ; PBL à Puen Baolo ; TNN à Thong Na Nguak ; TKSC à Thengkham South C.

B. Thengkham South D et Thenkgham East

Tout comme *Khanong A2*, *Thengkham South D* (Figure 27) a été découvert durant une opération de la mine moderne et a été fouillé en 2012, ainsi qu'en 2013, en coopération avec la concession minière (N. Chang, 2015). La fouille a permis de mettre en évidence une zone étendue de plus de 200 puits de mine verticaux, le plus profond s'étendant au moins à 40 m sous la surface actuelle. Des structures d'étaiements en matériaux organiques ont également été identifiées pour *Thengkham South D,* certains avec une forme différente de celle observée à *Khanong A2*. Deux dates radiocarbones obtenus sur les structures organiques des puits de mine de *Thengkham South D* suggèrent une activité à la fin de l'âge du Bronze et à la fin de l'âge du Fer, aux environs de 750 av. J.-C et 500 ap. J.-C (2461 +/- 26 calBP, 1552 +/- 27 calBP, Tableau 2 et Figure 28), à priori contemporaine de celle de *Khanong A2*. Comme pour *Khanong*, le principal minerai dans l'environnement des puits de mine semble être la malachite.

Les trois types de structures identifiées dans une même zone à *Thengkham South D* se présentent comme suit (Figure 29 et Figure 30) :

- Une structure avec une forme d'étoile comme celle précédemment décrite pour *Khanong*, incluant des poutres en diagonales, entre chaque niveau horizontal ;

-Des puits de mine d'environ 2,2 m de diamètre avec des poteaux verticaux à chacun des quatre angles et une forme en carré. La structure horizontale est répétée environ tous les 70 cm, maintenus également avec des fibres en rotin. Il semblerait que les puits de mine de forme carrée soient antérieurs à 500 ap. J.-C. Pour l'équipe archéologique, la forme de puits de mine carrée pourrait représenter une forme plus récente liée à un changement dans l'activité minière et peut-être une intensification de l'exploitation aux environs de 500 ap. J.-C. Cette hypothèse sera difficile à vérifier compte tenu de la destruction de certaines zones archéologiques par l'activité moderne et le manque de datations ;

-Dix mètres en dessous de la surface du sol, une zone suggèrerait une exploitation à ciel ouvert. Aucun puits de mine n'a été identifié, en revanche, une structure semblable à un mur a été découverte. Elle se compose de panneaux verticaux en bambou et en rotin. La structure était également accompagnée d'objets potentiels de maintien en fer en forme de tube, de 5 à 25 cm de diamètre.

Thengkham South D a également livré deux pirogues complètes, non loin de la zone des puits de mine, avec une fonction utilitaire. Ces pirogues, non datées, pourraient également être un élément funéraire. En effet, en Asie du Sud-Est ce type d'objet est connu pour être employé dans les inhumations en tant que cercueil, notamment au Vietnam (K. W. Taylor, 1983; C. F.

Higham, 2002), mais également en Thaïlande (ex. : vallée de Khao Wong Prachan et Ban Non Wat).

Thengkham East est un autre site d'extraction ancien avec une large zone de puits de mine. Une troisième pirogue y a été mise au jour en 2013, associée à une dizaine de haches cuivreuses. Aucune saison de fouille n'a été entreprise sur les puits de mine, mais ils ont pu être cartographiés et des échantillons ont été collectés sur les structures en bambous/bois en vue de datations radiocarbones. Quatre datations ont ainsi été obtenues (Figure 28 et Tableau 2), montrant une activité à la fin de l'âge du Bronze et au début de la période historique. Il semblerait donc qu'elles se découpent en deux groupes principaux séparés d'environ 1000 ans : 763-431 av. J. -C / 650-766 ap. J. -C. La date de 1330 +/- 28 BP pourraient sembler récente, mais elle se recoupe avec une autre datation obtenue à *Thengkham South D,* montrant ainsi la potentielle longue occupation du site.

Tout comme pour *Khanong A2*, les anciens puits de mine de *Thengkham South D* et *Thengkham East* ne semblent pas avoir atteint les zones de minerais primaires, mais s'étendent dans la zone supergène où se trouvent la chalcocite et la malachite majoritairement.

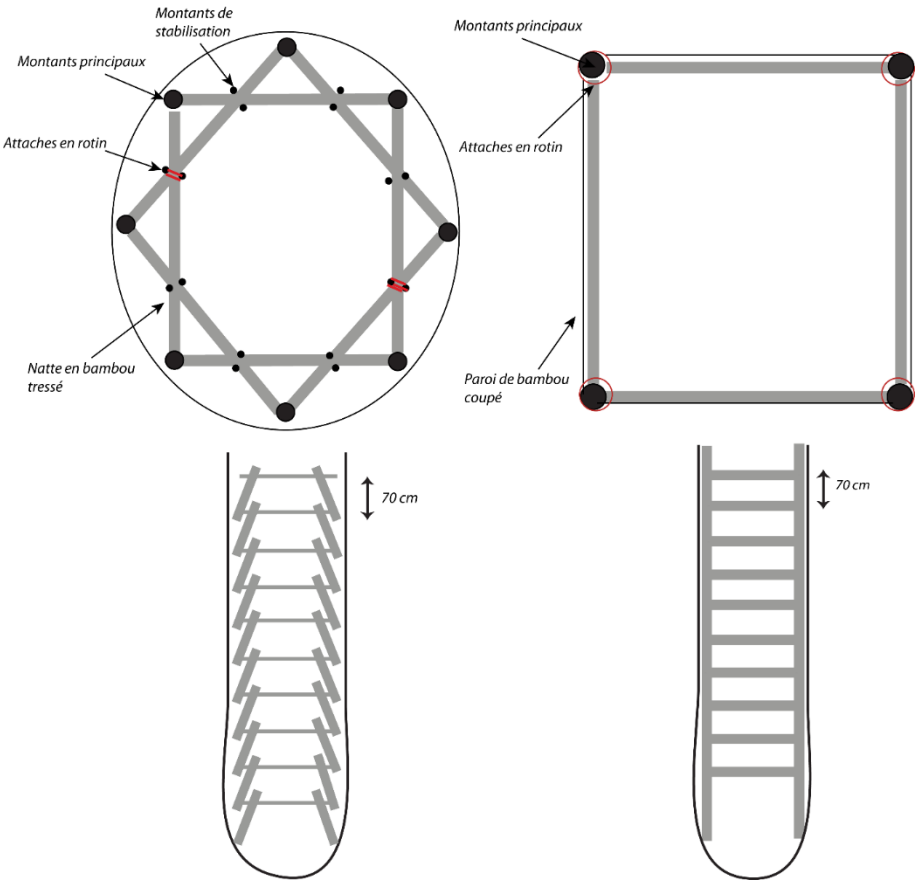


Figure 29 : Plan schématique des structures organiques mises au jour dans les puits de mine de Khanong A2 (à gauche) et de Thangkham South D (à gauche ; image modifiée d'après Tucci et al, 2014).



Figure 30: Exemples des structures de puits de mine mises au jour à Thenkgham South D, à gauche, structure avec poutre en diagonale et à droite, un puits de mine de structure carrée (image : Tucci et al, 2014).

C. Tham Hin Kieow

Tham Hin Kieow ou *Malachite Cave* fouillé en 2011, dix mètres en dessous du haut de la crête de *Thengkham*, au-dessus de *Puen Baolo,* apparait comme étant une aire minière avec une activité différente. L'équipe suspecte un complexe de galeries peut-être contemporain de l'activité de *Puen Baolo* s'étendant dans le versant. Le complexe pourrait être similaire à ceux mis au jour à *Phu Lon* (V. C. Pigott, 2019), mais d'autres investigations sont nécessaires. Une seule datation radiocarbone a été obtenue. Elle provient d'un foyer à l'entrée de la grotte/galerie actuelle suggérant une activité vers 1400 ap. J.-C. En revanche, il n'a pas été déterminé si l'endroit du prélèvement pour la datation a une relation directe avec l'activité minière ancienne du site (N. Chang, 2016).

2. Les aires de productions

A. Puen Baolo et Thengkham South C

Puen Baolo ou *Crucible Terrace* (la terrasse au creuset) noté PBL (Figure 27), a été la première zone découverte et fouillée, avec *Thong Na Nguak*. Elle a ensuite été le sujet de fouilles annuelles de 2008 à 2015 grâce à la redirection de l'activité moderne sur d'autres zones (activité qui a d'ailleurs permis de mettre au jour les sites mentionnés précédemment). Les neuf saisons de fouille, avec un total de 1120 m^2 découpés en 70 unités de 4x4 m, plus trois unités d'une zone adjacente, nommée PBL West (Figure 31) ont permis de mettre au jour des activités d'extraction et de production avec des puits de mine, fragments de scories, fragments de céramiques techniques, des minerais et des objets en métal. L'activité minière a repris à *Puen Baolo* en 2016 amenant à sa quasi-destruction, mais a également permis la mise au jour d'un site adjacent à l'ouest, *Thenkgham South C*, avec une zone étendue de puits de mine où des technologies similaires à celles observées à *Khanong A2*, *Thengkam South D* et *Thengkham East* ont été découvertes. *Thenkgham South C* a été fouillé durant quatre

courtes saisons en 2016. Puen Baolo apparait comme une zone de traitement des minerais située sur une petite terrasse, associée à une zone étendue de puits de mine, *Thengkham South* C, coupé dans le versant supérieur.

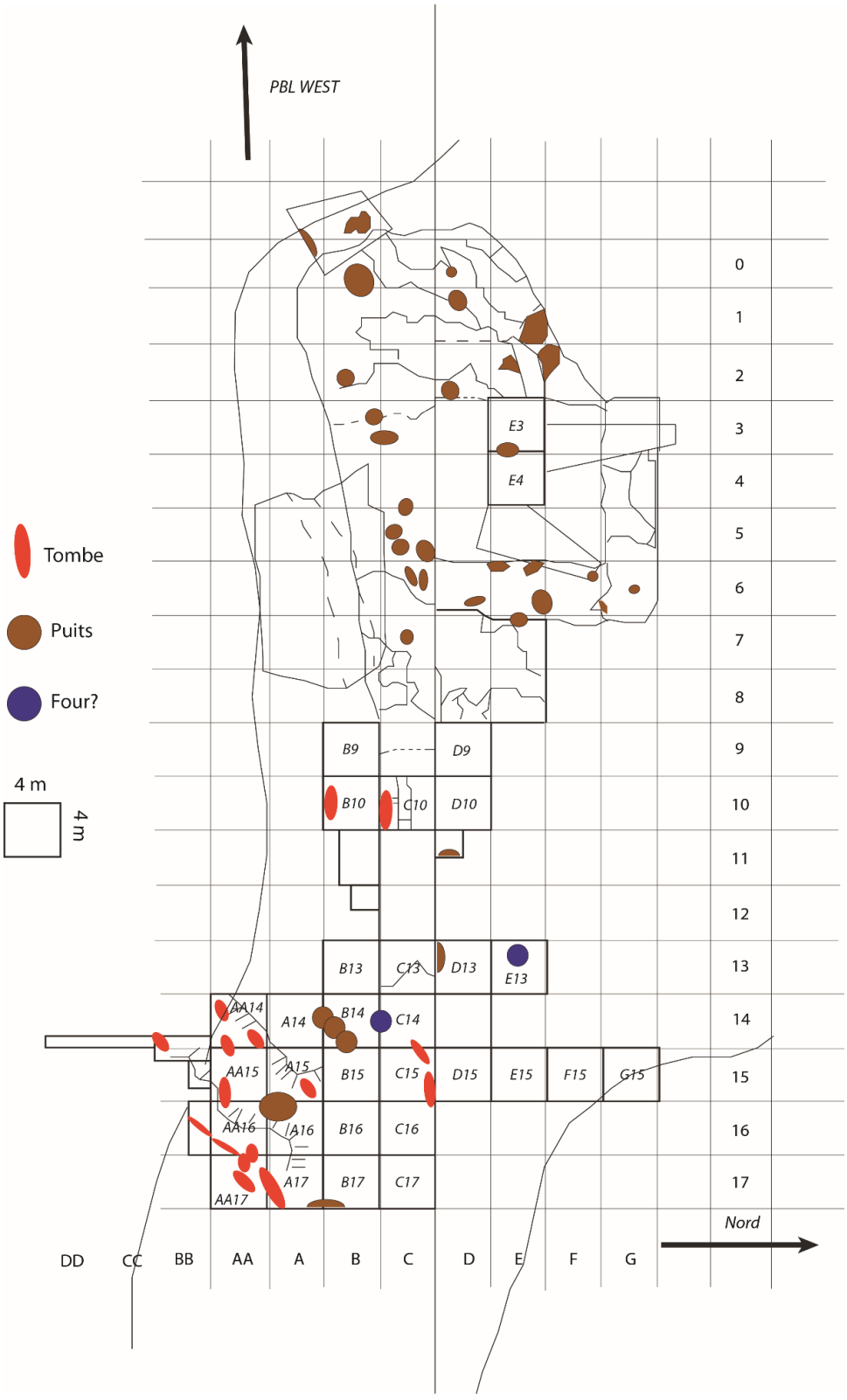


Figure 31: Plan de fouille du site de Puen Baolo (image modifiée d'après John Edgar).



Figure 32 : Exemple d'un contexte de tombe profond potentiellement associé à l'âge du Bronze (image : Nigel Chang).

L'environnement où est situé PBL se compose d'un substrat naturel d'argile et de siltite tendre, surmonté par une couche d'occupation et de débris de transformation des minerais (scories, céramiques techniques, minerais). La partie ouest du site possède une stratigraphie perturbée (Figure 31) où les fouilles par contexte (carrés) étaient difficiles. Néanmoins, il s'agirait d'une zone de concentration de puits de mine. Ils sont surmontés par des débris de transformations de minerais, incluant des scories et des céramiques techniques, ainsi que des roches probablement associées à l'extraction des minerais, accompagnées de fragments de céramiques domestiques. Au nord-est, des concentrations variées de débris liés à la production métallurgique ont été observées (unités G15 et E13), certaines jusqu'à 5-6 m de profondeur (scories, céramiques techniques et minerais). L'unité G15 (Figure 33) en est l'exemple le plus représentatif avec des niveaux très denses, identifié comme un lieu de rejet des déchets métallurgiques, éloigné de la zone principale où se concentrent les activités minières et de réduction.



Figure 33 : Concentrations de résidus liés à l'activité métallurgique dans l'unité G15.

Une grande variété de fosses avec différentes caractéristiques et dimensions a également été découverte durant les fouilles (Figure 34, Figure 35 et Figure 36). Beaucoup de ces fosses étaient associées à des cendres, montrant ainsi leur potentielle utilisation durant une étape du procédé métallurgique. Ces fosses étaient associées à d'autres, plus profondes, remplies également de cendres, laissant penser à leur réutilisation au cours du temps. Les fosses ont des diamètres entre 40 et 80 cm, des formes rondes et oblongues sont identifiées. Concernant

leur profondeur certaines sont peu profondes, d'environ 30 cm, alors que d'autres le sont davantage, avec des profondeurs jusqu'à 80 cm (Figure 37).



Figure 34 : Exemple de fosse ronde peu profonde découverte à Puen Baolo, accompagnée de fragments de céramique. C'est associé à cette fosse qu'un des creusets complets (au centre) de Puen Baolo a été découvert (image : Nigel Chang).



Figure 35: Exemple de fosse oblongue plus profonde découverte à Puen Baolo (image : Nigel Chang).



Figure 36 : Exemple de fosse remplie de graviers et de cendres découvertes à Puen Baolo (image : Nigel Chang).



Figure 37 : Fosse découverte dans l'unité B14.



Figure 38 : Exemple d'une seconde fosse découverte dans l'unité E13 avec de plus larges dimensions, ici avec plus de 50 cm de profondeur, et un conduit secondaire perpendiculaire à la fosse principale (image : Nigel Chang).



Figure 39 : Fosse avec des dimensions plus larges découverte dans l'Unité E13 (image : Nigel Chang).

D'autres fosses découvertes possèdent des dimensions encore plus larges, jusqu'à 1 m 50 de profondeur et 1 m de diamètre. Elles ont principalement été identifiées dans l'unité E13, certaines possèdent un canal secondaire attenant à la fosse de 10 cm de diamètre. L'équipe de fouille suggère qu'il pourrait correspondre à des conduits de ventilation (Figure 38 et Figure

39). On ne peut pas exclure également que ces conduits adjacents soient dus à des bioturbations faites par le passage d'animaux, qui peuvent laisser ce type de stigmates. Une de ces structures a été attribuée par l'équipe de fouille à un four de réduction, par son emplacement et sa forme, mais ses dimensions remettent en question cette hypothèse. Comme nous le verrons par la suite, une série de reconstitution expérimentale a pu être menée, en prenant pour base cette structure (P. Griffin, 2017). Toutes les fosses mises au jour à Puen Baolo étaient entourées et surmontées de débris de scories et de creusets. Il semblerait qu'une grande variété de fosses ait été utilisée à Puen Baolo. Ces différentes structures représentent peut-être des évolutions temporelles et techniques, mais les dépôts archéologiques perturbés de Puen Baolo ne permettent pas d'établir d'évolutions stratigraphiques certaines.

À ces activités d'extraction et de transformation des minerais semblent être associés des contextes funéraires dans la partie est du site (Figure 31). En effet, des fosses qui semblent pouvoir être associées à des inhumations, contenant du mobilier, ont été découvertes dans le substrat naturel plus à l'est. Le sol acide a visiblement dissout tous les os originaux de ces contextes funéraires, ce qui n'a pas permis d'étude bioarchéologique. Des contrastes de couleurs étaient visibles dans le substrat où le squelette devait être placé. Deux types d'inhumations semblent pourtant se distinguer. Le premier (Figure 32), correspond aux inhumations les plus profondes auxquelles un type de lingot en cuivre particulier dit « nœud papillon » se trouve être associé, ainsi que des perles en calcédoine, des ornements en pierre, des outils en cuivre, des poteries domestiques, mais aucun objet ferreux. C'est également dans ces contextes profonds que trois hallebardes *ge* à base de cuivre ont été découvertes[26]. Le second type correspond à des inhumations dans la couche supérieure du dépôt pour lesquelles des haches en fer, des lingots coniques en cuivre et des poteries domestiques ont été mis au jour. La majorité des objets en alliages cuivreux constituant le corpus d'étude de cette thèse ont été découverts associés à ces inhumations (N. Chang, 2015). Étonnamment, aucun élément en verre n'a été découvert pour cette zone, malgré une datation de l'âge du Fer. Le verre est pourtant très fréquent pour les sites de cette période.

Une hypothèse à mentionner serait que ces deux types d'inhumations correspondraient à deux périodes temporelles différentes : les inhumations profondes à l'âge du Bronze régional et celles de la couche supérieure à l'âge du Fer, notamment grâce à la présence d'objets ferreux, absente des contextes profonds (N. Chang, 2015). Bien évidemment, des datations seraient nécessaires afin de conforter cette idée, mais la situation actuelle rend cela

[26] Les hallebardes *ge* seront définies en partie II.3 et VIII.2.

compromis[27]. La date radiocarbone la plus sure a été obtenue dans la partie haute d'un puits de mine sur une structure organique, et place l'activité de *Puen Baolo* à minima durant l'âge du Fer régional, 2204 ± 20 BP (361-202 BC, Tableau 2 et Figure 28), fournissant par la même occasion une date pour les niveaux supérieurs associés aux inhumations. Cette date est confirmée par une seconde du milieu de l'âge du Fer à 1940 ± 20 BP (18-130 AD)

L'ouverture du puits moderne de *Thengkham South C* a été déterminante pour la datation des puits de mine associés à *Puen Baolo*. Tout comme pour toutes les autres datations sur les puits de mine, les échantillons proviennent des structures en bois préservées dans l'argile humide, dix mètres ou plus en dessous de la surface actuelle. La détermination la plus ancienne est d'environ 1000 av. J.-C (Tableau 2 et Figure 28) donc au début de l'âge du Bronze régional. Cette datation vient également appuyer l'hypothèse dressée par les inhumations des contextes profonds de *Puen Baolo,* qui ne sont pas datées. Les dates les plus récentes sur des puits de mine de forme carrée confirment que l'activité d'extraction à *Puen Baolo*/ *Thengkham South C* continue jusqu'aux environs de 700 ap. J.-C (Tableau 2). D'après les observations faites par l'équipe archéologique et certaines datations, après 500 ap. J.-C, il semblerait que la forme des puits de mine change, pour passer d'une forme circulaire à une forme carrée. Ce changement est également observé pour les puits de mine de *Thenkgham South D.* Tout comme les autres sites mentionnés, des matériaux organiques anciens associés à l'activité minière ont également été mis au jour, incluant des échelles en bois, des parties de ce qui semble être des poulies, des maillets en bois ou encore des paniers.

B. Thong Na Nguak

Thong Na Nguak ou *Dragon Field* (Champ du dragon, noté TNN, Figure 27) a été fouillé seulement durant une saison en 2008, avec pour but de confirmer la présence de reste archéologique. Avec cette confirmation, toute action a cessé sur le site à cause de son importance dans les croyances locales. Une seule date radiocarbone a pu ainsi être obtenue. Elle provient de charbon de bois du fond d'une jarre funéraire et place l'activité du site durant l'âge du Fer régional (346-54 av. J.-C, Tableau 2 et Figure 28). La jarre funéraire était associée à trois autres, au sein d'une autre plus grande jarre avec de multiples arrangements de pierres rectangulaires, associées à des perles en verre, qui ont également pu être analysées par Laure Dussubieux au *Field Museum of Natural History* à Chicago (Figure 40), ainsi que trois lingots coniques. Hormis le contexte funéraire associé aux jarres, d'autres découvertes indiquent la réalisation d'activités hautes températures liées à la métallurgie du cuivre avec des fragments de scories, des fragments de creusets, des minerais et des lingots coniques en cuivre. Dans les niveaux sous-jacents des jarres du site de TNN, des structures en fosses similaires à celles

[27] En effet, depuis le changement de propriétaire de la concession minière en 2018, l'équipe de fouille à changer et aucune fouille n'a repris dans la zone.

découvertes à Puen Baolo ont également été mises au jour. L'association des jarres funéraires, des alignements de pierres et des activités liées à la métallurgie pourraient suggérer la présence d'un site d'occupation. Le site de TNN nécessiterait de plus amples recherches, mais qui ne sont pas prévues à l'heure actuelle. Contrairement aux autres zones du Complexe de Vilabouly, la qualité de TNN en tant que lieu d'importance pour les communautés locales la préserve de toute activité minière.

Comme nous l'avons mentionné, le site de production de TNN serait lié à la zone de puits de mine de *Khanong A2*. En effet, les deux sites sont proches, à 300 m seulement. TNN est alors perçu comme la potentielle zone de transformation des minerais, alors que *Khanong* A2 serait la zone d'exploitation minière. De plus, les datations radiocarbones montrent une période d'activité contemporaine à celle de TNN, du début au milieu de l'âge du Fer.



Figure 40 : Exemples de perles en verre découvertes à Thong Na Nguak (image : Nigel Chang).

3. Le musée de Viabouly et les chance finds

En plus de ces différentes zones archéologiques découvertes dont certaines ont pu être fouillées, les prospections archéologiques, celles de la concession minière ainsi que des découvertes effectuées par les villageois ont également mené à certaines découvertes laissant penser que la richesse archéologique de Vilabouly est bien plus vaste. Une grande majorité des objets archéologiques découverts lors de ces prospections est actuellement visible au musée de la ville de Vilabouly, qui a été inauguré en 2017. Le musée regroupe donc une collection d'objets à base de cuivre, dont certains possèdent des typologies similaires aux objets découverts lors des fouilles, notamment des lingots dits « nœud papillon » (Figure 41), des lingots plan-convexes (Figure 41 et Figure 42), des haches (Figure 43) ou encore des hallebardes *ge*. L'un des tambours à base de cuivre (Figure 44), mis au jour à Vilabouly, y est

également exposé. Le second se trouve au musée de Vientiane. Les tambours de Vilabouly ont été découverts à proximité de la zone minière entre 5 et 8 m de profondeur. Le tambour de Vientiane a été découvert par une équipe de déminage en 2008, avant toute fouille. Lorsque les fouilles ont débuté en 2008, des tranchées ont été ouvertes dans la zone de découverte du tambour, mais aucun autre élément archéologique n'a été mis au jour. Ce tambour semble avoir été inhumé loin de toute autre zone d'activité ou d'occupation. Le second tambour a été découvert par des villageois à environ 10 km au nord de la concession minière. L'ouvrage de Jacques De Guerny sur les tambours en bronze d'Asie du Sud-Est consacre un chapitre aux musées de la province de Savannakhet (J. De Guerny, 2017). De Guerny a également pu s'entretenir avec des villageois locaux à Vilabouly qui lui ont mentionné un trafic de contrebande de tambour, ainsi que de potentiels fragments de moules avec des décors en provenance de Vilabouly vers le Vietnam, dont la frontière est à seulement 60 km. Le nombre de tambours présents réellement à Vilabouly, et dans la région, pourrait bien être plus conséquent.

Au musée, on dénombre également des éléments davantage liés à l'activité de production, comme un des creusets complets découverts à PBL en association à une fosse, ou un moule en grés certainement pour la coulée de lingots plan-convexes.







Figure 41 : En haut à gauche, photographie d'un des creusets complets qui a été découvert associé à la fosse présentée en figure 33 et d'un fragment de moule pour lingot plan-convexe découvert à Puen Baolo conservés au Musée de Vilabouly. En haut à droite, lingots plan-convexes exposés au musée de Vilabouly et en bas, exemples de lingots dits nœud papillon.



Figure 42 : Lingots plan-convexes découverts lors d'opérations de déminages.



Figure 43 : Exemples d'objets de différentes typologies découverts par des villageois ou des opérations de déminages à Vilabouly.



Figure 44 : Un des deux tambours à base de cuivre dits de Dong son découverts au Complexe de Vilabouly.

Des échantillons ont également pu être prélevés sur certains objets du musée dont la typologie présente un intérêt dans le cadre de l'étude. Cette sélection sera présentée en partie III.3. En revanche, notre échantillonnage s'est plus particulièrement concentré sur les artéfacts découverts en contexte archéologique à *Puen Baolo* et *Thong Na Nguak*, issus d'une fouille et donc d'un contexte mieux défini.

4. Occupation du site durant la période historique

Les découvertes archéologiques de Vilabouly semblent montrer que le site était encore occupé durant la période Lane Xiang (1354-1707), particulièrement par la découverte de différents types de porcelaines durant les prospections et fouilles (N. Shimizu et al., 2016). Dans son article de 2016, Naho Shimizu identifie trois types de céramiques non régionales au sein de l'assemblage, mises au jour à Vilabouly : des céramiques chinoises, vietnamiennes, thaïes et japonaises. La période à laquelle correspondent ces céramiques s'étend de la fin du XIVème au début du XVIIIème siècle ap. J.-C, selon l'étude de Shimizu.

II.1.5. Précédentes et études en cours sur le mobilier de Vilabouly

Deux travaux préliminaires ont déjà été entrepris sur une première sélection du mobilier de PBL et TNN, provenant uniquement de la première saison de fouille en 2008. Ces travaux ont été menés par Hayden Cawte en 2009 et Elzbieta Watroba en 2012, le dernier lors d'un mémoire de master (H. Cawte, 2009; E. Watroba, 2012) à *University College London*. Les deux études n'ont pas été publiées. La sélection des échantillons envoyés du Laos en 2008

comportait des fragments de creusets, des fragments de scories, de minerais et un lingot en cuivre. Hayden Cawte avait pu étudier 12 fragments de creusets de PBL et TNN, alors que Elzbieta Watroba a pu analyser cinq échantillons de minerais, neuf échantillons de creusets, 14 échantillons de scories et le lingot en cuivre provenant du même lot. Les échantillons ont été étudiés au microscope optique et au MEB-EDS. Une sélection de certains échantillons de ce corpus a également servi durant SEALIP afin d'obtenir la signature isotopique du plomb du Complexe de Vialbouly (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014).

D'autres études sont en cours pour la céramique domestique notamment, réalisée par Katherine Cameron à l'Université *James Cook* en Australie. À noter également, une étude typologique des *ge* provenant des contextes profonds de *Puen Baolo,* afin de trouver des comparaisons en Asie du Sud Est et en Chine. Cette étude est également réalisée à l'Université *James Cook* par Catherine Livingston. Ces deux études vont permettre d'améliorer notre compréhension de l'occupation du site, et pourront directement être comparées à la reconstitution des procédés métallurgiques dans le futur.

II.2. Représentativité de la sélection à l'échelle du Complexe de Vilabouly

À présent, il nous faut évoquer les limites liées à cette reconstitution technologique. Premièrement, même si une attention particulière a été prêtée à la sélection du corpus à analyser qui va suivre, il n'est peut-être pas représentatif de toute la variabilité du site, technologique et temporelle. Les variations sont également présentes à l'échelle d'un échantillon. C'est pourquoi l'étude des scories et autres matériaux doit prendre en compte la variabilité inter, mais également intra, à l'échelle d'un échantillon (J. Humphris et al., 2009; F. W. Rademakers, 2015).

Deuxièmement, il faut également évoquer l'étendue de la zone archéologique de Vilabouly. En effet, les deux principaux sites étudiés sont espacés d'environ 10 km, mais d'autres sites satellites, pour lesquels peu de mobilier est disponible, sont également présents comme nous venons de le voir. Certaines de ces zones ont été explorées de manière partielle, car les fouilles de sauvetage devaient suivre les plans d'exploitation de la concession minière. Puen Baolo est le site pour lequel nous avons le plus de mobilier, car il a pu être fouillé durant près de dix ans. Cela n'est pas le cas pour tous les autres sites qui ont généralement été visités seulement une saison. Voilà une des raisons pour laquelle le mobilier de Thong Na Nguak apparait moindre par rapport à Puen Baolo. Thong Na Nguak a peut-être autant, si ce n'est plus, à livrer encore. Les reconstitutions technologiques présentées ici doivent donc être interprétées en gardant à l'esprit cette réalité archéologique. La totalité du mobilier répertorié pour Vilabouly est d'environ 140 kg, ce qui apparait mince pour un site de cette ampleur, venant renforcer la présence de zones archéologiques non encore découvertes et /ou détruites. En comparaison,

la quantité de matériel de la vallée de Khao Wong Prachan, un des deux autres sites d'extraction et de production (voir Chapitre I) possède des dépôts très denses s'étendant sur plusieurs hectares, et plusieurs mètres d'épaisseur (jusqu'à 6 m pour Nil Kham Haeng).

Les datations disponibles ne nous permettront pas d'avoir accès à des variations temporelles précises dans la stratigraphie de Vilabouly, car elles sont trop peu nombreuses, même pour Puen Baolo. Les datations radiocarbone pour l'ensemble du complexe semblent indiquer une activité d'extraction d'environ 1000 av. J. –C à 700 ap. J. –C, donc couvrir presque 2000 ans d'activité. Il faut également prendre en compte que cette activité n'a peut-être pas été continue, mais périodique, ce qui n'est pas visible via les fouilles. De plus, ces datations sont données principalement pour l'activité d'extraction, or il ne faut pas exclure que celle-ci ait pu être pratiquée en l'absence d'une activité de transformation. Pour les deux sites de productions de Vilabouly, les dates dont nous disposons placent l'activité durant l'âge du Fer régional. Il est donc possible et envisageable que le site ait pu être exploité uniquement sur le plan minier, les minerais exportés et réduits ailleurs en fonction des périodes.

Troisièmement, comme on l'a mentionné, aucun minerai provenant directement des minéralisations de Vilabouly n'a été collecté. Dans le cadre des analyses isotopiques, nous n'avons donc pas effectué d'étude géochimique et minéralogique précise en lien avec les zones archéologiques. Cela est normalement conseillé afin d'avoir une connaissance plus approfondie de la géologie locale et permet une meilleure lecture des données isotopiques (E. Pernicka, 1993). De plus, des analyses isotopiques ont déjà été effectuées par la concession minière MMG-LXML, bien que les résultats ne nous soient pas accessibles. BROGLASEA ne prévoyait donc pas de refaire de nouvelles analyses sur ce point. Nos connaissances géologiques se basent uniquement sur les données issues des rapports et études des différents propriétaires de la concession minière, depuis son ouverture.

Observer les potentielles évolutions au travers de la chronologie apparait donc difficile pour Vilabouly, compte tenu du peu de datations disponibles. La faible résolution chronologique du site ne permet pas de discerner précisément des phases dans les dépôts. Ces évolutions ne peuvent être appréhendées qu'au travers des éléments techniques et ne peuvent donc pas être reliées à des datations absolues, comme c'était également le cas pour l'étude de la Vallée de Khao Wong Prachan, pour laquelle les niveaux archéologiques ne pouvaient pas être précisément datés. Dans le chapitre VIII, lorsque nous aborderons des comparaisons à l'échelle suprarégionale, la chronologie utilisée sera donc très large et ne permettra pas de mettre en relation des phases d'occupations précises. La comparaison sera principalement axée sur des comparaisons techniques, via des éléments communs à tous les sites archéologiques évoqués.

II.3. Sélection et présentation du corpus

La quasi-totalité du mobilier de Vilabouly a été observée et répertoriée (pesée et photographiée) sur place au Laos en novembre 2017, avec l'aide de T.O Pryce, Nigel Chang, Viengkeo Souksavatdy et Thonglith Luangkhot, qui nous ont également permis d'obtenir les permis d'export vers la France. La base de données ainsi constituée nous a servi de base pour la sélection du corpus d'étude et permet d'avoir une approche quantificative du mobilier de Vilabouly. Cette base de données reprend en majorité les artéfacts découverts en contextes de fouilles de sauvetage à Puen Baolo et Thong Nguak, mais également certains objets retrouvés lors de prospections de villageois et de la concession minière, actuellement exposés au musée de Vilabouly. La totalité des artéfacts répertoriés représente une masse d'environ 140 kg (hors objets à base de cuivre du musée de Vilabouly qui n'ont pas pu être pesés).

Notre intérêt s'est porté principalement sur le site de Puen Baolo qui a été fouillé pendant près de dix ans et a livré la majorité du mobilier de Vilabouly. Dans un but de comparaison, des échantillons du site de Thong Na Nguak ont également été sélectionnés, car le site constitue la seconde zone potentielle de réduction de cuivre au Complexe de Vilabouly. Le corpus a été sélectionné suivant une approche stratigraphique et séquentielle, selon la méthodologie acquise par T.O Pryce à *University College London*, afin d'avoir accès à la majeure partie de la variabilité intrasites. La sélection a également été faite par type de mobilier (scories, creusets, minerais, objets à base de cuivre) préalablement identifié. Notre attention s'est également portée sur les zones archéologiques les moins perturbées, afin d'avoir les séquences les plus représentatives possibles, suivant les conseils de l'archéologue en charge du site, Nigel Chang.

Une fois de retour en France, le mobilier ainsi rapporté a été une nouvelle fois observé, afin d'effectuer une sélection plus ciblée des objets à analyser en laboratoire, car la totalité ne pouvait pas l'être. Les échantillons ont été sélectionnés suivant la même approche qu'au Laos, par type d'artéfacts et avec la stratigraphie/séquences, pour les deux sites étudiés de Puen Baolo et Thong Na Nguak.

Le corpus d'étude se compose d'une sélection de différents types d'artéfacts que nous pensons en lien avec la chaine opératoire de production du cuivre à Vilabouly : des fragments de minerais, des fragments de céramiques techniques, des fragments de scories ainsi que des échantillons d'objets à base de cuivre. Une fiche échantillon reprenant les informations et les photographies pour chaque artéfact étudié est disponible en Annexe 1.

II.3.1. Les minerais

L'assemblage sélectionné à Vilabouly compte 38 pièces attribuées à des minerais. Les minerais sélectionnés pour étude sont composés d'un groupe de 12 échantillons de Puen Baolo et 2 de Thong Na Nguak (Tableau 3 ;Figure 45 et Figure 46). Il va s'agir de déterminer quel(s) type(s) de minérau(x) les composent, et s'ils peuvent être associés à l'activité de production du Complexe de Vilabouly.

N°	*Site*	*Unité*	*Niveau*	*S*	*Contexte*	*Masse (g)*
PBL_G15_2_1_7305	Puen Baolo	G15	2	1	7305	3
PBL_E15_2_3_3282	Puen Baolo	E15	2	3	3282	2
PBL_E15_2_2_3218	Peun Baolo	E15	2	2	3218	51,5
PBL_E15_3_1_3278_e	Peun Baolo	E15	3	1	3278	5
PBL_C17_3_1_a	Puen Baolo	C17	3	1		4
PBL_C17_3_1_b	Puen Baolo	C17	3	1		34,5
PBL_C14_2_3_7217	Puen Baolo	C14	2	3	7217	3
PBL_B17_2_2_3311	Puen Baolo	B17	2	2	3311	2
PBL_C16_3_2_3523	Puen Baolo	C16	3	2	3523	3
PBL_G15_3_3_7311_b	Peun Baolo	G15	3	3	7311	8,5
PBL_E15_3_3_4040	Peun Baolo	E15	3	3	4040	3
PBL_B14_2_4_7005	Puen Baolo	B14	2	4	7005	40
DF_1-A_B1_53	Thong Na Nguak				53	2,5
DF_1-A_4_152	Thong Na Nguak				152	4

Tableau 3 : Tableau reprenant les minerais sélectionnés pour étude avec leurs références de fouille.

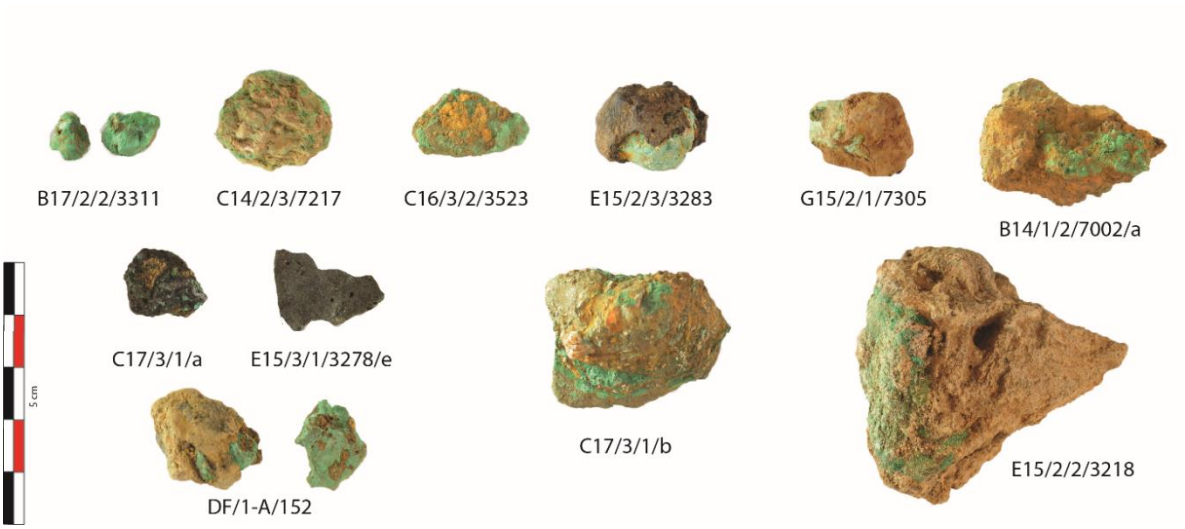


Figure 45 : Les minerais carbonatés/oxydés sélectionnés pour étude.



Figure 46 : Les minerais d'oxyde de fer sélectionnés pour étude.

II.3.2. Les céramiques techniques

Une grande partie du corpus se compose de céramiques techniques, dont certaines peuvent être attribuées à un usage durant une étape haute température, via différentes caractéristiques qui seront décrites au Chapitre V. La plupart de ces céramiques semblent être des creusets. Les creusets constituent le deuxième élément le plus important du corpus mis au jour à Vilabouly, particulièrement pour Puen Baolo qui de son nom *Crucible Terrace* (la terrasse au creuset) marque cette importance. D'autres types potentiels de céramiques techniques ont pu être identifiés. On aurait de potentiels chemisages de fosses (PBL/DD14/1/1/7108, PBL/A5/159/367 et PBL/E13/CL) qui se présentent sous la forme de petits nodules d'argile rubéfiés. Leur usage reste pour l'instant difficile à définir, tout comme leur appartenance à la chaine opératoire.

28 fragments de céramiques techniques attribués à des creusets ont été sélectionnés pour étude, 22 pour PBL et 6 pour TNN, ainsi que 4 autres échantillons de potentiels chemisages de fosses rubéfiés (Tableau 4).

N°	*Site*	*Unité*	*L*	*S*	*Contexte*	*date*	*Masse (g)*
PBL_G15_3_1_7309_7303_b	Puen Baolo	G15	3	1	7309	12/11/2014	20
PBL_G15_3_3_7311_c	Puen Baolo	G15	3	3	7311	15/11/14	10
PBL_G15_3_4_7316_d	Puen Baolo	G15	3	4	7316	17/11/2014	37
PBL_E15_3225_a	Puen Baolo	E15			3225	17/11/2011	18
PBL_E15_2_1_3211	Puen Baolo	E15	2	1	3211	04/11/2011	57
PBL_C17_3_2_3119	Puen Baolo	C17	3	2	3119	30/11/2011	14
PBL_C17_1_2_b	Puen Baolo	C17	1	2		04/11/2011	5

PBL_B14_1_1_7001_a	Puen Baolo	B14	1	1	7001	26/10/2014	19
PBL_A15_4_1_6709_b	Puen Baolo	A15	4	1	6709	28/11/2013	4
PBL_A15_3_1_6703	Puen Baolo	A15	3	1	6703	27/11/2013	15
PBL_AA15_2_2_6803_a	Puen Baolo	AA15	2	2	6803	24/11/2013	11
PBL_C14_2_1_7209_a	Puen Baolo	C14	2	1	7209	08/11/2014	
PBL_C14_1_4_7205	Puen Baolo	C14	1	4	7205	01/11/2014	42
PBL_C14_2_3_7217	Puen Baolo	C14	2	3	7217	07/11/2014	12
PBL_B17_2_1_3303_h	Puen Baolo	B17	2	1	3303	05/11/2011	34
PBL_B17_2_2_3314_a	Puen Baolo	B17	2	2	3314	30/11/2011	37
PBL_B17_2_1_3303_f	Puen Baolo	B18	2	2	3303	15/11/2011	
PBL_C16_3_1_3529	Puen Baolo	C16	3	1	3529	15/11/2011	50
PBL_DD14_2_1_7123_a	Puen Baolo	DD14	2	1	7123	05/11/2014	12
PBL_D13_2_1_3706_a	Puen Baolo	D13	2	1	3706	17/11/2011	105
PBL_D13_2_1_3706_b	Puen Baolo	D13	2	1	3706	18/11/2011	28
PBL_S9_1_1_5503_c	PBL West	S9	1	1	5503	19/10/2012	4
PBL_WEST1_2_3_a	PBL West	WEST1	2	3		13/12/2011	68
DF_1-B_3_113	Thon Na Nguak	DF	1-B	3	113	09/03/2008	26
DF_1-A_B3_90	Thong Na Nguak	DF	1-A	B3	90	07/03/2008	7
DF_1-C_2	Thong Na Nguak	DF	1-C	2		03/03/2008	10
DF_1-E_3_37	Thong Na Nguak	DF	1-E	3	37	03/03/2008	10
DF_1-A_4_131	Thong Na Nguak	DF	1-A	4	131	11/03/2008	20
DF_1-A_4_131_b	Thong Na Nguak	DF	1-A	4	131	12/03/2008	10
PBL_B17_2_1_3303_g	Puen Baolo	B17	2	1	3303		
PBL_C17_2_1_3112	Puen Baolo	C17	2	1	3112		
PBL_DD14_1_1_7108	Puen Baolo	DD14	1	1	7108		
PBL_A5_159_367	Puen Baolo	A5			159-367		

Tableau 4: Tableau reprenant les céramiques techniques sélectionnées pour étude avec leurs références de fouille.

II.3.3. Les scories

Après les céramiques techniques, la majorité du corpus de Puen Baolo et Thong Na Nguak se compose de fragments de scories. Les scories ont été sélectionnées après un examen visuel, afin d'avoir les différentes typologies de scories identifiées dans le corpus d'étude, qui en compte trois (plate, massive et grossière). 132 scories ont ainsi été sélectionnées, 122 pour

Puen Baolo et 15 pour Thong Na Nguak. Elles représentent une masse d'environ 1 kg. Une sous-sélection de 56 scories est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 5). La totalité des scories étudiées est présentée en Annexe 3.

N°	*Site*	*Unité*	*Niveau*	*S*	*Contexte*	*Masse (g)*
PBL_A15_3_1_6705_a	Puen Baolo	A15	3	1	6705	25
PBL_AA15_2_2_6803_b	Puen Baolo	AA15	2	2	6803	2
PBL_AA15_2_3_6811_b	Puen Baolo	AA15	2	3	6811	20
PBL_AA15_3_1_6808_b	Puen Baolo	AA15	3	1	6808	10
PBL_AA15_3_1_6808_d	Puen Baolo	AA15	3	1	6808	10
PBL_AA15_3_1_6808_e	Puen Baolo	AA15	3	1	6808	5
PBL_B14_1_1_7001_c	Puen Baolo	B14	1	1	7001	4
PBL_B14_1_2_7002_b	Puen Baolo	B14	1	2	7002	14
PBL_B17_1_1_3301_b	Puen Baolo	B17	1	1	3301	22
PBL_B17_2_1_3303_d	Puen Baolo	B17	2	1	3303	2
PBL_B17_2_1_3303_i	Puen Baolo	B17	2	1	3303	11
PBL_B17_3_1_3312_c	Puen Baolo	B17	3	1	3312	1
PBL_C14_1_4_7205_a	Puen Baolo	C14	1	4	7205	18
PBL_C14_1_4_7205_c	Puen Baolo	C14	1	4	7205	4
PBL_C14_2_1_7209_b	Puen Baolo	C14	2	1	7209	8
PBL_C14_2_3_7219_a	Puen Baolo	C14	2	3	7219	7
PBL_C14_2_3_7219_c	Puen Baolo	C14	2	3	7219	3
PBL_C16_3503_a	Puen Baolo	C16			3503	45
PBL_C16_3503_b	Puen Baolo	C16			3503	8
PBL_C16_GENSPIT_3501_a	Puen Baolo	C16			3501	7
PBL_C17_1_1_3117_a	Puen Baolo	C17	1	1	3117	55
PBL_C17_1_1_3117_b	Puen Baolo	C17	1	1	3117	10
PBL_C17_1_1_3117_c	Puen Baolo	C17	1	1	3117	10
PBL_C17_1_2_a	Puen Baolo	C17	1	2		80
PBL_C17_1_2_d	Puen Baolo	C17	1	2		8
PBL_C17_2_1_3107_b	Puen Baolo	C17	2	1	3107	72
PBL_C17_2_1_3107_e	Puen Baolo	C17	2	1	3107	2
PBL_CC14_3_7116_a	Puen Baolo	CC14	3		7116	12
PBL_CC14_3_7116_c	Puen Baolo	CC14	3		7116	35
PBL_CC14_3_7116_g	Puen Baolo	CC14	3		7116	3
PBL_D10_1_1_2004	Puen Baolo	D10	1	1	2004	118
PBL_D13_3729_1709	Puen Baolo	D13			1709	76
PBL_E15_2_2_3218_b	Puen Baolo	E15	2	2	3218	8

PBL_E15_2_2_3218_c	Puen Baolo	E15	2	2	3218	11
PBL_E15_2_2_3218_e	Puen Baolo	E15	2	2	3218	12
PBL_E15_3_1_3277_b	Puen Baolo	E15	3	1	3277	2
PBL_G15_1_3_7304_c	Puen Baolo	G15	1	3	7304	45
PBL_G15_2_2_7305_b	Puen Baolo	G15	2	2	7305	3
PBL_G15_2_2_7305_h	Puen Baolo	G15	2	2	7305	12
PBL_G15_3_1_7309_a	Puen Baolo	G15	3	1	7309	6
PBL_G15_3_4_7316_7309	Puen Baolo	G15	3	4	7316/7309	75
PBL_S9_2_2_5505_b	PBL West	S9	2	2	5505	4
PBL_S9_2_2_5508	PBL West	S9	2	2	5508	4
DF_1_2_2_43	Thong Na Nguak	DF			43	10
DF_1_A_2_40	Thong Na Nguak	DF			40	4
DF_1_A_4_165_b	Thong Na Nguak	DF			165	28
DF_1_A_4_133	Thong Na Nguak	DF			133	3
DF_1_A_4_165_a	Thong Na Nguak	DF			165	15
DF_1_A_138_a	Thong Na Nguak	DF			138	31
DF_1_A_138_b	Thong Na Nguak	DF			138	3
DF_1_B_2_42	Thong Na Nguak	DF			42	28
DF_1_B_3_93_a	Thong Na Nguak	DF			93	5
DF_1_B_3_93_b	Thong Na Nguak	DF			93	5
DF_1_C_3_8_c	Thong Na Nguak	DF			8	4
DF_1_D_3_99	Thong Na Nguak	DF			99	34
DF_1_E_2_39	Thong Na Nguak	DF			39	1

Tableau 5: Tableau reprenant les fragments de scories sélectionnés pour étude avec leurs références de fouille.

II.3.4. Les objets à base de cuivre

Les objets à base de cuivre du corpus ont été échantillonnés sur place au Laos. La sélection comprend 60 échantillons de différentes typologies d'objets mis au jour au Complexe de Vilabouly (Tableau 7). Nous nous sommes principalement concentrés sur les objets avec un contexte archéologique sûr, à *Puen Baolo* avec 45 échantillons, ainsi qu'à *Thong Na Nguak* (deux échantillons). Nous avons également échantillonné 13 objets du musée de Vilabouly possédant des typologies différentes, qu'il sera intéressant d'aborder. En revanche, ces objets ne proviennent pas de fouilles archéologiques, mais ont été découverts lors de prospections de la concession minière ou par des villageois.

Les objets ont pu être classés en deux grands groupes, basés sur leur forme : des lingots avec trois typologies différentes et des objets finis. Les lingots nœud papillon sont majoritaires, avec 27 répertoriés en contexte, dont 20 échantillonnés (Figure 47), ainsi qu'un certain nombre (non répertoriés) présent au musée de Vilabouly, collectés en tant que *chance finds*.

Ils représentent également le type d'objet métallique le plus identifié à Vilabouly. Les lingots nœud papillon ont une longueur entre 110 et 150 mm, de 60 à 80 mm de largeur et une masse de 100 à 240 g (Tableau 6). Leur dimension apparait relativement homogène, alors que leur masse est plus variable, ce qui pourrait dénoter une production partiellement standardisée, mais également liée à la nature fragmentaire de certains lingots.

Sample	Site	Unité	Masse (g)	Longueur (cm)
SEALIP/LA/PBL/10	PBL	AA16	114	10,5
SEALIP/LA/PBL/11	PBL	AA16	418	12,7
SEALIP/LA/PBL/12	PBL	AA16	102	12,8
SEALIP/LA/PBL/13	PBL	AA16	123	12,7
SEALIP/LA/PBL/14	PBL	AA17	238	15
SEALIP/LA/PBL/15	PBL	AA17	148	15,9
SEALIP/LA/PBL/16	PBL	AA17	195	13,6
SEALIP/LA/PBL/18	PBL	AA17	127	12,9
SEALIP/LA/PBL/19	PBL	AA17	174	12,7
SEALIP/LA/PBL/20	PBL	AA17	158	12,4
SEALIP/LA/PBL/21	PBL	AA17	144	13
SEALIP/LA/PBL/36	PBL	C15	171	12,3
SEALIP/LA/PBL/47	PBL		205	14,3
CV			**46%**	**10%**

Tableau 6 : Tableau comparant les masses et la longueur des lingots nœud papillon.

Les lingots bols (quatre échantillons) proviennent du musée (Figure 48), ils ont été retrouvés collés les uns aux autres (maximum trois). Ils ont un diamètre d'environ 130 mm. Ce type de lingot rappelle ceux identifiés pour une épave, Bang Krachai II, des XVI/XVIIèmes siècles, découverts au large de la Thaïlande (Venunan et al, *forthcoming*).

Le troisième type des lingots coniques (Figure 48) peut également être séparé en sous-catégories : deux lingots coniques proviennent de *Thong Na Nguak*. Ils ont un diamètre d'environ 30 mm et une masse de 28 et 30 g. Pour *Puen Baolo*, les lingots coniques ne sont pas seulement composés de cuivre, comme nous le verrons dans le Chapitre V, mais semblent correspondre à des produits intermédiaires. Au total, 26 lingots coniques ont pu être répertoriés à Puen Baolo, dont 11 semblent contenir une couche de scories et un bouton de cuivre, qu'on peut identifier à l'œil nu. Les 15 autres semblent être en majorité composés de cuivre métallique. Cinq échantillons de ces lingots coniques « intermédiaires » ont été sélectionnés pour étude (PBL/48 à 52).

La seconde grande catégorie d'objets de Vilabouly se compose de plusieurs types (Figure 48, Figure 49 et Figure 50). Des objets qu'on peut classer comme utilitaires (Figure 48), avec principalement des haches, qui sont le deuxième type d'objets le plus abondant à Vilabouly,

avec dix échantillons et un total de douze haches répertoriées à Puen Baolo. Les haches ont des dimensions et des formes différentes, avec une longueur de 60 à 80 mm et une masse de 20 à 80 g. Dans les objets utilitaires, on peut également mentionner une pointe de lance (PBL/31), un burin (PBL/17), une épingle (PBL/23), une herminette (PBL/28) et un couteau (PBL/46).

N°	*Site*	*Unité*	*Niveau*	*Couche*	*Catalogue*	*Contexte*	*Type*	*Masse (g)*
SEALIP/LA /PBL/8	PBL	A15	4	6	6703	6720	ge	321
SEALIP/LA /PBL/9	PBL	AA15	4	7	6833	6812	Hache	53
SEALIP/LA /PBL/10	PBL	AA16	3	1	5206	5204	Cu nœud papillon	114
SEALIP/LA /PBL/11	PBL	AA16	3	1	5207	5204	Cu nœud papillon	418
SEALIP/LA /PBL/12	PBL	AA16	3	1	5208	5204	Cu nœud papillon	102
SEALIP/LA /PBL/13	PBL	AA16	3	1	5209	5204	Cu nœud papillon	123
SEALIP/LA /PBL/14	PBL	AA17	3	2	5705	5705	Cu nœud papillon	238
SEALIP/LA /PBL/15	PBL	AA17	3	2	5707	5707	Cu nœud papillon	148
SEALIP/LA /PBL/16	PBL	AA17	3	2	5708	5708	Cu nœud papillon	195
SEALIP/LA /PBL/17	PBL	AA17	3	2	5709	5709	Burin	47,4
SEALIP/LA /PBL/18	PBL	AA17			3014	3019	Cu nœud papillon	127
SEALIP/LA /PBL/19	PBL	AA17			3016i	3019	Cu nœud papillon	174
SEALIP/LA /PBL/20	PBL	AA17			3016ii	3019	Cu nœud papillon	158
SEALIP/LA /PBL/21	PBL	AA17			3017	3019	Cu nœud papillon	144
SEALIP/LA /PBL/22	PBL	AA17			3009	3019	Hache	38,6

SEALIP/LA /PBL/23	PBL	AA17			3015	3019	Épingle	4,6
SEALIP/LA /PBL/24	PBL	AA17			3019	3019	Hache	26,6
SEALIP/LA /PBL/25	PBL	B10	3	2	2621	2166	Hache	78
SEALIP/LA /PBL/26	PBL	B14	2	1	7004	7003	Hache	79
SEALIP/LA /PBL/27	PBL	B17	2	1		3301	Frag	1,2
SEALIP/LA /PBL/28	PBL	C10	DEEP 342,005				Herminette	0,57
SEALIP/LA /PBL/29	PBL	C10/B 10	1	2			Hache	0,9
SEALIP/LA /PBL/30	PBL	C10/B 10	1	2	2601	2118	Hache	20,1
SEALIP/LA /PBL/31	PBL	C10/B 10	1	2	2602	2118	Pointe de lance	89
SEALIP/LA /PBL/32	PBL	C15	4	1	3529	3560	Cu nœud papillon	44,0
SEALIP/LA /PBL/33	PBL	C15	4	1	3530	3560	Cu nœud papillon	57
SEALIP/LA /PBL/34	PBL	C15	4	1	3531	3560	Cu nœud papillon	59
SEALIP/LA /PBL/35	PBL	C15	4	1	3532	3560	Cu nœud papillon	113
SEALIP/LA /PBL/36	PBL	C15	4	1	3533	3560	Cu nœud papillon	171
SEALIP/LA /PBL/37	PBL	C15	4	1	3534	3560	Cu nœud papillon	74
SEALIP/LA /PBL/38	PBL	C15	4	1	2946	2461	Hache	7,9
SEALIP/LA /PBL/39	PBL	C16	4	1	3517	3555	Cu nœud papillon	95
SEALIP/LA /PBL/40	PBL	C16	4	1	3520	3555	Cu nœud papillon	81
SEALIP/LA /PBL/41	PBL	D15	3	6	3412	3919	Frag	6,3

SEALIP/LA /PBL/42	PBL	F15	2	3	5401	5416	Cu conique	129
SEALIP/LA /PBL/43	PBL	WEST	1	2			Frag	17,9
SEALIP/LA /PBL/44	PBL	WEST					Hache	22,3
SEALIP/LA /PBL/45	PBL		OPWL		619		Hache	78
SEALIP/LA /PBL/46	PBL					5204	Poignard	
SEALIP/LA /PBL/47	PBL				3011	3019	Cu nœud papillon	205
SEALIP/LA /PBL/48	PBL	B17	2	1	3202	3203	Cu conique	65
SEALIP/LA /PBL/49	PBL	C15	3	1	2926j	2423	Cu conique	32
SEALIP/LA /PBL/50	PBL	C15	3	1	2926e	2423	Cu conique	46
SEALIP/LA /PBL/51	PBL	C15	3	1	2926f	2423	Cu conique	34
SEALIP/LA /PBL/52	PBL	E4	2	2	5505	5506	Cu conique	84
SEALIP/LA /VC/1	Musée				AF0030/13 -10		Pseudo ge	
SEALIP/LA /VC/2	Musée				AF0030/15 -10		Pseudo ge	
SEALIP/LA /VC/3	Musée				AF0030/16 -10		Pseudo ge	
SEALIP/LA /VC/4	Musée				AF17/1-11		Lingot bol (haut)	
SEALIP/LA /VC/5	Musée				AF17/1-11		Lingot bol (milieu)	
SEALIP/LA /VC/6	Musée				AF17/1-11		Lingot bol (bas)	
SEALIP/LA /VC/7	Musée				AF17/11-2		Lingot bol (haut)	
SEALIP/LA /VC/8	Musée				AF17/11-2		Lingot bol (bas)	

SEALIP/LA /VC/9	Musée				VC1		Cloche	
SEALIP/LA /VC/10	Musée				VC2		Cloche	
SEALIP/LA /VC/11	Musée				VC/3		Cloche	
SEALIP/LA /VC/12	Musée				AF48-2010		Tambour	
SEALIP/LA /VC/13	Musée				Heger 1		Tambour	
SEALIP/LA /TNN/3	TNN	AREA 1.C	Spit 3		114	AN 634	Cu conique	
SEALIP/LA /TNN/4	TNN	AREA 1.C		3	77	AN 685	Cu conique	29,7

Tableau 7 : Tableau reprenant les objets à base de cuivre échantillonnés pour étude avec leurs références de fouille.

Enfin, on identifie des types d'objets qu'on pourrait dire plus ornementaux, principalement deux types qu'on peut attribuer à une typologie non régionale : des hallebardes *ge* (quatre échantillons) et des tambours (deux échantillons ; Figure 49 et Figure 50). Les *ge* sont un type d'arme correspondant à une typologie originaire de Chine, et les tambours sont dits de *Dong son* du nom de la culture du nord du Vietnam à laquelle ils sont généralement associés et peuvent être qualifiés de type *Heger I* (D. Heger, 1902; H. Parmentier, 1918; A. Calo, 2014). Les tambours, ainsi que trois *ge,* n'ont pas été découverts en contexte à *Puen Baolo* ou *Thong Na Nguak* et font partie d'un corpus d'objets provenant du musée de Vilabouly. Ils ont été découverts par des villageois et/ou employés de la mine lors de prospection de déminage. Douze *ge* ont été répertoriés à Vilabouly, dont deux en contexte à *Puen Baolo* et dix au musée de Vilabouly. Quatre d'entre eux ont pu être prélevés. On peut différencier deux groupes de *ge* au sein du corpus : PBL/8 provient d'un contexte funéraire à *Puen Baolo* ; il possède également une décoration plus fine. Les trois autres échantillons (VC/1 à 3), quant à eux, font partie de l'ensemble des objets hors contexte prélevés au musée de Vilabouly. Ces trois derniers possèdent également un aspect différent, ils semblent plus grossiers, avec une longueur de 220 à 240 mm, de facture moins aboutie, alors que PBL/8 apparait plus travaillé avec une longueur de 290 mm. La première hypothèse serait que le *ge* de *Puen Baolo* puisse être une importation, et les *ge* du musée, des imitations locales, issues d'une copie des *ge* importés. Nous verrons que cette hypothèse va être contredite. Bien que les *ge* VC/1, 2 et 3 doivent être pris en compte avec précaution étant donné qu'ils ne proviennent pas des niveaux archéologiques en contexte, la comparaison de ces deux types d'objets pourrait s'avérer enrichissante dans le cadre des pratiques métallurgiques à Vilabouly.

Les musées de la Province de Savannakhet, de Vilabouly et de Vientiane regroupent trois tambours provenant de la région de Vilabouly, dont les deux tambours prélevés ici (VC/12 et VC/13 ; Figure 50). Le premier est d'une hauteur de 48 cm et d'un diamètre de 64 cm (VC/12), conservé au musée de Vilabouly, et le second d'une hauteur de 110 cm pour 80 cm de diamètre (VC/13) conservé au musée de Vientiane. Ils ont tous deux un tympan orné d'une étoile à douze pointes et un décor constitué de bateaux, avec des oiseaux et de formes géométriques. Le tambour de Vientiane possède également un tympan orné de quatre grenouilles. Le troisième tambour également de type *Heger I*, découvert aux alentours de Vilabouly possède un diamètre de 120 cm et une hauteur de 80 cm, est conservé au musée de Savannakhet.

Dans la sous-catégorie des objets dits ornementaux, on peut également mentionner les cloches dont on a trois échantillons (VC/9 à 11). Ces cloches font partie d'un lot qui a également été découvert hors contexte de fouille et appartiennent au corpus d'objets provenant du musée de Vilabouly.

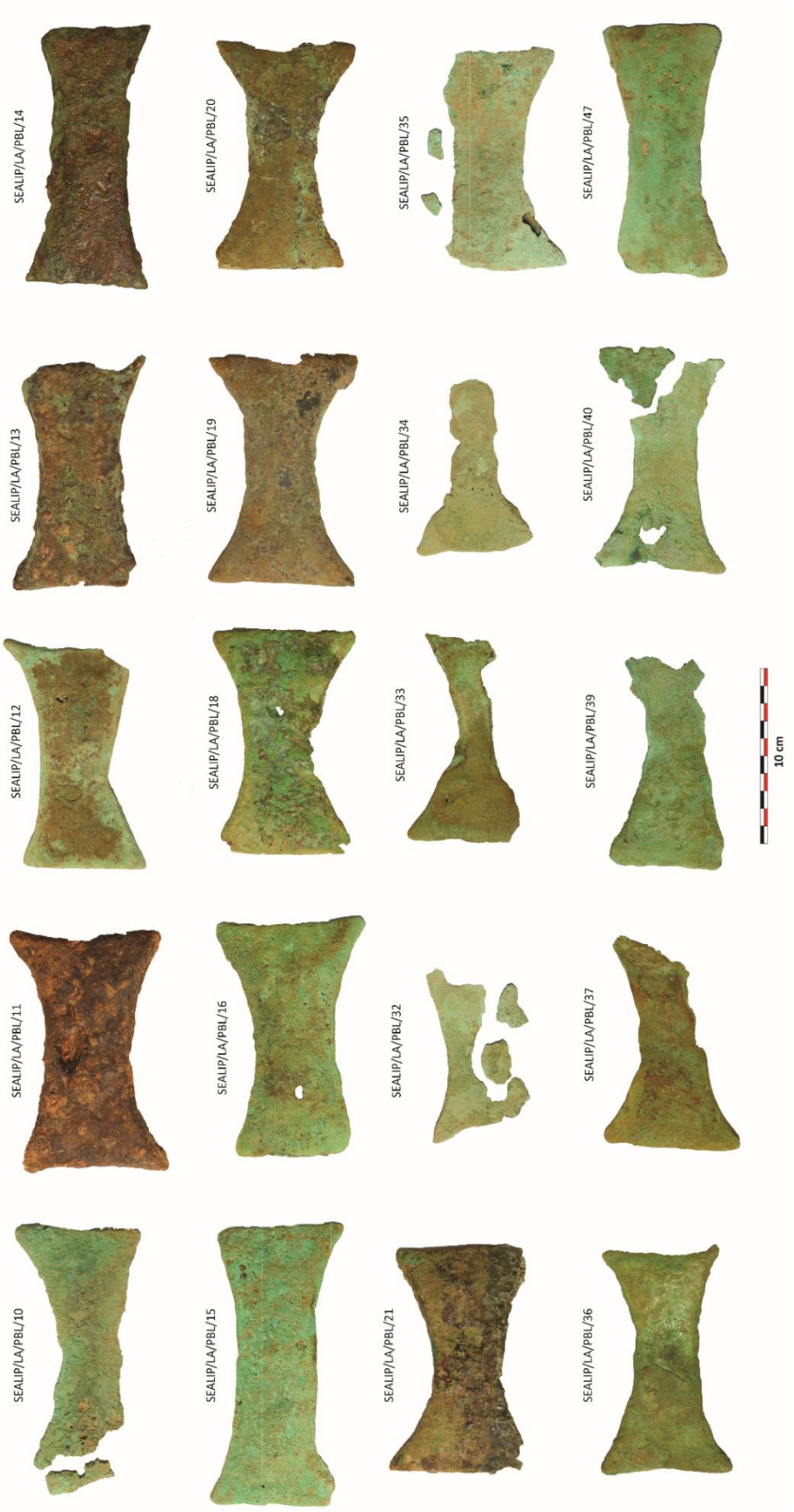


Figure 47 : Les lingots nœuds papillon échantillonnés pour l'étude.



Figure 48 : À gauche, les lingots coniques et bols sélectionnés pour étude. À droite, les haches, le burin, la pointe de lance, l'épingle et les fragments sélectionnés pour étude.

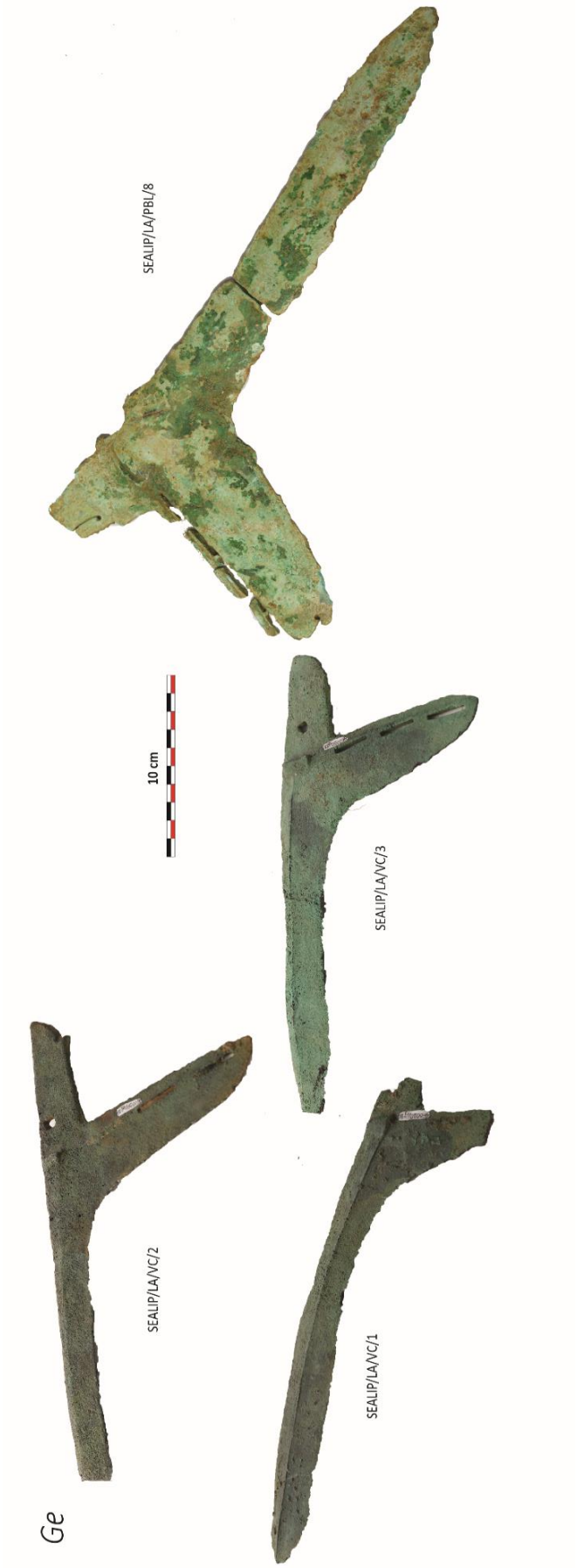


Figure 49 : les ge sélectionnés pour étude.



Figure 50 : En haut, le tambour VC/12 (image : auteure) et en bas, le tambour VC/13 (image: J. De Guerny, 2017) sélectionnés pour étude.

Chapitre 3 : La métallurgie du cuivre ancienne : généralités

La métallurgie du cuivre implique une succession d'activités complexes, pour passer de l'état de minerai à l'objet fini (Figure 51). Ce chapitre n'a pas pour but de présenter une liste exhaustive des différentes techniques de production et de mise en forme des objets en cuivre et alliages cuivreux, mais d'aborder rapidement les différents concepts qui seront utiles dans le cadre de cette thèse. Cette partie permettra ainsi de donner au lecteur une première approche méthodologique sur les différentes caractéristiques inhérentes à l'étude des productions de cuivre anciennes.

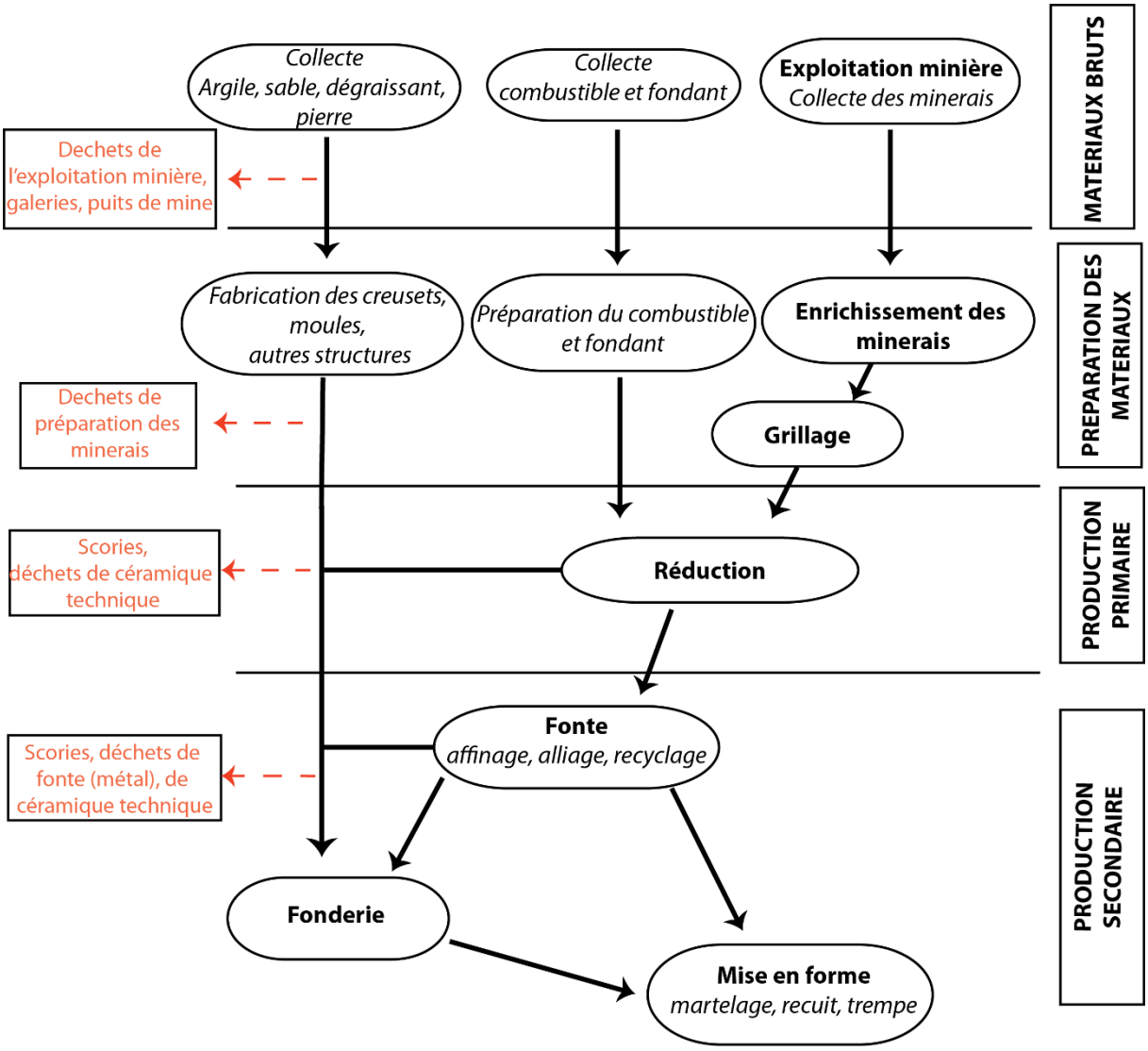


Figure 51 : Schéma des différentes étapes de la production du cuivre (modifié d'après Miller, 2007, p. 146).

III.1. La métallurgie extractive du cuivre ancienne

III.1.1. Production de cuivre avec minerais oxydés/carbonatés

Les débuts de la métallurgie extractive sont souvent perçus comme employant les dépôts secondaires de surface contenant des oxydes/carbonates (R. F. Tylecote, 1962). Les principaux minerais oxydés/carbonatés rencontrés sont : la malachite ($Cu_2CO_3[OH]_2$), la cuprite (Cu_2O), l'azurite ($Cu_3[CO_3]_2[OH]_2$) ou encore la chrysocole ($[Cu, Al]_2H_2Si_2O_5[OH]_4 \cdot H_2O$). La réduction de minerais carbonatés/oxydés peut se dérouler dans un réacteur basique, une simple fosse ou un creuset, avec une atmosphère réductrice et des températures peu élevées. Comme le résume Bachmann (1982), un carbonate se décompose comme suit, chauffé au-dessus de 500°C :

$$CuCO_3Cu\,(OH)_2 \rightarrow 2CuO + CO_2 + H_2O$$

$$2CuO + CO \rightarrow Cu_2O + CO_2$$

$$Cu_2O + CO \rightarrow 2Cu + CO_2$$

La malachite se décompose en CuO à partir de 400°C, qui est ensuite réduit par le monoxyde, de carbone au-dessus de 700°C. L'oxyde de cuivre séparé de l'hydrogène et du carbone peut ensuite être réduit en cuivre métallique par une réaction avec le monoxyde de carbone, obtenu par la combustion du charbon. Lorsque d'autres minéraux sont présents associés aux minerais de cuivre, principalement la silice et les oxydes de fer, des scories vont également être formées durant le procédé :

$$SiO_2 + 2FeO \rightarrow 2FeO.SiO_2 \text{ (fayalite)}$$

En revanche, si le minerai de cuivre est pur, sans éléments de gangue, cela peut mener à la production de très peu, voire d'aucune scorie. Lors de ce procédé, la température est souvent variable pour les débuts de la métallurgie extractive, ce qui mène à des scories souvent hétérogènes. En effet, dans les débuts de la métallurgie extractive du cuivre les conditions sont souvent peu maitrisées, menant à des variations de charge et/ou de température avec la production de scories visqueuses, hétérogènes, contenant une large part de minéraux non fondus et parfois du cuivre résiduel (D. Bourgarit, 2007). Le procédé a généralement lieu en une seule étape réductrice.

On sait maintenant que les premières métallurgies extractives n'employaient pas nécessairement les minerais carbonatés/oxydés, simples à réduire. En fonction des sites, les procédés ont pu débuter avec l'emploi de minerais plus complexes, et ainsi adapter leurs productions aux ressources disponibles (D. Bourgarit et B. Mille, 2001; E. Burger, 2008).

III.1.2 Production de cuivre avec minerais complexes (sulfures)

L'utilisation des sulfures de cuivre complexes pour la métallurgie extractive pourrait sembler plus tardive que celles des oxydes/carbonates, car elle implique un procédé plus complexe. Nous savons maintenant que leur emploi est dépendant des contextes. Ce mode de production peut être perçu comme une réponse des anciens métallurgistes face à la partie sulfurée des dépôts de cuivre (W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989). En effet, les minerais carbonatés/oxydés de surface ne représentent généralement pas la majorité des dépôts, et une fois leur exploitation épuisée, les anciens métallurgistes ont dû adapter leur production au traitement des minerais sulfurés (D. Killick, 2014).

La présence de soufre dans les minerais demande une, ou des étapes supplémentaires pour son élimination. Lorsque nous parlons de sulfures de cuivre complexes, les plus couramment rencontrés sont la chalcopyrite ($CuFeS_2$) qui est le minerai sulfuré le plus abondant, la bornite (Cu_5FeS_4) ou encore la tétraédrite ($[Cu, Fe, Ag, As, Zn]_{12}Sb_4S_{13}$). Les minerais sulfurés complexes sont souvent présents dans les minéralisations plus profondes (hypogène), et leurs altérations sont à l'origine de la formation des couches de minerais oxydés/carbonatés de surface (supergène) où se retrouvent la malachite, ou encore la cuprite.

Les principales différences entre la métallurgie extractive utilisant des carbonates/oxydes et celle employant des sulfures complexes sont donc l'utilisation d'un procédé en plusieurs étapes avec la production d'un sous-produit absent lorsque les oxydes/carbonates sont employés : il s'agit de la matte. En effet, la métallurgie extractive avec utilisation de minerais sulfurés mène toujours à la production de matte, qui est un composé intermédiaire contenant du cuivre, du soufre et parfois du fer en fonction de la charge d'origine. Les sulfures de cuivre et de fer fondent en dessous de 1200°C. Les principales étapes du procédé sont décrites comme suit par Bachmann (1982) :

$4\ CuFeS_2 + 7O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4CuS + 4SO_2$ (Grillage partiel)

$CuFeS_2 + 5O_2 + 2FeS_2 \rightarrow FeS + CuS + 2FeO + 4SO_2$ (Réduction)

$CuS + FeS + 3O_2 \rightarrow CuO + FeO + 2SO_2$ (Grillage CuS=matte)

$CuO + CO \rightarrow Cu + CO_2$ (Réduction)

L'étape de grillage en conditions oxydantes vise donc à éliminer une partie du soufre, et à oxyder le fer, avant l'étape de réduction. La température employée pour cette étape est généralement comprise entre 600°C et 800°C, bien inférieure à la température de fusion du cuivre (J. E. Rehder, 2000). À la suite d'une première réduction, le produit obtenu se présente principalement sous la forme d'une matte (ici CuS dans l'équation) qui doit être à nouveau grillée/réduite pour obtenir le cuivre métallique. La principale difficulté de ce procédé repose

donc dans l'élimination du soufre qui a une forte tendance à se combiner avec le cuivre. Généralement, le cuivre obtenu de ce procédé contient toujours une part de soufre, 1-3 % ou davantage, qui peut être éliminée par une étape d'affinage.

Les procédés multi-étapes avec production de matte seraient plus adaptés à des productions de grandes ampleurs, mais conviendraient moins à de plus petites échelles, car elles nécessitent un investissement plus important de la part des anciens métallurgistes et seraient plus simples à réaliser pour de gros volumes (W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989, p.72).

III.1.3. Production avec mélanges de minerais

Un troisième grand type de procédé pour la métallurgie extractive du cuivre peut être évoqué. En effet, la littérature en paléométallurgie du cuivre offre des exemples variés de productions avec mélange de minerais, en une étape réductrice (W. Rostoker, 1975; R. F. Tylecote, 1980; W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989; H. Lechtman et S. Klein, 1999; D. Bourgarit et B. Mille, 2001; E. Burger, 2008; E. Burger et al., 2010; E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010; T. O. Pryce et al., 2010). Ce procédé a été étudié au travers de reconstitutions expérimentales et d'assemblages provenant de sites archéologiques. En effet, dans les premiers jours de l'archéométallurgie, les développements en métallurgie extractive du cuivre étaient souvent perçus comme une séquence évolutionniste. En partie guidée par la géologie et orientée par les découvertes au Proche-Orient (T. E. Levy et S. Shalev, 1989; B. Rothenberg et C. T. Shaw, 1990; A. Hauptmann et al., 1992; A. Hauptmann, 2007), d'un procédé utilisant des minerais simples à réduire de carbonates/oxydes comme la malachite, lors d'une seule étape à des températures peu élevées. Avant d'évoluer vers des procédés plus complexes multi-étapes avec minerais sulfurés, comme la chalcopyrite (R.-J. Forbes, 1950; T. A. Wertime, 1973; P. T. Craddock, 1995; C. P. Thornton et B. W. Roberts, 2009). Il est maintenant largement accepté que cette transition n'est pas toujours si évidente et que de nombreux chemins technologiques ont été développés, en partie par rapport à la géologie locale, adaptée aux circonstances socioculturelles et socioéconomiques. Dans certains contextes documentés, des sites archéologiques ont livré des témoins de productions de cuivre avec mélanges de minerais (W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989; A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003; T. O. Pryce et al., 2010), intentionnels ou non. En effet, il faut toujours considérer que ces mélanges peuvent être naturellement présents dans les dépôts de cuivre, et que leur exploitation peut mener, ou non, à une adaptation des procédés (T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016). L'existence de productions de cuivre avec mélanges de minerais a été pour la première fois proposée par Rostoker et consorts, basée sur l'étude de la vallée de Khao Wang Prachan, en Thaïlande centrale. L'un des trois autres sites d'extraction et de production connus en Asie du Sud-Est préhistorique (W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R.

Dvorak, 1989). Cette hypothèse a également été renforcée par les études suivantes (T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010).

Les mécanismes impliqués dans une réaction avec mélanges de minerais (ici de malachite et chalcopyrite) peuvent être écrits comme suit :

$Cu_2(CO_3)(OH)_2 \rightarrow 2CuO + CO_2 + H_2O$ (décomposition de la malachite à 400 °C produisant du monoxyde de carbone)

$CuFeS_2 + 4CuO \rightarrow CuO + FeO + 2SO_2$ (réduction partielle du fer et production de dioxyde de soufre)

$2CuO + Cu_2S \rightarrow 4Cu + SO_2$ (réduction du cuivre par le soufre, production de dioxyde de soufre. Cu_2S est ici obtenu par une désulfuration et une oxydation du fer de la chalcopyrite qui laissent un composé intermédiaire).

Si de la silice est également présente dans le système, le fer est éliminé par la formation de scories (fayalite Fe_2SiO_4). Une partie du soufre/cuivre/fer peut également rester piégée dans la matte, si elle est produite, dans le cas d'une charge improprement équilibrée. Lors d'un procédé utilisant un mélange de minerais, la matte peut donc être obtenue, comme c'est le cas pour la métallurgie extractive de minerais sulfurés complexes. Durant une réduction avec mélange de minerais carbonatés et sulfurés, l'oxygène solide du carbonate élimine le besoin d'une étape de grillage, normalement nécessaire pour éliminer le soufre, comme nous l'avons vu dans la partie précédente. La réduction du mélange de minerais peut alors être réalisée durant une seule étape, dans le même réacteur.

Différentes études, notamment des reconstitutions expérimentales, ont donc pu montrer que du cuivre métallique pouvait être obtenu durant une étape réductrice avec un mélange de minerais carbonatés/sulfurés (R. F. Tylecote, 1980; W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989; D. Bourgarit et B. Mille, 2001; T. O. Pryce, 2008; E. Burger et al., 2010; E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010). En revanche, ces études sont presque toutes basées sur des mélanges de minerais de malachite et de chalcopyrite. Or, cette thèse abordera un type de mélange différent, comme nous le verrons par la suite (voir Chapitre VII).

III.1.4. La métallurgie de transformation

Après avoir présenté les différents procédés pour la métallurgie extractive du cuivre qu'il est possible de rencontrer pour les productions anciennes, nous allons maintenant aborder la métallurgie de transformation qui permet la mise en forme des objets, susceptibles d'être identifiés pour un site archéologique.

1. L'affinage du métal

Le cuivre métallique ancien issu de l'étape de réduction est rarement pur. Il contient toujours des éléments résiduels provenant du minerai d'origine, ou des matériaux ajoutés durant l'étape de réduction, et qui vont se retrouver dans le métal réduit. On peut notamment citer le fer (P. T. Craddock et N. . Meeks, 1987) ou encore le soufre. Ces éléments peuvent être réduits ou éliminés par une étape d'affinage du métal brut qui consiste donc à rechauffer le métal brut afin d'éliminer ou de réduire les éléments non désirés. Cette étape a généralement lieu dans un creuset.

2. L'alliage

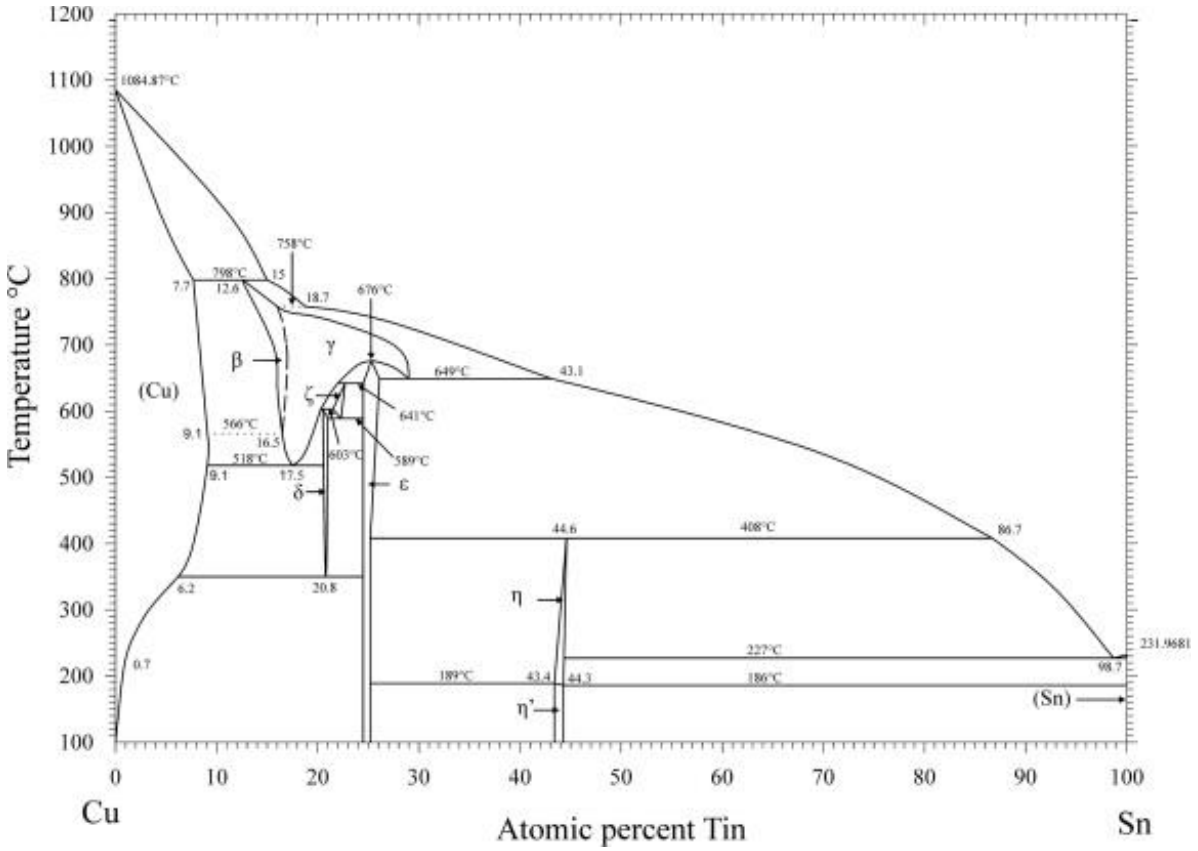


Figure 52 : Diagramme de phase cuivre-étain (S. Fürtauer et al., 2013).

Des objets découverts sur les sites archéologiques beaucoup sont souvent composés d'un alliage. Le bronze, un alliage de cuivre et d'étain (Cu-Sn), est un des plus fréquemment rencontrés pour les débuts de la métallurgie. Un autre élément d'alliage se rencontre fréquemment dans les objets, il s'agit du plomb (Pb). Le plomb est parfois associé au bronze pour former un alliage ternaire Cu-Sn-Pb (bronze au plomb), il se trouve également parfois uniquement associé au cuivre. Un troisième élément d'alliage se rencontre fréquemment dans les objets en métal. En effet, l'arsenic (As) est un des premiers, peut être le premier pour certaines régions, à être apparu avec l'étain dans les alliages archéologiques (H. Lechtman et S. Klein, 1999; L. C. Boscher, 2016, p.26). Nous allons ici laisser l'arsenic de côté, car cet

élément d'alliage est très peu rencontré dans les objets archéologiques d'Asie du Sud-Est. Nous allons revenir ici sur les différentes méthodes connues pour réaliser des alliages Cu-Sn(-Pb). L'étain et le plomb étant considérés comme éléments d'alliage lorsqu'ils sont présents à plus de 1 %mass. (E. Pernicka, 2014).

Dans un premier temps, l'étain peut être ajouté au cuivre afin d'abaisser son point de fusion qui est de 1084°C, alors que celui de l'étain est de 232°C. Par la suite, son ajout peut également revêtir un caractère esthétique, car il permet de modifier la couleur du métal (D. A. Scott, 1991). Ainsi, un bronze à forte teneur en étain aura une couleur argent. Concernant le plomb, son ajout peut avoir un caractère économique (B. Mille, 2017, p.375) en abaissant la quantité de cuivre présent dans l'objet, mais également technique, dans le cas d'objets complexes, car il permet d'augmenter la qualité de coulée. Ainsi, le cuivre au plomb est identifié par Mille (2017, p. 74) comme un alliage spécifiquement conçu pour la fonte d'objets à la cire perdue au Balouchistan ancien (Pakistan) par exemple.

Le diagramme d'équilibre Cu-Sn est complexe (Figure 52), avec plusieurs phases, ainsi que des points eutectoïdes[28]. Les phases se différencient notamment par les proportions d'étain (D. A. Scott, 1991). Les conditions de non-équilibre des procédés anciens mènent à des microstructures hétérogènes, dépendantes également de la vitesse de refroidissement. Le plomb n'est pas miscible dans le cuivre, lorsque cet élément est ajouté on le retrouve sous forme de nodules dans la matrice de cuivre/bronze (I. Vaajamo, H. Johto, et P. Taskinen, 2013). La taille des nodules de plomb est dépendante de la vitesse de refroidissement, plus elle sera lente et plus le plomb aura le temps de se rassembler en inclusions plus larges (B. Mille, 2017, p.383).

Il existe différentes méthodes pour la production d'alliage Cu-Sn :

-Le mélange de lingots de cuivre et de lingots d'étain, impliquant un lieu de production d'étain (Q. Wang et al., 2016) ;

-Une réduction intentionnelle avec un mélange de minerais de cuivre et d'étain (W. Rostoker et J. R. Dvorak, 1991; S. Rovira, L. Montero-Ruiz, et M. Renzi, 2009), cela implique une zone de production où les deux types de minerais sont disponibles ;

-L'utilisation de minerais de cuivre naturellement riches en étain, mais à faible taux (M. Radivojević et al., 2013) ;

-L'introduction de minerais oxydés d'étain (type cassitérite) dans un creuset avec du cuivre métallique déjà réduit, selon le procédé nommé cémentation (N. L. Erb-Satullo, B. J. J.

[28] *L'eutectoïde est un mélange de deux corps purs solides qui se transforme à température constante*.

Gilmour, et N. Khakhutaishvili, 2015; E. Figueiredo et al., 2017). Durant le procédé, l'étain métallique est produit par la réduction des composés d'étain et rapidement absorbé par le cuivre fondu, donnant ainsi un alliage cuivre-étain. Cette méthode d'alliage aurait pu être employée pour le site sud-est asiatique de Khao Sam Kaeo qui constitue un des seuls témoins actuels pour cette technique dans la région. De plus, le site de Khao Sam Kaeo pourrait être associé à une production d'étain (M. Murillo-Barroso et al., 2010; T. O. Pryce et al., 2017).

3. Mise en forme du métal : fonderie et post fonderie

Différentes méthodes de mise en forme des objets sont ensuite disponibles pour les anciens métallurgistes. Dans un premier temps vient l'étape de fonderie. Le métal, allié ou non, est porté à son point de fusion, puis coulé, généralement à l'aide d'un creuset, dans un moule pour lui donner la forme souhaitée. Ces moules peuvent se composer de différentes matières (pierre, argile modifiée ou non). Pour la période qui nous intéresse en Asie du Sud-Est, les moules rencontrés sont généralement en grés ou en argile. Il existe différents types de moules plus ou moins complexes : moules simples, moules bivalves et les moules à pièces. Les moules à pièces sont particulièrement connus pour la métallurgie chinoise dans les plaines centrales (voir Chapitre I). Certains types d'objets plus complexes peuvent également être produits suivant la méthode de fonte à la cire perdue[29], comme c'est peut-être le cas pour certains tambours en alliages cuivreux d'Asie du Sud-Est, même si les avis divergent encore (P. Meyers, 2011).

À l'état solide, le métal est formé d'un amas de cristaux ou grains. Les dimensions des grains sont généralement de l'ordre de quelques dizaines de microns. La taille des grains est liée à la vitesse de refroidissement, plus elle est rapide et plus les grains seront de petites dimensions. Les cuivres sont monophasés α alors que les bronzes sont souvent biphasés, avec une matrice α dans laquelle viendra s'insérer le mélange eutectoïde α+δ (Figure 53), si l'étain est présent en suffisamment forte proportion. La phase δ est dure et cassante, si elle est présente en trop grande proportion, elle peut rendre le travail de l'objet difficile.

[29] Pour une description de la technique se référer à Castelle, 2016; Mille, 2017

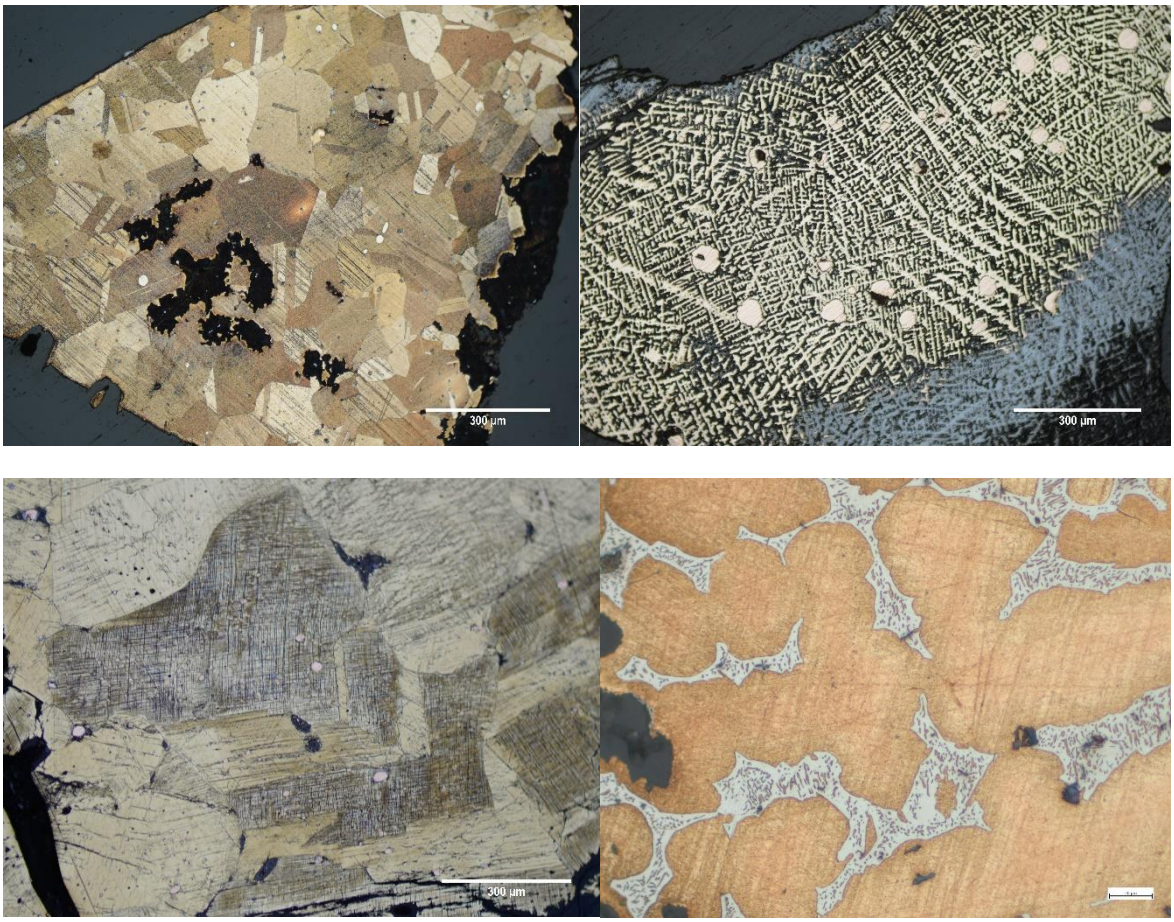


Figure 53 : Exemples de micrographies reprenant les différentes microstructures mentionnées dans le texte. En haut à gauche, bronze recuit et martelé ; en haut à droite, état brut de fonderie ; en bas à gauche, objet martelé ; en bas à droite, structure brut de fonderie avec la présence de la seconde phase riche en étain α+δ (image : auteur).

Si on regarde la microstructure de l'objet en métal directement issue de cette étape de coulée, sa structure présente généralement des dendrites : on parle alors d'une structure de brut de fonderie (Figure 53). Une structure en grain peut également être observée pour certains objets, en fonction du type de moule employé, ou de la vitesse de refroidissement pouvant également mener à cette structure. La structure en grains pour un brut de fonderie est généralement observée pour des cuivres non alliés, moins hétérogènes, que les bronzes par exemple. Il est également fréquent d'observer une ségrégation dans les dendrites des bronzes, avec un gradient de l'intérieur vers l'extérieur des dendrites, qui sera plus riche en étain.

La structure cristalline peut être modifiée via différents traitements mécaniques et thermiques une fois le métal coulé. D'autres traitements peuvent donc permettre de modifier les propriétés de l'objet : la trempe, le martelage à froid ou à chaud ainsi que le recuit. Le martelage à froid consiste à marteler un objet pour lui donner une forme désirée, ou pour obtenir un métal plus dur (Figure 53). Si on regarde la microstructure, cette étape de

martelage se traduit par la présence d'une structure écrouie avec des macles mécaniques[30] (D. A. Scott, 1991; C. Lagarde, 2008). Si l'objet a été trop martelé, il arrive que le métal devienne trop cassant pour être davantage travaillé, un recuit est alors nécessaire. La technique du recuit consiste en effet à chauffer le métal à nouveau, en dessous du point de fusion, généralement entre 500 et 800 °C pour les objets en alliages cuivreux. Le recuit permet alors de rendre ses propriétés ductiles au métal afin qu'il soit davantage martelé, si nécessaire (M. Pernot et A. Lehoërff, 2003, p.44). Au niveau de la microstructure, l'étape de recuit laisse également une trace en homogénéisant les grains, on parle de structure de recristallisation. Si l'objet a été écroui au préalable, des macles thermiques sont alors visibles dans les grains recristallisés. Bien évidemment, ces différentes techniques peuvent être appliquées plusieurs fois au cours d'un cycle sur un même objet, jusqu'à ce que la forme et les propriétés désirées soient atteintes. La technique du martelage à chaud combine les deux techniques du martelage et du recuit, ce qui conduit à observer peu de différence au niveau de la microstructure.

Généralement, les traitements appliqués à un objet pour modifier ses propriétés sont en lien avec sa destination, son usage, mais également le contexte technique. Ainsi un outil sera davantage susceptible d'être martelé et recuit afin d'augmenter sa résistance, même si certains outils découverts en contexte funéraire en Asie du Sud-Est montrent parfois le contraire (T. O. Pryce, 2011). Un objet avec un but ornemental et une forme complexe est généralement seulement coulé sans traitement postérieur, comme c'est le cas pour les tambours à base de cuivre de type *Dong son* d'Asie du Sud-Est, par exemple (C. Le Meur et al, 2021).

III.2. Approches méthodologiques

III.2.1. Approches technologiques en archéologie

La technique comme sujet d'étude nécessite de savoir manipuler certaines notions, celles de « chaine opératoire », « choix techniques », « système technique » ou encore « organisation de production ». Cette thèse se concentre majoritairement sur une approche archéologique et archéométrique, mais il nous faut définir certaines notions clés utiles à l'interprétation des résultats analytiques.

Cette recherche va privilégier l'approche technologique suivant le concept de *chaine opératoire* qui se base sur le travail de Leroi-Gourhan (1943) en anthropologie, adapté à l'archéologie par Lemmonier pour l'étude des technologies lithiques (P. Lemonnier, 1992, 1993) ou encore à la céramique (V. Roux et P. Matarasso, 1999; V. Roux, 2003, 2010).

[30] *Mechanical twins and twinned grains.*

L'approche technologique permet ainsi une lecture anthropologique des objets archéologiques.

L'application du concept de *chaine opératoire* se retrouve aujourd'hui largement pour l'étude de corpus archéologiques. Nous avons vu que la métallurgie du cuivre implique une succession complexe d'étapes, afin de passer du minerai à l'objet fini et son potentiel réseau d'échange. L'application du concept de *chaine opératoire* apparait alors tout particulièrement pertinente. La *chaine opératoire* représente le concept clé de l'étude des techniques qui peut être défini comme la succession des opérations/interactions qui transforment ou modifient la matière première en un objet, jusqu'à son abandon (« *life cycle* »). Selon Lemonnier (1992), la *chaine opératoire* comprend cinq éléments : le *moyen* (matériaux bruts), l'*énergie* (pour transformer le moyen), les *objets* (outils), les *gestes* (ce qui permet d'utiliser les *objets*) et les *savoirs*. Les différentes étapes de la *chaine opératoire* peuvent varier en fonction des contraintes fonctionnelles (propriétés des matériaux), environnementales, mais aussi culturelles, associées à chaque groupe humain (D. E. Arnold, 1985; O. P. Gosselain, 2000). La question du « choix technique » (P. Lemonnier, 1993) est également essentielle, car elle explique les potentielles variations dans différents environnements socioéconomiques et peut ainsi se poser pour chaque étape d'une *chaine opératoire*. Le *choix technique* permet d'explorer le processus de décision, le *pourquoi*, et permet de définir la sélection d'une technique particulière au sein d'autres alternatives (« variantes »). La technique et les choix font partie de la culture, mais n'en sont pas une conséquence (B. Sillar et M. Tite, 2000). Ainsi un choix technique va refléter certains besoins politiques, sociaux, environnementaux ou économiques qui peuvent être directs (environnement, savoirs techniques, système économique) ou indirects (organisation sociale, degré de spécialisation, usages, mode/intensité de distribution des productions) :

> *« Il existe des manières différentes de faire une même chose. Tenter d'expliquer ces variantes, c'est explorer leur contexte, matériel, mais aussi socioculturel, ce qui conduit généralement à la mise en évidence de liens pertinents entre un phénomène technique et une réalité sociale. »* (Lemmonier, 2010, p. 55)

Les facteurs symboliques, économiques, ou encore sociaux, derrière les systèmes techniques responsables des choix sont un point d'intérêt des archéologues (V. Roux, B. Bril, et G. Dietrich, 1995). L'étude des techniques permet ainsi d'avoir accès à de nouvelles facettes dans l'histoire des développements humains, qui ne sont pas nécessairement accessibles par l'étude seule des objets. Bien plus que l'étude des techniques, l'archéologie s'intéresse aux contextes dans lesquels les technologies se sont développées, transmises et ont été utilisées (J. W. Eerkens et C. P. Lipo, 2007; J. C. White et E. G. Hamilton, 2009; N. L. Erb-Satullo, 2020).

La technique peut également évoluée en fonction des contextes (« *changement technique* »), ainsi adaptée aux nouvelles conditions liées à ces changements (P. Lemonnier, 1992, 1993; P. Pétrequin, 1993; D. Killick, 2004; V. Roux, 2008). Le concept de « style technique » (H. Lechtman, 1977) définit que le « style » se retrouve dans toutes les étapes du processus. Le « style technique » peut donc être perçu comme le résultat de la succession des « choix techniques » et peut alors permettre de différencier des groupes humains.

En métallurgie, il faut également introduire un paramètre indirect supplémentaire qui est l'hétérogénéité (variation de température, composition de la charge, etc.) inhérente à la pratique et qui peut venir influencer le produit final ou les sous-produits, comme les scories (J. Humphris et al., 2009). Cette variation est alors dépendante de l'artisan, mais également du procédé en lui-même, qui varie d'une réduction à une autre et n'est pas nécessairement pleinement observé/comprise par l'artisan lui-même.

Le concept de « système technique », introduit par Bertrand Gille signifie que dans une société à une époque donnée, les techniques connues sont liées les unes aux autres, de même que ce système technique est en relation avec les autres systèmes de la société (économique, sociale, politique, etc. Gille, 1978). Ainsi le « complexe technique » va ensuite désigner un matériau ou un procédé, par exemple le métal ou la métallurgie. Un objet peut être étudié par sa technologie, sa technique en fonction de l'ensemble des matériaux, des savoirs, des gestes et des outils intervenants dans sa fabrication, mais également par les relations qu'il peut entretenir avec d'autres techniques, sur le partage de connaissance, ou encore de matière première (P. Lemonnier, 1983). Ainsi, une technique, ici en l'occurrence la métallurgie du cuivre, peut interagir avec d'autres, comme la céramique, qui peut également être une part importante de la chaine opératoire pour la métallurgie du cuivre, dans le sens où elle permet de façonner les creusets ou encore les fours.

La caractérisation de la chaine opératoire en archéométallurgie peut également permettre celle des communautés, car elle implique un niveau d'expertise élevée, qui peut varier en fonction des groupes (et même des artisans) et régions, mais également des matières premières disponibles (D. Killick, 2004). Les procédés métallurgiques peuvent impliquer différents niveaux d'expertise. Ainsi, on peut observer des procédés matures avec un niveau technique élevé permettant la réalisation d'objets complexes et sophistiqués comme les vaisselles cérémonielles de la Dynastie Shang en Chine, impliquant des artisans spécialisés (peut être à plein temps) contrairement à d'autres techniques qui requièrent un savoir-faire moins sophistiqué et pourront être plus largement pratiquées. Ainsi ce niveau d'expertise plus ou moins élevé pourra, dans certains contextes et pas seulement pour la métallurgie, permette de différencier des groupes d'artisans. Nous avons déjà mentionné l'exemple des

ornements en pierres dures d'Asie du Sud-Est, dont les compétences techniques élevées nécessaires à leur fabrication ont permis à Bérénice Bellina de proposer la présence d'artisans indiens pour la péninsule Thaï-malaise (B. Bellina, 2001, 2007).

Les variations dans les choix techniques associés aux processus sociaux, économiques et/ou pratiques peuvent également affecter la distribution des variantes techniques et de leurs innovations (M. T. Stark, 1998 b), comme l'accès à certaines matières premières par exemple. Dans notre cas, l'accès à la matière première du cuivre est inégalement réparti en fonction des régions d'Asie du Sud-Est concernées. On observera donc, assez normalement, des adaptations et des développements différents en fonction des zones géographiques, et de l'accès à cette matière première (S. J. Shennan, 1999). Les études comparatives entre différentes chaines opératoires prennent alors tout leur sens, car elles peuvent également permettre d'identifier les « choix » faits par différentes communautés et leurs relations, en définissant ainsi des alternatives. Dans ce travail, cette étude comparative sera particulièrement effectuée entre les deux productions primaires de cuivre de Vilabouly et de la vallée de Khao Wong Prachan.

Le concept de chaine opératoire en archéométallurgie implique alors la compréhension du cycle de vie d'un objet (P. Fluzin et P. Dillmann, 2012), de l'extraction des minerais jusqu'à son abandon en intégrant les structures sociales, politiques et économiques dans lesquelles cet objet est né et a évolué (B. S. Ottaway, 2001). Comprendre l'organisation des productions peut également revêtir un caractère important pour les études en paléométallurgie, car elle révèle aussi certains traits des populations qui l'ont mise en place. L'organisation de la production a largement été évoquée par Costin (1991) qui la définit selon les notions de « contexte » (nature du contrôle et de la distribution), la « concentration » (concentration des sites de productions), « l'intensité » (degrés auxquels le producteur est impliqué, à plein temps, saisonnier, etc.) et « l'échelle » (étendue des aires de production). Ces notions doivent s'appliquer dans le contexte d'étude, ainsi « l'intensité » ou « l'échelle » ne sera pas la même pour l'Asie du Sud-Est à la fin de la préhistoire et celle de la Chine des plaines centrales pour une période chronologique contemporaine. Cette thèse tentera d'apporter des hypothèses sur l'organisation de la production au sein du Complexe de Vilabouly, mais également aux réflexions déjà existantes, à l'échelle de l'Asie du Sud-Est continentale. Certaines hypothèses devront bien sûr être confortées par de futures études.

En revanche, contrairement aux anthropologues ou aux ethnoarchéologues, les archéologues n'ont pas un contact direct avec les sociétés anciennes et ne peuvent pas les « questionner » sur leurs choix. Ainsi, l'archéologie doit trouver d'autres outils :

> « *We may compensate for this in part by painstaking reconstruction of* chaînes opératoires *by archaeological and archaeometric analysis, through insights gained from experimental replication, and by evaluating all this evidence in its full archaeological context."* (Killick, 2004, p.573)

L'inclusion d'étude ethnographique, anthropologique, archéométrique ainsi que l'archéologie expérimentale peut également apparaitre comme un moyen d'accéder à une dimension d'informations différente et non visible seulement par l'archéologie (R. B. Gordon et D. Killick, 1993; S. T. Childs et D. Killick, 1993). Pour l'Asie, les études ethnographiques comme celles menées au nord du Laos par Oliver Evrard (O. Evrard, 2006) ou par Niels Anfinset (2011) au Népal peuvent nous renseigner sur le contexte social, religieux ou encore économique de certaines ethnies actuelles. Sans dire que ces sociétés n'ont pas évolué depuis la fin de la préhistoire, certains aspects peuvent s'avérer intéressants et engendrent souvent d'autres questionnements dans le cadre des études protohistoriques, car elles apportent des données qui sont encore pour la plupart manquantes par le biais seul de l'archéologie, en particulier pour certaines régions comme le Laos.

Cette thèse va s'appuyer dans un premier temps sur l'analyse des matériaux, des objets, qui est aujourd'hui pleinement intégrée à l'étude des technologies anciennes (B. Pfaffenberger, 1992; D. Killick, 2004; M. Martinón-Torres et D. Killick, 2015) car elle permet d'avoir accès un certain nombre d'informations nécessaires à l'appréhension de la technologie. L'application des Sciences à l'Archéologie (« *Archaeological Sciences* ») a pendant une période été controversée, car considérée sans rapport avec l'archéologie, ou même dénué de théories (M. Martinón-Torres et D. Killick, 2015) mais elle est aujourd'hui pleinement intégrée dans de nombreuses études et domaines variés (métallurgie, archéobotanique, céramologie, études génétiques, provenance, etc.). Les Sciences Archéologiques sont, par fondement, pluridisciplinaires en entretenant un lien inextricable entre archéologie et travail de laboratoire.

L'étude de la métallurgie nécessite de connaitre les propriétés intrinsèques des matériaux employés, les modalités de façonnage, les réactions de la matière, permises grâce à l'apport de la science des matériaux. L'analyse des matériaux permettra de définir les principales caractéristiques d'un point de vue chimique, technique ou encore morphologique des différents artéfacts étudiés. Nous nous intéresserons à différentes étapes de la chaine opératoire de production du cuivre, des minerais aux objets finis, mais également à leurs réseaux d'échanges. Nous aborderons donc les étapes de la métallurgie extractive du cuivre (primaire), mais également de transformation (secondaire) à travers les objets finis. Dans un second temps, les autres données disponibles à Vilabouly, comme les contextes funéraires ou

l'organisation spatiale, seront intégrées aux données obtenues sur les artéfacts afin de répondre à un certain nombre de questionnements : est-ce que l'activité de Vilabouly peut être décrite comme « intense » ? Le site était-il exploité par une communauté ? Plusieurs ? Est-ce un peuplement permanent ? Des variations techniques au cours du temps sont-elles identifiables ? Pourquoi une production de cuivre à cet emplacement géographique ? L'emplacement de cette production s'explique en grande partie par ses riches dépôts de cuivre, mais peut-on y percevoir d'autres motivations, davantage culturelles/sociales/politique ? Bien évidemment, nous admettons qu'il ne sera pas possible dans le cadre de cette thèse d'apporter des réponses à tous ces aspects, et certains resteront non résolus, mais nous espérons pouvoir y apporter une contribution, qui pourra être complétée par de futures études.

III.2.2. Caractérisation des témoins d'une production de cuivre ancienne

La production de métaux implique une succession de différentes activités, associées à des transformations physico-chimiques, pour passer de l'état de minerai au produit fini métallique. L'artisan doit également se procurer divers matériaux (minerais, roches, bois, argile, sable, terres, végétaux, etc.) pour fabriquer des outils, ou encore des structures. Pour les débuts de la métallurgie du cuivre, différents types de matériaux de la chaine opératoire mise au jour sur les sites archéologiques sont les témoins de ces activités métallurgiques anciennes. Les principaux sont les minerais, les scories, les céramiques techniques (creusets, tuyères, parois de four), les moules, et enfin les objets à base de cuivre. Ces vestiges sont souvent fragmentaires et certains sont souvent manquants. Des méthodes pluridisciplinaires pour l'étude de ces procédés anciens sont donc nécessaires afin d'appréhender la totalité des techniques impliquées, ainsi que leurs variations (B. Metten, 2003; A. Hauptmann, 2007; P. Fluzin et P. Dillmann, 2012). L'archéométallurgie s'est ainsi développée depuis plusieurs décennies (M. Martinón-Torres et D. Killick, 2015), mais les méthodologies pour l'étude des productions de cuivre sont toujours en développement. Les moyens d'étude mis en œuvre aujourd'hui sont issus du croisement pluridisciplinaire des approches archéologiques et archéométriques. La restitution des différents choix techniques se fait au travers d'un examen visuel, mais également de différents moyens disponibles en laboratoire (observation en microscopie, composition élémentaire, structurale, etc.) qui permettent l'accès à davantage d'informations complémentaires, et une restitution plus précise de la chaine opératoire. Pour cette thèse, nous aurons donc accès à différents artéfacts de la chaine opératoire que sont les minerais, les scories, les céramiques techniques et les objets en métal qui seront étudiés en laboratoire suivant une méthodologie adaptée (voir Chapitre IV).

1. Les céramiques techniques

L'étude des céramiques techniques, parfois nommées réfractaires pour cause de leur usage durant des étapes hautes températures, peut mettre en lumière un certain nombre d'informations sur les procédés anciens, car elles sont utilisées pour diverses étapes. Le terme céramique technique est appliqué aux céramiques employées durant le procédé métallurgique, ou autres opérations haute température (Martinón-Torres et Rehren, 2014). Au travers de l'étude de leur forme, dimensions, températures contenues ainsi que les matières premières utilisées pour leur fabrication (Tableau 8), qu'elles soient choisies avec attention ou non, les céramiques techniques sont également le reflet du savoir-faire des artisans et de leur degré de standardisation (Freestone et Tite, 1986). Les céramiques techniques apparaissent donc comme un élément majeur de la chaine opératoire de production du cuivre, constituant généralement le contenant dans lequel l'opération pyrométallurgique prend part, four/foyer ou creuset. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux creusets qui peuvent être employés pour la réduction, l'affinage, la fonte ou encore la réalisation d'alliage. Leur étude, que ce soit du creuset en lui-même, ou de ses résidus internes, peut donc apporter diverses informations directes sur les procédés. De plus, les céramiques techniques font intervenir une technologie à part entière, celle de la terre cuite, de la céramique, qui est généralement utilisée dans d'autres aspects de la vie quotidienne, comme l'alimentation. Il sera intéressant de voir comment cette technologie peut être adaptée ou non en fonction de sa destination.

L'étude des creusets va être appréhendée au travers de différentes études de cas fournies par la littérature (W. W. Vernon, 1997, 1996; T. Rehren, 2003; J. Bayley et T. Rehren, 2007; M. Martinón-Torres et al., 2008; A. Arles, 2009; A. Hassan Al-Shorman aus Al-Mazar, 2009; T. O. Pryce et al., 2010; M. Martinón-Torres et T. Rehren, 2014; F. W. Rademakers, 2015; N. L. Erb-Satullo, B. J. J. Gilmour, et N. Khakhutaishvili, 2015) car aucun auteur n'a pour le jour référencé la totalité de nos connaissances en matière d'étude technique des creusets anciens.

	Éléments à considérer	Informations
Examen macroscopique	Forme, taille, couleur de la pâte, présence/absence de scorie, dégraissant, orientation de la chauffe (s'il y a)	Céramique technique Type de chauffe Forme : comparée à la littérature Différences dans les formes ?
Composition de la pâte (MEB-EDS, DRX)	Type d'argile Nature du dégraissant	« Qualité réfractaire » Homogénéité des types de fabriques employées Degré de modification de l'argile
Fonction du creuset	Forme et taille Éléments résiduels (Sn, Pb…)	Réduction Affinage Alliage

Tableau 8 : Éléments à prendre en compte pour la caractérisation des céramiques techniques.

2. Les scories

Les scories représentent les témoins majeurs d'une activité de production ancienne. Bien qu'elles soient parfois réutilisées, en leur qualité de sous-produit, elles sont fréquemment abandonnées sur les sites archéologiques et représentent donc le premier signe d'une transformation primaire haute température de minerais (H. G. Bachmann, 1982). En plus d'être un témoin majeur de l'activité de production, elles portent également un certain nombre d'informations sur les conditions développées durant le procédé (Tableau 9). Les scories peuvent être produites durant différentes étapes du procédé métallurgique, mais sont généralement majoritairement associées à l'activité de réduction (A. Hauptmann, 2007, p.13-16). En effet, elles sont un produit direct de l'activité de réduction, leur macrostructure et microstructure peuvent donc nous renseigner sur l'histoire thermodynamique et cinétique ayant amené leur formation, donc sur le procédé de production en lui-même (Tableau 9). Les scories ont une composition et une structure complexes résultant des conditions durant le procédé et de la composition de la charge d'origine, ainsi que du réacteur (s'il y a contribution).

Les fondements de la méthodologie appliquée pour l'étude des scories ont été dressés par Hans Gert Bachmann en 1980, passant d'une étude morphologique, aux études de microstructure et de composition, qui sont maintenant systématiquement appliquées à l'étude des productions de cuivre anciennes. Depuis le travail de Bachmann, aucune référence bibliographique ne recense les différents types de scories, phases, etc. qu'on peut retrouver en archéométallurgie. Comme dans le cas des creusets, notre travail va donc utiliser différentes études de cas comme moyen de comparaison (A. Hauptmann et G. Weisgerber, 1980; B. Höppner et al., 2005; R. Saez et al., 2007; A. Hauptmann, 2007; T. O. Pryce, 2008; E.

Burger, 2008; F. Nocete et al., 2008; D. Bourgarit et al., 2010; M. Georgakopoulou, Y. Bassiakos, et O. Philaniotou, 2011; D. Larreina-Garcia, B. Cech, et T. Rehren, 2012; N. L. Erb-Satullo, B. J. J. Gilmour, et N. Khakhutaishvili, 2014; G. Artioli et al., 2015; A. Addis et al., 2016; T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016; A. Addis, I. Angelini, et G. Artioli, 2017; D. Larreina-García, 2017). Lorsque le chercheur est confronté à un assemblage de débris de production du cuivre provenant d'un contexte, l'hypothèse de départ est qu'il représente une seule industrie, également à relier à la chronologie et la stratigraphie. Or des variations sont souvent présentes dans les assemblages. Certaines sont inhérentes à la pratique (caractère hétérogène des scories issues d'une seule réduction et entre les réductions), alors que d'autres proviennent de choix et de connaissances (utilisation de plusieurs recettes, différentes étapes de production, évolutions des matières premières, etc.). La chimie d'une scorie est liée aux sources de matières premières employées : argile, minerais et combustible (Tableau 10). Ces matières premières sont généralement différentes d'un lieu de production à un autre et peuvent donc permettre de différencier les productions.

	Éléments à considérer	**Informations**
Éléments polluants provenant du réacteur	K, Al, P, Ca (généralement dans le verre)	Forte pollution peut signifier l'utilisation d'une céramique peu réfractaire
Pollution du combustible	Ca (charbon), K	Ca>5-10 wt.% = formation clinopyroxènes (augite)
Minéraux non fondus	Quartz (Si), minerais (Cu, S, Fe…)	Éléments résiduels de la charge (minerais employés+ fondants)
Nature des phases présentes	Ex. : magnétite, wüstite, olivines…	Température atteinte dans le réacteur ; pO_2
Viscosité des scories		Évaluer l'efficacité du procédé dans la séparation métal/impuretés
Cu résiduel	Nature : Cristaux cuivre métallique et/ou inclusion matte Quantité	Évaluer l'efficacité du procédé = rendement dans la récupération du cuivre
Degrés d'oxydation de la scorie (taux de Fe^{3+})	Valence du fer, Fe^{2+} et Fe^{3+} par Spectroscopie Mössbauer Cristallographie	Estimation de la pO_2 : conditions réductrices/oxydantes

Tableau 9 : Éléments à prendre en compte pour la caractérisation des scories.

	FeO	**MnO**	**SO_3**	**ZnO**	**CaO**	**MgO**	**P2O5**	**K_2O**	**Na_2O**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**TiO_2**
Minerai	●	●	●	●	●	●	●			●	●	
Combustible					●	●	●	●	●			
Argile										●	●	●

Tableau 10 : Les principaux composés identifiés dans les scories archéologiques avec leurs potentielles origines (minerai, cendres du combustible ou argile).

3. Les objets en métal

Enfin, les objets finis en métal apportent des informations sur les répertoires typologiques/stylistiques présents sur un site, ainsi que les différentes techniques de fabrication/mise en forme connues et employées (Tableau 11). Ces différents aspects peuvent être appréhendés selon les points évoqués en partie II.1.4 (fonderie, alliage, techniques de mise en forme). Les objets finis peuvent également être perçus comme objets d'échange, de consommation, au travers de leurs réseaux de circulation afin de comprendre pour quel(s) usage(s)/pour qui ils ont été fabriqués, d'où ils sont originaires et comment ils sont parvenus sur le site archéologique de leur consommation et de leur abandon (Tableau 11), ce qui relève alors des études de provenance et des réseaux d'échanges.

	Éléments à considérer	*Informations*
Examen macroscopique	Typologie Présence des produits de corrosion Traces d'outils	Répertoires stylistiques Techniques de mise en forme Zones de prélèvements
Composition/Microstructure	Alliage Présence de fer/soufre Inclusions Structure des grains	Hétérogénéité/homogénéité Traditions techniques (alliages) Techniques de fonderie Métallurgie de transformation (martelage, recuit, etc.)
Provenance	Isotopes du plomb Éléments traces	Origine/circulation du cuivre-objet Recyclage

Tableau 11 : Éléments à prendre en compte pour la caractérisation des artéfacts métalliques.

III.2.3. Définir l'origine et la circulation d'un objet : analyse isotopique du plomb et éléments traces

En plus de l'approche technique par l'étude de la chaine opératoire, cette recherche va également s'appuyer sur une étude de provenance par l'application des analyses isotopiques du plomb. En effet, en plus d'être porteurs d'informations sur les techniques, les objets en métal peuvent également être abordés en leur qualité de biens d'échanges, car ils sont souvent inclus dans les réseaux en fonction des contextes économiques et/ou sociaux. Les études de provenance des objets à base de cuivre ancien combinent généralement des analyses isotopiques et d'éléments traces, afin d'associer un objet à son dépôt de cuivre, à sa région d'origine ou du moins d'exclure de potentielles sources. Le développement des analyses isotopiques du plomb pour des objets à base cuivre dans les années 1960 est venu apporté de nouvelles perspectives aux études de provenance (N. H. Gale et Z. Stos-Gale, 1982; Z. Stos-Gale et N. H. Gale, 1992; E. Pernicka et al., 1993), accompagnées de nouvelles techniques de mesures plus sensibles permettant de meilleurs niveaux de détection, notamment la spectrométrie de masse.

L'analyse des isotopes du plomb se base sur la formation de quatre isotopes stables, ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb et ^{208}Pb dont les trois derniers sont les produits de l'uranium et du thorium. ^{204}Pb est constant et sa concentration correspond donc au taux original dans le plomb. Depuis la formation de la Terre, les taux initiaux en U (^{235}U et ^{238}U) et Th (^{232}Th) ont évolué en fonction de leur désintégration. Ceci a mené à un accroissement des isotopes radioactifs ^{206}Pb, ^{207}Pb et ^{208}Pb. La fréquence de ces isotopes n'est pas constante, car le Thorium et l'Uranium ne sont pas homogènes dans la croute terrestre (G. Faure, 2001). Les meilleurs résultats de provenance en archéométallurgie ont été atteints par la mesure de trois ratios isotopiques : $^{208}Pb/^{206}Pb$, $^{207}Pb/^{206}Pb$ et $^{204}Pb/^{206}Pb$ (A. Hauptmann, 2007), bien qu'on leur associé aujourd'hui d'autres méthodes issues d'études statistiques (Y. K. Hsu et B. J. Sabatini, 2019). L'intérêt principal des analyses isotopiques du plomb pour les études de provenance est le constat que les ratios isotopiques n'évoluent pas durant le procédé métallurgique et restent constants (N. H. Gale, 1989). Ces ratios sont alors caractéristiques d'un dépôt d'origine de la matière première du cuivre. Afin d'obtenir la signature isotopique d'un dépôt, certaines sélections sont recommandées au sein du même dépôt de minerais, car des variations dans la signature isotopique peuvent être parfois identifiées. Il est également possible que deux dépôts éloignés géographiquement aient la même signature, le même âge (S. Baron, C. G. Tămaş, et C. Le Carlier, 2014). Baron et al (2014), soulignent alors l'importance d'identifier les minerais exploités par les anciens métallurgistes, et celle de combiner géologie et archéologie. Une meilleure alternative à l'utilisation des minerais pour déterminer la signature est celle des scories. En effet, comme nous l'avons mentionné, les scories lorsqu'elles sont présentes, sont un témoin privilégié de l'activité métallurgique ancienne dans une région et une période. Une fois que la signature isotopique d'un dépôt a pu être caractérisée, elle peut ensuite être comparée à celles d'objets afin de tenter d'attribuer la matière première de l'objet à une origine, ou tout du moins d'en exclure certaines.

En revanche, il faut tout de même prendre en considération certains aspects qui peuvent venir modifier et influencer la signature chimique d'un objet : la présence d'un élément d'alliage, la pratique du recyclage, du mélange, de la refonte ainsi que les changements induits lors de l'enfouissement de l'objet (M. A. Pollard, 2009, 2011; P. J. Bray, M. A. Pollard, et M. Carver, 2012; P. Bray et al., 2015). Certains éléments ajoutés durant le procédé métallurgique, comme un fondant, ou encore les matériaux utilisés pour construire un foyer, possèdent leur propre signature isotopique pouvant venir influencer celle de l'objet final. L'ajout d'un élément d'alliage au cuivre constitue le principal biais à la signature isotopique d'un objet. Les minerais d'étain par exemple dans le cas d'un bronze, peuvent également contenir du plomb. Lorsque du plomb est présent dans l'alliage, la signature isotopique obtenue sera alors celle du plomb et non du cuivre, répondant alors à d'autres réseaux d'échanges. Ces différents aspects sont

maintenant considérés lors des études de provenance des objets à base de cuivre, mais ils sont encore difficiles à modéliser et rendent parfois les interprétations compromises (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014).

L'intérêt de combiner analyse isotopique du plomb et éléments traces prend alors ici tout son sens afin d'obtenir les données les plus fiables possibles (E. Pernicka, 1993, 2014, p.12-13). Dans le cadre de cette thèse, l'analyse des éléments traces dans les objets à base de cuivre n'a pas pu être mise en place, mais elle pourra facilement être complétée dans le futur. Concernant les éléments traces, tous ne sont pas significatifs lorsqu'on parle de provenance (Tableau 12). En effet, il faut sélectionner les éléments qui restent constants durant le procédé de réduction, entre le minerai et le cuivre. Les éléments à considérer en fonction du type d'informations souhaitées ont été définis comme suit :

Production	**Production et/ou provenance**	**Provenance**
Al, Ba, Ca, Cr, Fe, Ge, K, Mg, Mn, Mo, Na, Si, Sr, Ti, W	As, Cd, Co, Hg, In, P, Sb, Se, Te, Tl	Ag, Au, Bi, Co, Ir, Ni, Os, Pd, Rh, Ru, Sb
Sn> ca. 1 %mass.	Sn< ca. 1 %mass.	
Zn > ca. 2 %mass.	Zn < ca. 2 %mass.	
Pb> ca. 1 %mass.	Pb< ca. 1 %mass.	

Tableau 12 : Répartition des éléments traces en fonction du type d'étude réalisée (données d'après Hauptmann, 2007, p.31 ; Pernicka, 2014, p. 16).

III.2.4. Archéologie expérimentale

L'archéologie expérimentale regroupe un certain nombre de domaines : des considérations théoriques, des analogues ethnographiques, des sources historiques et les travaux expérimentaux (J. Heeb et B. S. Ottaway, 2014). Nous nous intéresserons ici tout particulièrement aux travaux expérimentaux, car les autres domaines sont hors de portée, hormis pour un exemple d'analogue ethnographique (N. Anfinset, 2011). Le premier écrit théorique sur l'archéologie expérimentale a été publié par Ascher (1961), puis a connu une période de défaveur avec le développement des théories de l'archéologie postprocessuelle dans les années 1970, avec une remise en question de l'application des sciences naturelles en archéologie.

Dans l'objectif de reconstituer les différentes étapes d'une production de cuivre, les chercheurs ont souvent recours aux approches expérimentales en laboratoire ou sur le terrain qui s'avèrent être un outil performant afin d'appréhender certaines facettes des procédés/techniques, qui ne sont pas nécessairement visibles au travers de l'étude du site, ou des artéfacts (M. Coles, 1967; D. Killick, 2004). L'apport de l'ethnoarchéologie, notamment en

Afrique (N. David et al., 1989; S. T. Childs et D. Killick, 1993) a également permis de montrer que les reconstitutions expérimentales pouvaient apporter des informations techniques, en revanche, elles sont limitées dans l'approche « sociale », de toutes les symboliques autour de l'action technique. Les reconstitutions expérimentales se basent aujourd'hui en grande partie sur des résultats en laboratoire ou sur des recettes anciennes, afin de tester des reconstitutions théoriques et/ou de les ajuster (pour ne citer que quelques exemples en métallurgie du cuivre : J. F. Merkel, 1990; H. Lechtman et S. Klein, 1999; D. Bourgarit et B. Mille, 2001 b; E. Burger et al., 2010; E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010). En revanche, les reconstitutions expérimentales ne permettent pas de valider avec certitude un modèle de reconstitution des procédés anciens, mais elles montrent une possibilité (R. Ascher, 1961; M. Coles, 1967). Chaque expérimentation conduite représente alors une possibilité pouvant venir appuyer une théorie, mais ne permet pas avec certitude de conclure que cette possibilité était absolument celle employée anciennement. Les reconstitutions expérimentales ne doivent pas seulement être perçues comme « un moyen » de vérifier des reconstitutions théoriques, mais comme un outil à part entière. En effet, l'anthropologie a également démontré l'intérêt d'analyser l'action technique en elle-même (P. Lemonnier, 1992; V. Roux, B. Bril, et G. Dietrich, 1995) et cette action technique ne peut être perçue qu'au travers de l'archéologie expérimentale. Elle permet une immersion personnelle de l'utilisateur, de « sentir », ou « d'expérimenter », la technique et les gestes. La répétition permet ainsi d'avoir accès aux gestes techniques et d'acquérir une certaine « expérience ». Les expérimentations doivent être reproductibles, afin de satisfaire également des analyses statistiques.

Au cours de cette thèse, des réductions expérimentales ont été conduites afin d'illustrer certaines des problématiques issues des études de laboratoire, dont les données ne permettaient pas de définir des conclusions sures. Les expérimentations ont également soulevé d'autres questions qui ne l'avaient pas été au travers de l'étude seule des artéfacts archéologiques.

Chapitre 4 : Méthodologie analytique d'étude des échantillons

Le précédent chapitre nous a permis d'évoquer les différentes caractéristiques inhérentes à la chaine opératoire de production du cuivre, de l'étude des minerais aux objets finis, ainsi que les différentes informations que leurs études peuvent nous apporter. Nous allons à présent développer la méthodologie appliquée à l'étude des artéfacts du Complexe de Vilabouly, au travers de différentes méthodes de caractérisations morphologiques et physico-chimiques à plusieurs échelles en laboratoire. Ces techniques ont pour but d'apporter des informations morphologiques, compositionnelles et structurales des échantillons afin de définir leur composition globale, ainsi que la composition et l'identification des différentes phases qu'ils contiennent qui nous apporteront diverses informations sur le procédé métallurgique.

IV.1. Méthodologies d'analyses

Avant tout prélèvements, les artéfacts ont été observés à l'œil nu, de manière assez large au Laos (District de Vilabouly), puis de façon plus détaillée au Laboratoire Archéomatériaux et Prévisions de l'Altération (NIMBE/LAPA) à Saclay (France). L'observation macroscopique au Laos a eu pour but de vérifier l'association des artéfacts au procédé métallurgique avant toute sélection, mais également de faire des groupes en fonction du type de matériaux (scories, céramiques techniques, minerais, métal) et de différencier au préalable de potentiels groupes basés sur la morphologie. Tous les artéfacts ont ainsi été pesés et mesurés, puis photographiés. L'observation macroscopique permet également de dresser les premières caractéristiques des artéfacts étudiés avant l'étude en microscopie.

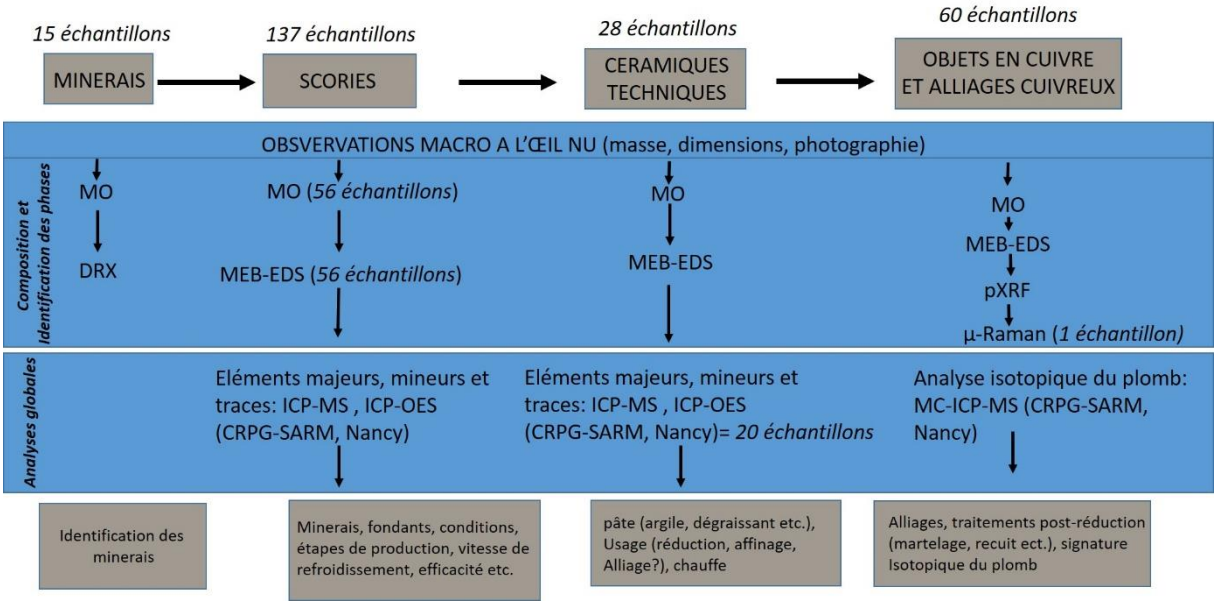


Figure 54 : Schéma reprenant les différentes méthodes appliquées à l'étude des échantillons par type de matériau.

IV.1.1. Les minerais

Les minerais ont été observés à l'œil nu, pesés et photographiés (Figure 54). Ensuite, ils ont été observés en section au Microscope Optique (MO) en champ clair et en champ noir. Ce dernier mode d'éclairage permet de distinguer quelques types d'inclusions, comme les oxydes de cuivre, qui s'illuminent en rouge, des sulfures de cuivre, qui restent noirs. L'analyse qualitative des échantillons permet dans un premier temps d'apprécier leur homogénéité et d'identifier les inclusions/phases qu'ils contiennent. L'observation au microscope optique permet ainsi de mettre en avant les différentes phases et structures présentes dans les échantillons, afin de faciliter par la suite l'analyse au MEB-EDS. La composition des échantillons a ensuite été obtenue par analyse au MEB-EDS, puis leur structure a été déterminée en Diffraction des Rayons X (DRX).

IV.1.2. Les céramiques techniques

Les céramiques techniques ont également été observées à l'œil nu, pesées, mesurées et photographiées (Figure 54). Ensuite, des échantillons ont été observés en section au Microscope Optique (MO) en champ clair. Les différentes phases observées ont été comparées à la littérature selon les références citées en partie III.2.2. Ensuite l'observation s'est poursuivie au MEB-EDS qui a également permis d'obtenir la composition des échantillons, ainsi que des phases identifiées au MO. Pour une partie des échantillons de creusets (18 échantillons), la composition globale en éléments majeurs, mineurs et traces a également été obtenue par analyse en ICP-MS et ICP-OES au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) mais uniquement sur la partie céramique des creusets.

IV.1.3. Les scories

Comme les autres types d'artéfacts, les scories ont été observées à l'œil nu, pesées, mesurées et photographiées (Figure 54). Pour les 132 échantillons de scories, les compositions globales en éléments majeurs, mineurs et traces ont également été obtenues par analyse en ICP-MS et ICP-OES au CRPG. Ensuite, une sélection de 56 échantillons a été observée en section au Microscope Optique (MO) en champ clair et en champ sombre. Les différentes phases observées ont ainsi été comparées aux références bibliographiques citées en partie III.2.2. Ensuite, l'observation s'est poursuivie au MEB-EDS, qui a également permis d'obtenir la composition des différentes phases observées au Microscope Optique et ainsi de conforter leur identification.

Une sélection des scories à analyser aux MO et MEB-EDS a été nécessaire, car la totalité des 132 échantillons ne pouvait pas l'être, par manque de temps principalement. Afin d'effectuer une sélection plus précise de scories à analyser au laboratoire suite aux résultats du CPRG, les données ont été soumises à un traitement statistique par analyse multivariée qui est

largement appliqué en archéométrie à l'étude de larges corpus (ex : Baxter, 2006; Charlton et al., 2012; Disser, 2014; Leroy et al., 2017), notamment l'Analyse en Composante Principale (ACP) suivie d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

Les scories ont ensuite été sélectionnées à partir des résultats des clusters de la CAH, en fonction des deux sites, Puen Baolo et Thong Na Nguak pour représenter la moyenne, mais également les potentiels échantillons provenant de clusters marginaux, pouvant matérialiser des variantes. Les résultats de l'ACP nous ont également permis d'identifier les éléments qui avaient la plus forte contribution à la variance. Le taux de soufre a été notamment pris en compte afin de déterminer de quelle(s) phase(s) il pourrait provenir, apportant des renseignements sur le(s) type(s) de minerai(s) employé(s). Certains échantillons comportant des variations plus élevées dans les taux d'oxydes de fer et de silice, par rapport à la moyenne ont également été sélectionnés, car ils pourraient matérialiser des échantillons plus hétérogènes, contenant des inclusions de minéraux partiellement fondus, par exemple, pouvant apporter des informations sur la charge de réduction. Ce type d'échantillon est rare dans le corpus. Les échantillons en section ont globalement une texture homogène. Les scories contenant des résidus de céramique et/ou de sol sur une de leur face ont également été sélectionnées.

IV.1.4. Le métal

Les objets en métal ont été observés à l'œil nu, pesés, mesurés et photographiés sur place au Laos (Figure 54). Ensuite, les 60 échantillons ont été observés en section au Microscope Optique en champ clair avant et après attaque chimique afin de révéler leur microstructure. L'observation s'est poursuivie au MEB-EDS qui a également permis d'obtenir leur composition élémentaire. La composition élémentaire a également été obtenue par analyse en fluorescence X portable (p XRF), afin d'avoir accès à davantage d'éléments et pour comparaison des résultats au MEB-EDS. Pour tous les échantillons de métal, les ratios isotopiques du plomb ont également été obtenus au CRPG, afin d'obtenir leur signature.

Les données isotopiques pour le Complexe de Vilabouly sont ensuite comparées à une base de données initiée par T.O Pryce dans le cadre de SEALIP (*Southeast Asian Lead Isotope Project*) qui se poursuit actuellement par BROGLASEA (*Bronze and Glass as Cultural Catalyst and Tracers in Early Southeast Asia*) dans le cadre duquel se réalise cette thèse. Cette base de données regroupe les signatures isotopiques du plomb d'objets à base de cuivre, ainsi que de scories, pour de nombreux sites de la fin de la préhistoire en Asie du Sud-Est (T. O. Pryce et al., 2011 a, 2014). Elle permettra donc d'appréhender la place et la circulation des productions de Vilabouly à l'échelle de la région dans le Chapitre VIII.

Un échantillon de métal (SEALIP/LA/PBL/11) a également été analysé par µ-spectroscopie Raman afin d'identifier une phase précise.

Notre stratégie d'échantillonnage avait pour but d'éviter les zones comportant des produits de corrosion, mais cela n'a pas toujours été réalisable lorsque les objets étaient trop altérés. Pour certains échantillons, il est néanmoins possible de déduire la structure du métal en observant les produits de corrosion, dont des « structures fantômes » conservent toujours la morphologie des grains d'origines.

Dans le cas des échantillons de métal (de taille millimétrique), il faut également prendre en compte que la dimension des échantillons ne doit pas être représentative de la totalité de l'objet, car comme nous l'avons vu, les artéfacts archéologiques sont souvent hétérogènes.

IV.2. Méthodologie d'analyse

IV.2.1. Méthodes de prélèvement et préparation des échantillons

Les prélèvements des scories, creusets et minerais ont été réalisés à l'aide d'une scie circulaire sous eau. Les fragments ont généralement été découpés en leur centre afin d'avoir une coupe transversale pour des échantillons les plus représentatifs possibles.

Les prélèvements de métal sont de taille millimétrique et ont été réalisés sur place au Laos avec une scie de joailler ultra fine. Les prélèvements ont été effectués en préférant les zones endommagées, pour ne pas porter atteinte à l'intégrité de l'objet et en évitant, quand cela été possible, les zones comportant des produits de corrosion.

Avant toute analyse, une préparation des échantillons est nécessaire afin d'optimiser les observations et les mesures. Les prélèvements en section ont dans un premier temps été placés en résine époxy à froid, puis polis à l'aide d'une polisseuse manuelle et de disques de polissage abrasif SIC (grades 180-4000), suivis d'une finition à l'aide de suspensions diamantées (3 µm et 1 µm, jusqu'à 0,25 µm pour les échantillons de métal) permettant d'obtenir un « poli miroir » qui est nécessaire aux observations en Microscopie Optique (MO) et au Microscope Electronique à Balayage (MEB).

IV.2.2. Microscope Optique (MO)

La microstructure des échantillons de scories, de céramiques techniques et de minerais a été ensuite observée sous lumière blanche en réflexion, au moyen d'un microscope optique de modèle Zeiss (modèle *Imager A2 vario Axio*) permettant un agrandissement de x5 à x100, en lumière réfléchie (champ clair) ou en lumière diffuse (champ noir). Les acquisitions sont effectuées à l'aide d'une caméra numérique (modèle *Axiocam 305 color*).

La microstructure des échantillons en métal a été également observée sous lumière blanche en réflexion au moyen du même dispositif décrit précédemment, avant et après attaque

chimique afin de révéler la microstructure. L'attaque chimique se compose d'une solution de perchlorure de fer (II) diluée. Elle permet de mettre en avant la structure des métaux, notamment la taille et la forme des grains, la proportion des phases métalliques, l'état de corrosion, ou encore les différents traitements mécaniques et thermiques décrits en partie III.1.4.

IV.2.3. Composition globale en éléments majeurs, mineurs et traces

La totalité des échantillons de scorie, et 18 échantillons de céramique technique, ont été soumis à des analyses globales des éléments majeurs, mineurs et traces au Service d'Analyse des Roches et des Matériaux (SARM) du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) à Nancy. Les échantillons envoyés au SARM-CRPG sous forme de section ont dans un premier temps été microbroyés, puis leur composition globale (*bulk*) a été déterminée suivant la méthode analytique de routine « QM ». Cette méthode comprend dans un premier temps une analyse par Spectrométrie d'Emission Optique (ICP-OES) de modèle *Thermo Fischer ICap 6500* pour 11 oxydes majeurs et mineurs (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, TiO_2) puis par Spectrométrie de Masse à Plasma par couplage inductif (ICP-MS) *Thermo Elemental X7* pour 44 éléments traces (As, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, In, La, Lu, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr). Les échantillons ont été préparés et mesurés suivant la procédure décrite par Carignan et al., (2001). Les échantillons ont été mélangés par fusion alcaline (par $LiBO_2$) et le produit a ensuite été dilué dans de l'acide citrique, lui-même dilué. Les limites de déterminations varient entre les éléments et sont présentées en Annexe 5.

IV.2.4. Microscope Électronique à Balayage couplé à un Spectromètre à Dispersion d'Energie (MEB-EDS)

Les éléments majeurs pour les échantillons ainsi que pour les différentes phases ont été obtenus par mesure semi-quantitative au Microscope Electronique à Balayage couplé à un Spectromètre à Dispersion d'Energie (MEB-EDS) de modèle *SEM-FEG JEOL 7001-F*.[31] Cette technique permet d'analyser des phases précises, grâce à de forts grossissements. La totalité des échantillons de métaux, de minerais et des céramiques techniques a ainsi été analysée. En revanche, une sélection des scories a été effectuée à la suite des résultats des éléments majeurs, mineurs et traces reçus du CRPG-SARM. La totalité des 132 scories ne pouvait pas être analysée, par manque de temps principalement. Les scories ont été sélectionnées suivant la méthode décrite en partie IV.7.

Les mêmes échantillons observés au microscope optique ont ainsi été métallisés par un dépôt de carbone afin de rendre la surface conductrice sous le faisceau d'électrons. Le MEB-EDS a

[31] Pour une description de la méthode se référer à Goldstein et al., 2007.

été employé selon les modes électrons secondaires (SE), afin d'observer la topographie de l'échantillon et électrons rétrodiffusés (BSE), afin d'observer les contrastes chimiques entre les différentes phases. La tension d'accélération pour l'ensemble des échantillons a été fixée à 20 kV, selon les méthodologies appliquées dans la littérature à l'étude des échantillons de la chaîne opératoire de production du cuivre, afin d'avoir une bonne détection des éléments d'intérêts. Nous avons étudié les échantillons avec une distance de travail de 10 mm et les rayons X sont collectés par un détecteur SDD Oxford (*Silicon Difrt Detector),* dont les données sont traitées par un logiciel *Oxford Instruments Aztec*. La limite de détection a été fixée à 0,5 %mass. avec un taux de comptage de 4000/s (temps d'acquisition 30 s), utilisé pour une bonne résolution des pics pertinents avec un respect du bruit de fond. Pour chaque spectre la contribution du bruit de fond est retirée en utilisant un filtre de type « Top-Hat ». La quantification est ensuite réalisée en utilisant une table de standards internes fournie par le logiciel (*Quant Standardization Extended Set*). Les pics de la série des raies K ont été utilisés pour la quantification de la majorité des éléments. Lorsque plusieurs éléments se trouvaient juxtaposés sur un spectre, la série a été ajustée au cas par cas, afin de ne pas biaiser les résultats. Les quantités sont exprimées en pourcentage massique et normalisées à 100 %, car la méthode est semi-quantitative.

Afin de vérifier la précision et la justesse des analyses sur les échantillons de métal, des analyses sur des Matériaux Certifiés de Références ont été au préalable réalisées (Tableau 13). Onze Matériaux Certifiés de Références ont été utilisés : B10, B12, B31, UZ-52.3, B21 et L.20-1 du Centre de Développement des Industries de Mise en Forme des Matériaux (France), 71.32-4 et 51.13-4 du *Bureau of Analyzed Samples Ltd,* (Royaume-Uni) et 500, C1123 et 1275 du *National Institute for Standards and Technology* (NIST). Nous avons ainsi obtenu de bons résultats sur les éléments majeurs. Nous considérons que l'erreur relative (2 σ), due à la mesure, représente environ 10 % de la valeur mesurée.

	Sb	**Sn**	**Bi**	**Pb**	**Zn**	**Cu**	**Ni**	**Co**	**Fe**	**Mn**	**Al**	**S**
B10 pXRF	1,2	7,2	*nd*	4,1	2,95	83,2	1,1	*nd*	0,2	*nd*	*nd*	*nd*
B10 MEB-EDS	2,0	6,5	*nd*	3,5	3,0	83,0	1,0	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
B10 valeur certifiée	1,14	6,95	0,00	4,07	2,75	83,65	1,01	0,00	0,17	0,00	0,21	0,00
B12 pXRF	0,1	10,1	*nd*	0,2	0,7	85,2	2,8	*nd*	0,2	0,25	*nd*	*nd*
B12 MEB-EDS	*nd*	9,5	*nd*	*nd*	1,0	85,0	3,0	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
B12 valeur certifiée	0,12	9,57	0,00	0,20	0,61	85,65	2,63	0,00	0,16	0,24	0,13	0,00
51.1 pXRF	*nd*	0,3	*nd*	0,1	0,4	90,9	*nd*	*nd*	1,95	0,9	4,95	*nd*
51.13 MEB-EDS	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	0,7	88,0	*nd*	*nd*	2,0	1,0	8,0	*nd*
51.13 valeur certifiée	0,00	0,27	0,00	0,00	0,34	88,79	0,06	0,00	1,81	0,90	7,30	0,00
71.32pXRF	0,25	6,4	*nd*	4,3	7,1	80,5	0,8	*nd*	0,4	*nd*	*nd*	*nd*
71.32 MEB-EDS	*nd*	6,5	*nd*	3,0	7,0	82,0	0,8	*nd*	0,4	*nd*	*nd*	*nd*

71.32 valeur certifiée	0,26	6,46	0,05	4,43	6,52	80,48	0,70	0,00	0,35	0,05	0,12	0,00
500 pXRF	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	0,1	99,7	0,08	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
500 MEB-EDS	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	0,4	99,5	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
500 valeur certifiée	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	99,70	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C1123 pXRF	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	97,4	*nd*	2,5	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
C1123 MEB-EDS	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	96,5	*nd*	3,4	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
C1123 valeur certifiée	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	97,40	0,01	2,30	0,00	0,00	0,02	0,00
1275 pXRF	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	86,9	10,7	*nd*	1,6	0,4	*nd*	*nd*
1275 MEB-EDS	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	88,0	10,0	*nd*	1,5	0,5	*nd*	*nd*
1275 valeur certifiée	0,00	0,01	0,00	0,01	0,09	88,20	9,76	0,02	1,46	0,42	0,00	0,00
L-20-1 pXRF	*nd*	0,5	*nd*	0,3	14,35	84,15	0,25	*nd*	*nd*	0,15	*nd*	*nd*
L-20-1 MEB-EDS	*nd*	0,5	*nd*	*nd*	15,0	84,0	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
L-20-1 valeur certifiée	0,00	0,49	0,00	0,27	13,33	85,20	0,22	0,00	0,04	0,13	0,07	0,00
B21 pXRF	0,2	5,35	*nd*	3,75	6,5	82,2	1,35	*nd*	0,3	*nd*	*nd*	*nd*
B21 MEB-EDS	*nd*	5,0	*nd*	4,0	7,0	82,0	1,0	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
B21 valeur certifiée	0,18	5,13	0,00	3,79	6,22	83,00	1,21	0,00	0,29	0,00	0,14	0,05
B31 pXRF	0,5	7,9	*nd*	10,6	0,8	79,4	0,55	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
B31 MEB-EDS	2,0	8,0	*nd*	10,0	1,0	79,0	0,5	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
B31 valeur certifiée	0,48	7,70	0,00	11,79	0,82	78,55	0,49	0,00	0,02	0,00	0,04	0,03
UZ-52-3 pXRF	0,08	1,0	*nd*	0,1	18,0	80,3	0,1	*nd*	0,3	*nd*	*nd*	*nd*
UZ-52-3 MEB-EDS	*nd*	1,0	*nd*	*nd*	18,0	80,0	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*	*nd*
UZ-52-3 valeur certifiée	0,08	1,06	0,00	0,11	17,00	81,08	0,08	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00

Tableau 13 : Mesure de la précision et de la justesse des analyses au MEB-EDS et en pXRF par rapport aux valeurs des standards de références.

Pour chaque échantillon, plusieurs zones d'analyse globale (grossissement 300) ont été effectuées, de 3 à 8 en fonction des dimensions de l'échantillon (Figure 55). Ces analyses ont ensuite été moyennées pour obtenir une estimation de la composition globale de l'échantillon. Par la suite, des analyses en spot, plus localisées, ont été effectuées dans les différentes phases observées au microscope optique afin d'en obtenir la composition et de les attribuer à une phase minéralogique. Pour chaque phase, plusieurs analyses ont également été effectuées afin de sonder l'hétérogénéité des phases à l'échelle d'un échantillon et entre les échantillons.

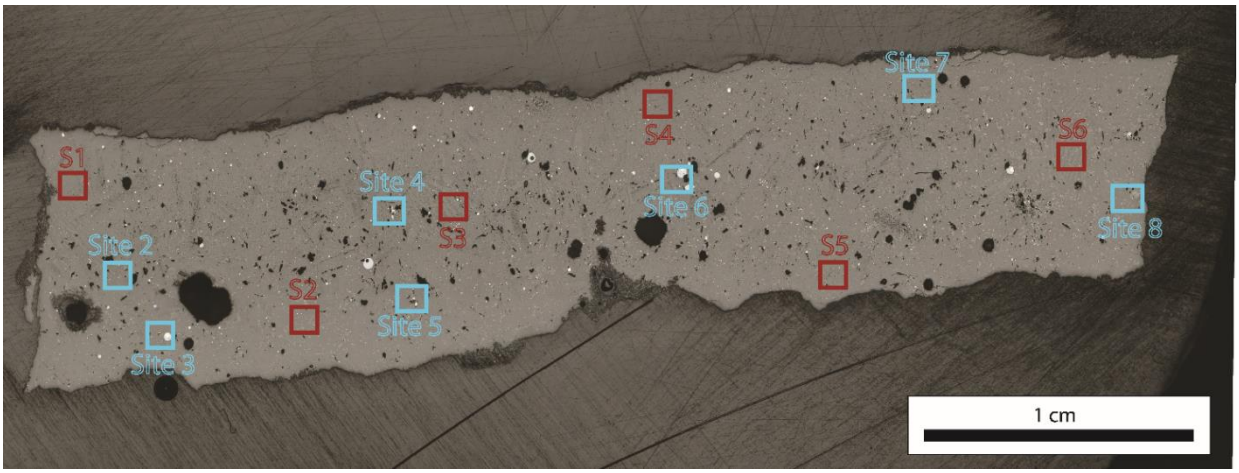


Figure 55 : Exemple de scorie (C14_1_4_7205_c) analysé au Microscope Optique et au MEB-EDS. Les encadrés rouges représentent les zones d'analyses globales à grossissement 300 au MEB-EDS et les encadrés bleus correspondent aux zones où des analyses localisées ont été effectuées dans les différentes phases.

IV.2.5. Fluorescence X portable (pXRF)

Les échantillons de métal ont également été analysés par fluorescence des rayons X (XRF) au moyen d'un dispositif portable *NITON XL 3t GOLDD+* utilisé sur un stand fixe en laboratoire, afin d'avoir accès à une gamme de composition plus étendue, notamment des éléments mineurs. La tension d'accélération maximum est de 40 kV et les échantillons ont été analysés au moyen du mode « alliage » déjà présent dans le dispositif portable. Afin de tester la justesse et la précision des mesures, des analyses préalables sur les mêmes standards de référence que ceux employés au MEB-EDS ont été réalisées (Tableau 13). Ces analyses ont montré de bons résultats sur les éléments majeurs et mineurs. Les éléments légers comme le phosphore, le silicium, l'aluminium, le manganèse ou le soufre ne sont en revanche pas correctement détectés pour cause de la non-présence d'un vide dans la chambre d'analyse. Les analyses ont été réalisées sur les sections polies en utilisant un faisceau d'un diamètre de 3 mm qui présente de bons résultats tant que les échantillons ne sont pas de plus faibles dimensions. Trois analyses successives ont été réalisées sur chaque échantillon, et ensuite moyennées afin de pallier l'hétérogénéité due aux produits de corrosion ou aux inclusions.

IV.2.6. µ-spectroscopie Raman

La µ-spectroscopie Raman est une technique d'analyse vibrationnelle non destructive d'observation et de caractérisation. Les analyses en µ-spectroscopie Raman ont été effectuées avec un spectromètre *Invia Reflex* de *Renishaw* à température ambiante. Le spectromètre est focalisé sur l'échantillon à l'aide d'un microscope optique avec plusieurs objectifs (x5, x10, x20, x50, x100). Le microscope optique permet une sélection précise des phases à analyser. Avant toute analyse, une calibration est effectuée à l'aide d'un cristal de silicium. Les spectres ont été obtenus avec une tension d'excitation de 523 nm, une puissance de laser de 0,5 mW et un diamètre de faisceau de 1 µm, acquise par le logiciel *Wire 3.4*. Les temps d'acquisition

de chaque spectre étaient de 10-20 s. L'exploitation et l'interprétation des spectres se font par la suite grâce au logiciel *Origin*. Du fait qu'aucune base de données référençant les spectres des composés n'existe à l'heure actuelle, l'interprétation des spectres se fait ensuite grâce aux données récoltées dans la littérature et la base de données *RRUFF,* qui recense en grand nombre de minéraux et de composés.

IV.2.7. Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des Rayons X (DRX) est destinée à la caractérisation des matériaux cristallins, ce qui est le cas des minerais, en donnant accès à la structure cristalline des phases. Les analyses en DRX ont été réalisées sur poudre. Les minerais ont donc préalablement été réduits en poudre au laboratoire, à l'aide d'un mortier. Les analyses par DRX ont été réalisées à l'aide d'un générateur de rayons X à anode tournante *RU-200B* (*Rigaku*), équipé d'une anode de molybdène (Mo). Les rayonnements Mo sont monochromatisés autour des raies d'émission Kα (1 et 2) (λ = 0,7093 Å) à l'aide d'un miroir toroïdal *FOX-2D Mo 25-25* (*Xenocs*). Le faisceau est focalisé sur l'échantillon avec une taille de faisceau de 100 µm et d'un flux de photons d'environ 20. 10^6 photons. s^{-1}. Les données DRX ont été collectées via deux détecteurs différents : un détecteur de pixels hybride *Pilatus 300K* (*Dectris*) en mode transmission avec une plage 2θ de 2-35° et un détecteur 2D « Image Plate » (*Fuji*). Les images acquises ont été numérisées à l'aide d'un scanner *Molecular Dynamic* dont la résolution pixéllaire est de 100 x 100 μm^2. Dans les deux cas, les images 2D ont été intégrées de manière circulaire à l'aide du logiciel *Fit2D* (A. P. Hammersley et al., 1996) et l'identification de phase a été réalisée avec le logiciel *Diffrac-EVA* (*Bruker*) intégrant une base de données de référence de l'ICDD et la base de données « *Crystallography Open Database* »(S. Grazulis et al., 2009).

IV.2.8. Isotopie du plomb

Les analyses isotopiques du plomb ont été appliquées sur 55 échantillons de métal. Ces analyses ont également été conduites au CRPG-SARM, par Spectrométrie de Masse Multi-collecteur à Plasma par couplage inductif (MC-ICP-MS) *Thermo Scientific Neptune plus*, après une extraction du plomb des échantillons broyés au préalable (G. Manhes et al., 1980). Les échantillons pour l'isotopie ont été digérés sur une plaque chaude à 120 °C en utilisant différents mélanges d'acides (HNO3, HCl et HF). Une fois dissouts, les éléments chimiques d'intérêts sont isolés en chromatographie par échange d'ions. L'isolation du plomb se fait ensuite sur une colonne en chromatographie contenant un maillage de résine AG1-X8 200-400.

Le biais instrumental pour le MC-ICP-MS a été corrigé en utilisant le standard NIST SRM 997 Thallium (M. F. Thirlwall, 2002). Tous les paramètres ont été ajustés afin d'obtenir les valeurs relatives les plus proches possibles du NIST SRM 981, comme cela a été déterminé par DSTIMS (M. F. Thirlwall, 2002). De plus amples détails sur l'instrumentation et ses performances pour

les analyses des isotopes du plomb sont disponibles dans Cloquet et al., 2006; Pienitz et al., 2015. Les résultats sont exprimés selon quatre rapports $^{208}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{207}Pb$.

IV.2.9. Traitement statistique

Afin d'effectuer une sous-sélection des scories à analyser les données du CRPG ont été soumises à des analyses statistiques avec une Analyse par Composante Principale (ACP) suivie d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). L'ACP est une analyse non supervisée de la dispersion des données. L'objectif est de parvenir, à partir d'un nombre de composants, a la visualisation des plans de plus grande variance. Chaque plan de l'ACP ne fournit qu'une image partielle de l'information, dépendant de la part de variance exprimée par les deux composantes principales représentées sur le plan. Elle permet d'observer les relations entre les variables et les relations entre individus, ainsi que de définir les variables ayant la plus grande part de contribution à la variance. Bien que l'ACP soit une méthode pour représenter des groupes, elle n'est pas une technique permettant de les identifier. C'est pourquoi la CAH est ensuite utilisée à partir des résultats de l'ACP sur les composantes principales pour visualiser des groupes homogènes d'individus avec des caractéristiques chimiques proches au sein du jeu de données. L'ACP et la CAH ont été effectuées grâce au logiciel *Rstudio* avec les packages *FactoMineR*, *factoextra* et *corrplot*. Pour la CAH la méthode d'agglomération utilisée est ward.

Le jeu de données fournies par les résultats du SARM-CRPG sur les 132 scories a donc été étudié par l'application d'une ACP, puis d'une CAH afin d'effectuer une sélection des échantillons à analyser en MO et au MEB-EDS. Le jeu de données comprenait les variables suivantes : SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, TiO_2, MnO, K_2O, SO_3, CuO, ZnO, BaO et P_2O_5, exprimées en pourcentage et normalisées.

Chapitre 5 : Résultats analytiques du corpus

Les chapitres III et IV nous ont permis d'aborder la question de l'échantillonnage, les types de mobiliers disponibles dans l'assemblage de Vilabouly, ainsi que la méthodologie appliquée à leur étude. Tous les types de mobilier sélectionnés sont donc, en première approximation, perçus comme appartenant à la chaine opératoire de production du cuivre. Leur investigation sera développée au cours de ce chapitre afin de confirmer cette appartenance, avec leurs caractéristiques, afin de pouvoir proposer une reconstitution technique, en replaçant chacun de ces artéfacts à son potentiel usage associé. Une fiche objet avec les principaux résultats de chaque échantillon étudié est présentée en Annexe 1.

V.1. Les minerais en contexte archéologique

Le premier type de mobilier sélectionné pour étude se compose de minerais, une sélection de 15 échantillons (Tableau 14) découverts en contexte à *Puen Baolo* et *Thong Na Nguak*. Les données ont été recoupées également aux observations d'Elzbieta Watrova réalisées durant son master sur cinq autres pièces (4 de PBL et 1 de TNN). Après une observation à l'œil nu, deux principaux types de minerais sont identifiés : une majorité d'échantillons présente une couleur verte, principalement composée de carbonates de cuivre, associés à des minéraux de gangue, ainsi que deux minerais de couleur noire (PBL/C17/3/1/a et PBL/E15/3/1/3278/e). Une seconde catégorie regroupe visiblement des oxydes de fer. Aucun minerai sulfuré n'a pu être identifié. Les fragments de minerais retrouvés en contexte archéologique apparaissent limités (seulement 4 kg). De plus, un processus cohérent de prélèvement d'échantillons de minerai n'a pas été mis en place par l'équipe de fouille. Il apparaît alors possible que certains minerais n'aient pas été collectés. Les échantillons ont été analysés dans un premier temps au MO, puis au MEB-EDS afin de connaître leur composition élémentaire, et par Diffraction des Rayons X afin de déterminer leurs principales phases.

V.1.1. Les carbonates de cuivre

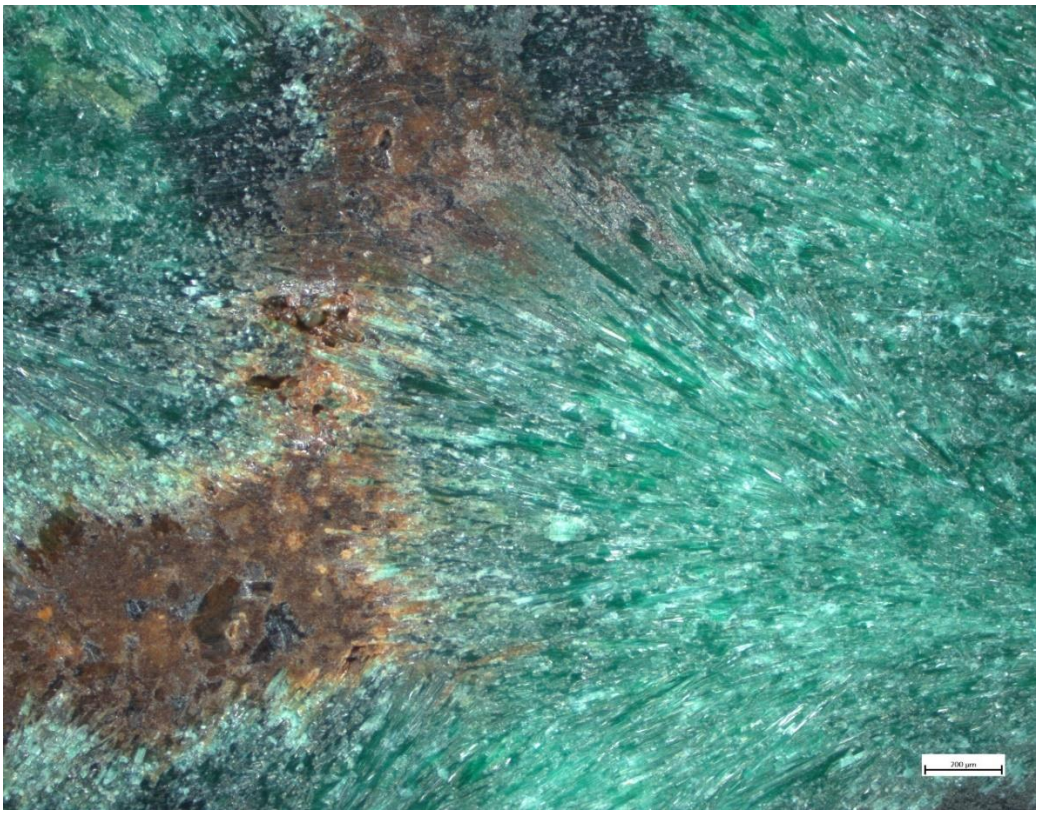


Figure 56 : Micrographie (en champ noir) de l'échantillon DF/1/A/4/152 composé de malachite et de quartz.

Les échantillons étudiés lors du présent travail vont dans le sens des précédentes observations faites par E. Watrova. En effet, ces échantillons arborent également une couleur majoritairement verte, accompagnée de quelques éléments composant la gangue, ce qui est vrai pour les échantillons de PBL et ceux de TNN. Après investigation, comme attendu à la suite de l'examen macroscopique, ces échantillons sont principalement composés de malachite ($Cu_2CO_3[OH]_2$), un carbonate de cuivre (Tableau 14 et Tableau 15 ; Figure 56). La malachite se trouve associée pour certains échantillons à d'autres minéraux, principalement au quartz (SiO_2), mais également à la goethite (FeO[OH]) qui est une phase mineure, ainsi qu'à un autre oxyde de cuivre, la cuprite (Cu_2O).

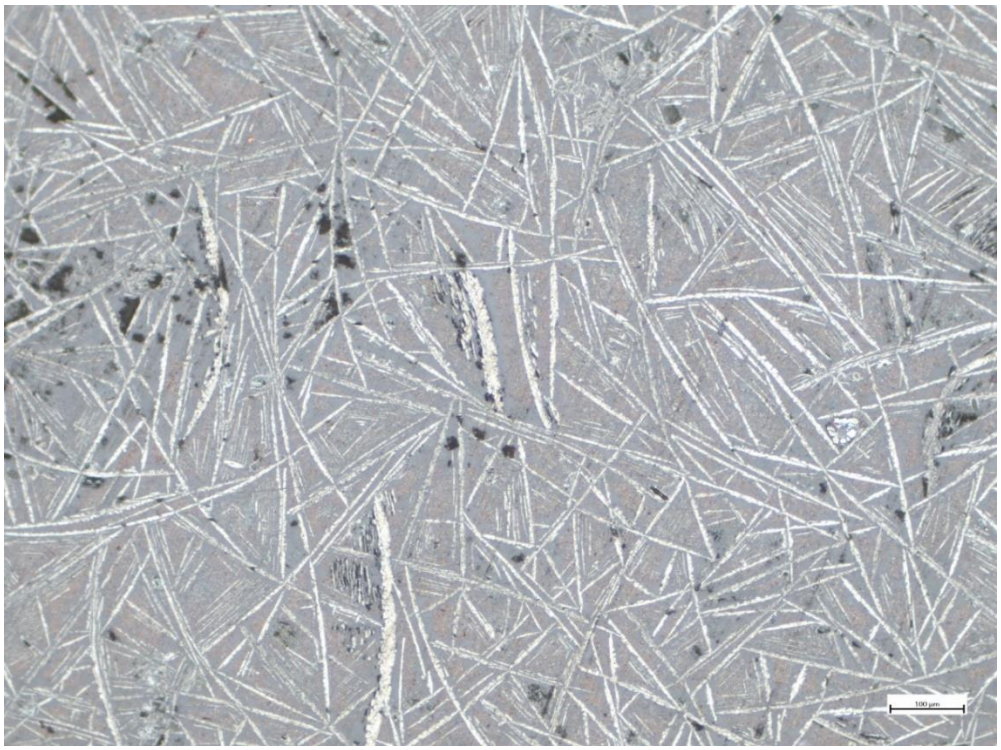


Figure 57: Micrographie de l'échantillon PBL/E15/3/1/3278/e composé de delafossite ($CuFeO_2$).

Un échantillon a été identifié en DRX comme étant composé uniquement de l'oxyde de cuivre, la cuprite (Cu_2O). En effet, cet échantillon diffère également des autres par sa couleur noire. Le second fragment de minerai noir du corpus se compose d'un oxyde de fer et de cuivre, la delafossite ($CuFeO_2$), et de malachite (Figure 57). Ce dernier échantillon pose question car il pourrait également être associé à une scorie issue d'une étape oxydante. Il demeure un cas isolé.

Échantillon	O	As	Cu	Fe	Mn	Ca	K	Al	P	Si	Cl	S	Mg
PB_G15_2_1_7305	30,0		70,0										
PBL_E15_2_3_3282	29,0		55,0	7,0				2,0		6,0			
PBL_E15_2_2_3218	38,5		37,0	0,3						24,0			
PBL_E15_3_1_3278_e	30,0		33,0	15,5	1,0	0,4		5,0	0,8	13,5			0,6
PBL_C17_3_1_a	21,0	2,0	64,0	3,0	0,5			1,0		6,5	1,0	0,5	1,5
PBL_C17_3_1_b	40,0		30,0	12,0	0,7		0,8	3,0		13,0	0,1	0,1	0,7
PBL_C14_2_3_7217	69,0		29,0							1,5			
PBL_B17_2_2_3311	31,0		68,5							0,2			
PBL_C16_3_2_3523	40,0		42,0	19,0	0,7					1,5			
PBL_S9_1_2_5503	48,0		14,0	31,0				0,6		6,0			
PBL_G15_3_3_7311_b	33,0		1,0	64,0						1,5			
PBL_E15_3_3_4040	31,0		1,0	65,5				1,0		1,5			
PBL_B14_2_4_7005	30,0		0,4	65,5	1,0			1,0		1,5			
DF_1-A_B1_53	53,5		1,0	20,0	0,4			1,5	0,4	22,5			
DF_1-A_4_152	54,0		45,5	0,7									

Tableau 14 : Composition élémentaire des échantillons de minerais du corpus de PBL et TNN. Compositions moyennes obtenues au MEB-EDS (%mass.).

Échantillon	Type	Quartz	Malachite	Cuprite	Delafossite	Hématite	Goethite	Lepidocrocite
PB_G15_2_1_7305	Minerai de cuivre		+++	++			+	
PBL_E15_2_3_3282	Minerai de cuivre	++	++	++			+	
PBL_E15_2_2_3218	Minerai de cuivre	+++	++	+				
PBL_E15_3_1_3278_e	Minerai de cuivre		++		+++			
PBL_C17_3_1_a	Minerai de cuivre			+++				
PBL_C17_3_1_b	Minerai de cuivre	++	+++					
PBL_C14_2_3_7217	Minerai de cuivre	+	+++					
PBL_B17_2_2_3311	Minerai de cuivre	+	+++					
PBL_C16_3_2_3523	Minerai de cuivre		+++	+			+	
PBL_S9_1_2_5503	Minerai de cuivre	++	++					
PBL_G15_3_3_7311_b	Minerai de fer	++				+	+++	+
PBL_E15_3_3_4040	Minerai de fer	+				++	++	
PBL_B14_2_4_7005	Minerai de fer	+				+++	++	
DF_1-A_B1_53	Minerai de cuivre	+++	++				+	
DF_1-A_4_152	Minerai de cuivre	+	+++				+	

Tableau 15 : Résultats des analyses en diffraction des rayons X sur poudre des échantillons de minerais. +++ = phase majoritaire, ++ = phase secondaire, + = phase mineure.

V.1.2. Les oxydes de fer

Les minerais d'oxydes de fer se présentent principalement sous la forme de nodules, noirs/orangés, plutôt denses. Sept des minerais découverts en contexte ont été associés à des oxydes de fer par leur aspect, trois ont été sélectionnés pour analyse (PBL/B14/2/4/7005, PBL/G15/3/3/7311/b et PBL/E15/3/3/4040). Les résultats des analyses élémentaires au MEB-EDS, et structurales en diffraction des rayons X, confirment bien leur nature de minerais d'oxydes de fer. Les analyses ont révélé la présence majoritaire de goethite (FeO[OH]) et d'hématite (Fe_2O_3), associées à du quartz.

Les diffractogrammes obtenus en DRX pour les échantillons de minerais sont présentés en Annexe 1.

V.1.3. Bilan

La totalité des échantillons de minerais appartient très certainement à la couche supergène des minéralisations de cuivre de Vilabouly. En effet, ils se composent majoritairement d'un carbonate de cuivre, la malachite, ainsi que d'oxydes de fer qui sont généralement retrouvés dans la partie altérée des dépôts de cuivre (partie supergène). La couche supérieure est issue de l'altération de la couche hypogène, plus profonde, composée de sulfures primaires. L'association aux oxydes de fer est également attendue. La zone d'enrichissement supérieure fait également rentrer en jeu le processus de concentration des oxydes de fer qu'on retrouve généralement au-dessus des amas sulfurés, dans le chapeau de fer. Ce chapeau de fer est bien présent dans les minéralisations de Vilabouly (voir Chapitre II). Les minerais identifiés comme des oxydes de fer pourraient donc être issus de ce chapeau de fer, très riche en oxydes de fer. Ces minerais pourraient avoir été inclus dans l'assemblage lors de la fouille, sans qu'ils n'aient

réellement joué un rôle lors de l'activité de production. De plus, tous les échantillons de minerais étudiés (carbonates et oxydes de fer) ne semblent pas avoir été transformés par l'homme, aucune trace de chauffe ou d'un autre traitement n'a été identifiée. On peut se poser la question de la représentativité de ces échantillons de minerais par rapport à ceux réellement employés par les anciens métallurgistes. De plus, les minerais retrouvés en contexte peuvent représenter des déchets laissés par les anciens métallurgistes (A. Hauptmann, 2007, p.10-12), des minerais pauvres ou non utilisables à leur sens. Aucune certitude donc que ces minerais ont pris part à l'activité de production. Il faut également noter qu'aucun minerai sulfuré de cuivre n'a été identifié en contexte, et nous verrons pourtant qu'il semblerait avoir pris part au processus.

V.2. Les céramiques techniques

V.2.1. Forme

Les échantillons de creusets provenant de *Puen Baolo* et *Thong Na Nguak* sont tous très fragmentaires. Néanmoins, il a été possible, pour certains, de tenter une reconstitution de leur forme/taille originelle (Figure 59). De plus, des exemples de creusets complets ont été mis au jour à *Puen Baolo*, bien que découvert hors contexte, leurs caractéristiques macroscopiques seront tout de même comparées à celles des fragments.

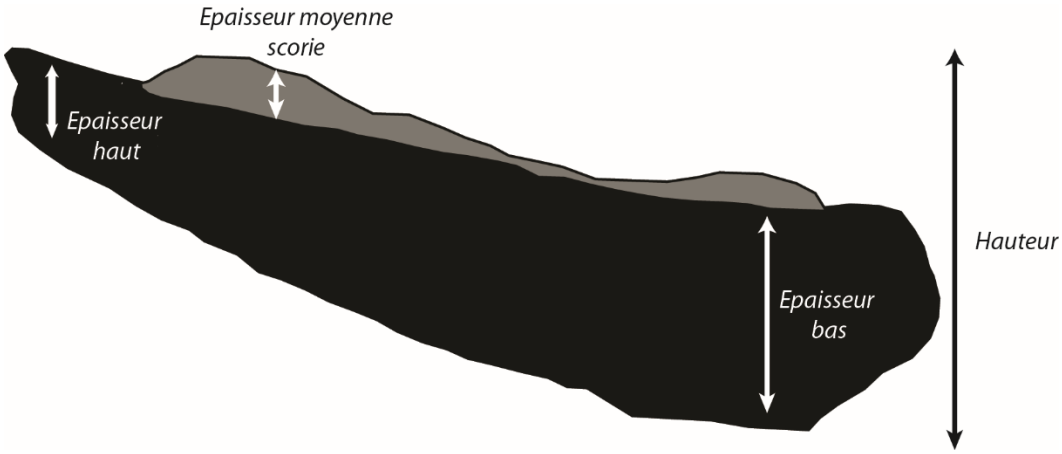


Figure 58 : Schéma des différentes mesures effectuées sur les creusets en section. Données reportées dans le tableau 16.

Les creusets ont une forme ouverte et peu profonde avec un fond convexe. Ils ont un diamètre estimé entre 60 et 150 mm et une profondeur de 20 à 85 mm, avec une moyenne à 38 mm (Tableau 16). En section, la paroi est en moyenne de 5 à 30 mm d'épaisseur dans la partie basse et de 3 à 10 mm dans la partie haute (voir schéma figure 58). Les creusets sont donc plus épais dans la partie basse. La pâte des creusets possède des couleurs variées, allant du blanc/crème, en passant par l'orange, vers le gris. En section, on peut voir un gradient de couleur se distinguer de l'intérieur vers l'extérieur du creuset, signifiant que la chauffe appliquée a dû être interne. Cette constatation est renforcée par les surfaces externes des

creusets qui apparaissent préservées de la chauffe (Figure 60). Pour certains exemplaires, ce gradient thermique est plus difficile à discerner (ex : PBL/E15/2/1/3211, Figure 60). De plus, pour tous les fragments de creusets étudiés, pour lesquels la partie interne est préservée, tous possèdent une couche scoriacée plus ou moins épaisse, jusqu'à 7 mm, signifiant qu'ils sont bien entrés en jeu durant une ou plusieurs étapes de la chaine opératoire de production du cuivre à Vilabouly. On identifie aussi, fréquemment, la présence de produits de corrosion verts, indicatifs de la présence de cuivre.

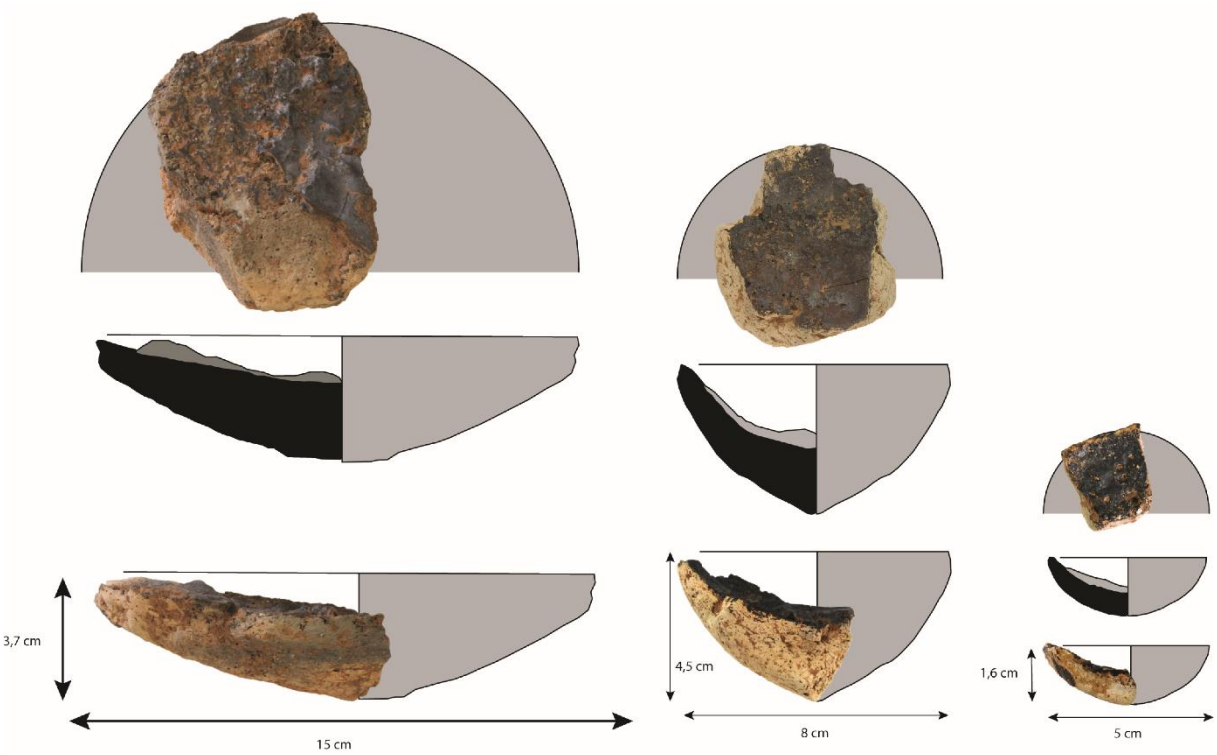


Figure 59 : Trois exemples de creusets reconstitués, montrant la variation identifiée dans les dimensions. De gauche à droite, creuset PBL/D13/2/1/3706/a, PBL/C16/3/1/3529 et PBL/C17/1/2/b.

Échantillon	Hauteur (cm)	Épaisseur moyenne (cm)	Épaisseur-bas (cm)	Épaisseur-haut (cm)	Épaisseur scorie (cm)	Masse (g)	Diamètre estimé (cm)	Chauffe	Partie
PBL_G15_3_1_7309_7303_b	5,5	0,7	0,9	0,4	0,1	20	10	Interne	Bord
PBL_G15_3_3_7311_c	3,5	0,6	0,7	0,5	0,2	10	frag	?	Bord
PBL_G15_3_4_7316_d	7	0,8	1	0,5	0,2	37	frag	?	Bord/Fond
PBL_E15_3225_a	3,5	1,2	1,4’	1	0,5	18	frag	Interne	Fond ?
PBL_E15_2_1_3211	3,5	2,7	2,7		0,4	57	frag	?	Fond
PBL_C17_3_2_3119	4,5	0,7	0,9	0,4	0,1	14	8	Interne	Bord
PBL_C17_1_2_b	1,6	0,6	0,8	0,3	0,5	5	5	Interne	Bord
PBL_B14_1_1_7001_a	3	1	1		0,3	19	frag	Interne	Fond?
PBL_A15_4_1_6709_b	2	0,7	1	0,4	0,2	4	5	Interne	Bord
PBL_A15_3_1_6703	4	1	1	1	0,3	15	7	Interne	Fond+bord
PBL_AA15_2_2_6803_a	3	1,7	1,7		0,1	11	frag	?	Fond
PBL_C14_1_4_7205	6	0,8				42	10	Interne	Bord
PBL_C14_2_3_7217	3	0,5	0,5		0,4	12	5	?	Fond+bord
PBL_B17_2_1_3303_h	3,75	1,3	2	0,5	0,5	34	8	Interne	Bord
PBL_B17_2_2_3314_a	6	0,5	0,5		0,1	37	frag	?	Bord
PBL_B17_2_1_3303_f	2,4	1,5	2,4	0,6			frag	?	Fond
PBL_C16_3_1_3529	6	1,4	2	0,8	0,5	50	8	Interne	Bord
PBL_DD14_2_1_7123_a	2,4	0,7	1	0,3	0,2	12	7	Interne	Bord sup
PBL_D13_2_1_3706_a	8,5	1,5	2,5	1,3	0,3	105	15	Interne	Bord
PBL_D13_2_1_3706_b	4,75	1	1,5	0,4	0,2	28	11	Interne	Bord
PBL_S9_1_1_5503_c	1,6	0,4	0,4		0,1	4	7	Interne	Bord sup
PBL_WEST1_2_3_a	4	1,4	1,8	1	0,1	68	frag	Interne	Bord
DF_1-B_3_113	6	0,8	1	0,5	0,4	26	frag	Interne	Bord+fond?
DF_1-A_B3_90	1	1	1	0,5	0,1	7	frag	Interne	Fond?
DF_1-C_2	1,5	1	1		0,1	10	frag	?	Fond?
DF_1-E_3_37	1	1	1		0,1	10	frag	Interne	Fond?
DF_1-A_4_131	4	1	1		0,2	20	frag	?	Fond
DF_1-A_4_131_b	1,5	0,7	0,8	0,5	0,1	10	frag	?	Bord

Tableau 16 : Caractéristiques macroscopiques des fragments de creusets de Vilabouly.

La présence des scories internes indique que les creusets ont été utilisés, et leur état d'origine sera donc difficile à appréhender. Un seul fragment, PBL/B17/2/1/3303/f, correspondant très probablement à un fond de creuset, apparaît faiblement chauffé, avec une couleur blanche de la pâte. Ce fragment pourrait alors représenter un exemple de creuset non utilisé.

Les produits obtenus par l'utilisation de ces creusets seraient par conséquent de petits volumes, même pour les plus larges à 150 mm de diamètre. En effet, pour un creuset avec un diamètre de 150 mm et une hauteur de 50 mm, le volume utilisable se situe aux alentours de 150 g. Ceci peut être facilement pallié par l'utilisation de plusieurs creusets simultanément, afin d'obtenir un objet de plus larges dimensions. L'utilisation de ce type de creuset permet en revanche une meilleure maîtrise des conditions, permettant la concentration de la chauffe dans un espace restreint, et donc une certaine facilitation du procédé (Martinón-Torres et Rehren, 2014; Rehren, 2003).

La présence d'une porosité forte avec une forme particulière, allongée, est indicative d'un dégraissant organique, dont la nature reste à définir par l'étude en microscopie. Les parois fines associées à une forte porosité permettent de mieux contenir la chaleur, ce qui est recherché dans le cas d'une chauffe interne en empêchant l'apparition de fissures dans la pâte (Hein et Kilikoglou, 2007). La forme ouverte et peu profonde des creusets, ainsi que les parois fines, est en adéquation avec la chauffe apicale identifiée (Bayley et Rehren, 2007). Les propriétés du creuset doivent ici permettre de contenir la chauffe à l'intérieur. De plus, l'ajout d'un dégraissant organique va également jouer le rôle d'agent isolant, renforçant ainsi le maintien des conditions à l'intérieur du creuset.



Figure 60 : Exemples de sections polies montrant la porosité liée à la présence du dégraissant organique et le gradient thermique.

Aucune différenciation entre les creusets de *Puen Baolo* et *Thong Na Nguak* n'a été possible par l'examen macroscopique. Les exemplaires de *Thong Na Nguak* étant tous très fragmentaires et altérés, aucune tentative de reconstitution de leur forme n'a pu être faite. Il

semblerait qu'ils correspondent davantage à des fonds de creuset, mais sans aucune certitude.

Les creusets de Vilabouly possèdent une forme répétée d'un exemplaire à l'autre, mais avec des dimensions variables, signifiant que leur production suivait une standardisation partielle de la forme, mais visiblement pas pour les dimensions.

À ces fragments identifiés comme des creusets, on a également mentionné quatre autres fragments de céramiques rubéfiés (PBL/A5/159/367, PBL/B17/2/1/3303/g, PBL/C17/2/1/3112 et PBL/DD14/1/1/7108) qui pourraient être des chemisages de fosse (Figure 61). En effet, à l'œil nu on peut observer la présence de traces laissées par la chauffe. Il est difficile d'attribuer clairement ces fragments à une fonction précise, mais nous allons dans un premier temps tenter de déterminer s'ils peuvent être associés à une étape du procédé métallurgique. Enfin, au sein du corpus de *Puen Baolo*, dans l'unité BB15, deux fragments pourraient correspondre à des moules. Ce sont des fragments de grés, dont un présente une dépression de forme arrondie (Figure 62). Ces éléments peuvent être comparés à un exemple de moule complet en grès pour lingot plan-convexe retrouvé à *Puen Baolo* en surface (voir Chapitre II).

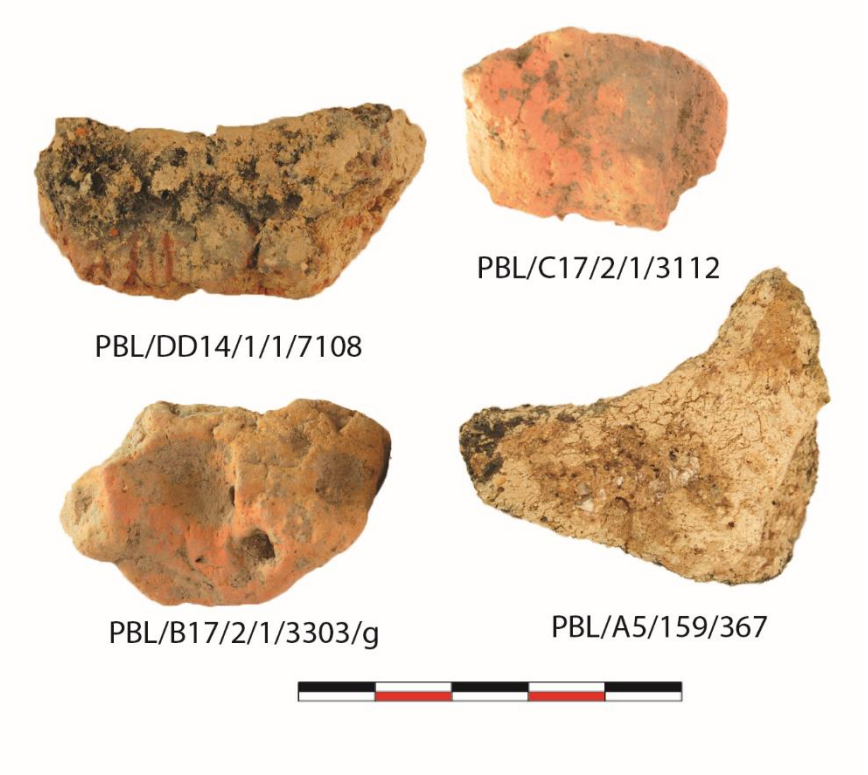


Figure 61 : Les fragments d'argiles/céramique rubéfiées provenant de Puen Baolo identifiés comme potentiels chemisages de fosse.



Figure 62 : Potentiel fragment de moule en grès.

Nous allons maintenant voir si la minéralogie et la composition de ces creusets sont homogènes, ou si les matières premières utilisées sont également variables. Avec la composition et microstructure des couches de scories adhérentes, il sera également tenté d'attribuer les creusets à une ou plusieurs des étapes de la chaine opératoire. La minéralogie et la composition de la pâte céramique et des scories internes pourront également permettre de vérifier les tendances entre usages du creuset et leur forme, afin de voir si des correspondances peuvent se distinguer.

V.2.2. Les creusets

1. Puen Baolo

Minéralogie et composition de la pâte des creusets

A. Composition globale

14 fragments de creusets de PBL ont été analysés par ICP-OES et ICP-MS (voir partie IV.4) afin d'obtenir la composition en éléments majeurs, mineurs et traces. Les prélèvements ont pu être faits en évitant les résidus scoriacés internes, afin de ne pas biaiser les données. Les données complètes sont présentées en Annexe 2.

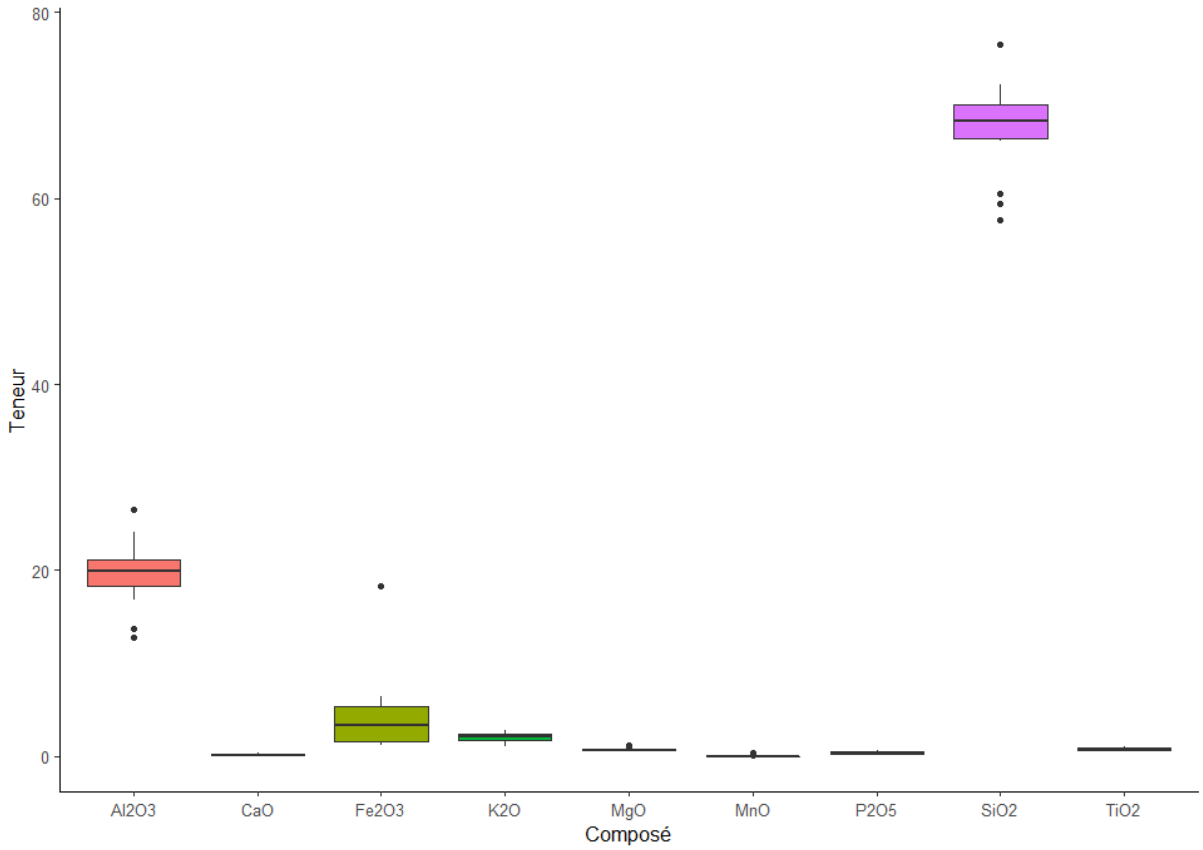


Figure 63 : Diagramme en boite représentant les compositions des creusets de PBL obtenues par ICP-OES et ICP-MS (n=14).

	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
CV	7%	17%	60%	66%	27%	44%	33%	29%	17%	50%

Tableau 17 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans la pâte des creusets de PBL (ICP-MS, ICP-OES).

Lorsqu'on moyenne les résultats sur l'ensemble de la pâte des creusets, on distingue qu'ils sont majoritairement composés de silice (68,1 %mass.), d'alumine (20 %mass.) et d'oxyde de fer (3,2 %mass., Figure 63 et Figure 64). Les coefficients de variations[32] pour ces composés sont faibles pour SiO_2 et Al_2O_3 avec 7 et 17% respectivement, plus élevés pour FeO avec 60% (Tableau 17). Les variations en FeO proviennent probablement de la pénétration de résidus scoriacés, plus élevés dans le cas de certains fragments, notamment d'un (PBL/B14/1/1/7001/a), qui n'ont pas pu être évités lors des prélèvements. Le peu de variation dans les composés majeurs signifie que la source de matière première argileuse employée possède les mêmes caractéristiques majeures pour tous les creusets, et provient peut-être d'une même source.

[32] Le coefficient de variation (CV) est le rapport de l'écart-type à la moyenne (CV=écart-type/moyenne). Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande. Il s'exprime en pourcentage. L'utilisation du CV en archéométallurgie a notamment été appliquée par (M. F. Charlton et al., 2010) sur la composition de scories pour évaluer la variabilité des productions de fer.

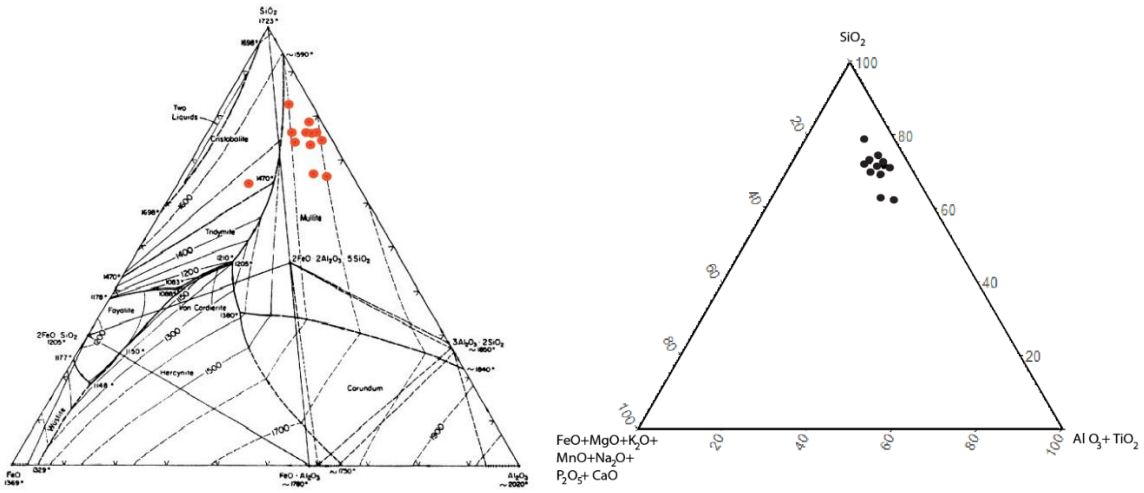


Figure 64 : À gauche, diagramme ternaire de la composition globale de la pâte des creusets (mass%) avec les composés majeurs FeO-SiO_2-Al_2O_3 des scories de PBL (n=14) représentés dans un diagramme de phase d'après (E. Levin, H. F. McMurdie, et F. P. Hall, 1956). *À droite, diagramme ternaire représentant les données globales des composés majeurs et mineurs. Résultats des analyses des éléments majeurs, mineurs et traces par ICP-OES et ICP-MS. L'échantillon plus riche en fer, à gauche, correspond à un creuset où la couche de scorie pénètre dans le fragment.*

On retrouve ensuite des composés mineurs, à commencer par K_2O (2 %mass.), TiO_2 (0,8 %mass.), MgO (0,7 %mass.) et P_2O_5 (0,3 %mass.). L'oxyde de calcium est détecté à seulement 0,2 %mass. Leurs coefficients de variations sont moyens (K_2O =29 %mass., TiO_2 = 17 %mass., MgO= 27 %mass., CaO= 44%, P_2O_5 = 50 %mass.). Les coefficients de variation des oxydes mineurs sont plus variables que ceux des oxydes majeurs.

L'un des objectifs est également de déterminer l'étape du procédé durant laquelle ces creusets auraient pu être employés. La présence d'éléments métalliques a donc été recherchée. On identifie la présence de trois éléments métalliques dans les résultats d'analyses de la pâte des creusets, mais présents seulement à l'état de traces : Cu (1500 ppm), Pb (110 ppm) et Zn (200 ppm). Mis à part le cuivre, ici présents à 1500 ppm, les autres éléments métalliques ont des teneurs trop faibles pour qu'une conclusion puisse être faite (Tableau 18). L'étain n'est pas détecté dans les échantillons analysés. Hormis les éléments métalliques mentionnés, les principaux éléments traces de la pâte céramique sont Zr (200 ppm), As (40 ppm) et Ba (300 ppm). Ces éléments traces ne montrent pas d'uniformité chimique, ce qui pourrait signifier que la source de la matière argileuse des creusets de PBL n'est pas unique (Figure 65).

	As	***Ba***	***Cu***	***Pb***	***Zn***	***Zr***
PBL/B17/2/1/3303/f	19	300	1340	166	331	215
PBL/B17/2/1/3303/h	49	280	1784	85	162	242
PBL/E15/3225/a	17	321	1665	93	213	200
PBL/E15/2/1/3211	45	208	1957	319	266	217
PBL/D13/2/1/3706	43	248	619	529	135	272

PBL/AA15/2/2/6803/a	28	301	469	361	129	365
PBL/G15/3/4/7316/d	68	182	1069	42	216	215
PBL/C14/2/1/7209/a	17	52	309	46	109	346
PBL/C17/3/2/3119	25	190	621	99	132	382
PBL/C16/3/1/3529	88	582	2579	537	1124	191
PBL/DD14/2/1/7123/a	60	257	2389	168	265	218
PBL/A15/4/1/6709/b	45	292	1445	54	218	255
PBL/WEST1/2/3/a	11	347	5019	100	275	210
PBL/B14/1/1/7001/a	18	284	740	59	82	259

Tableau 18 : Principaux éléments traces de la pâte des creusets de PBL (ppm) Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

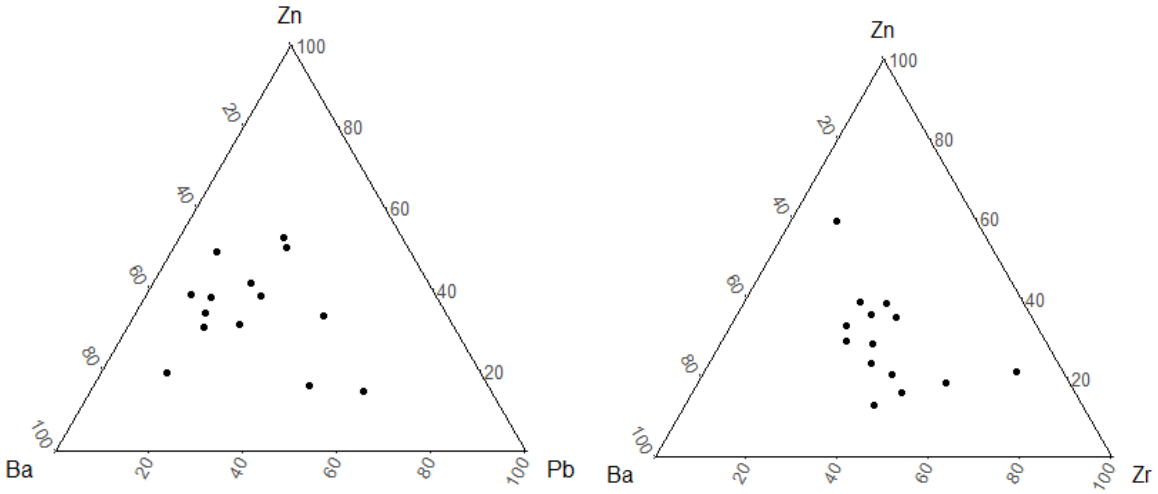
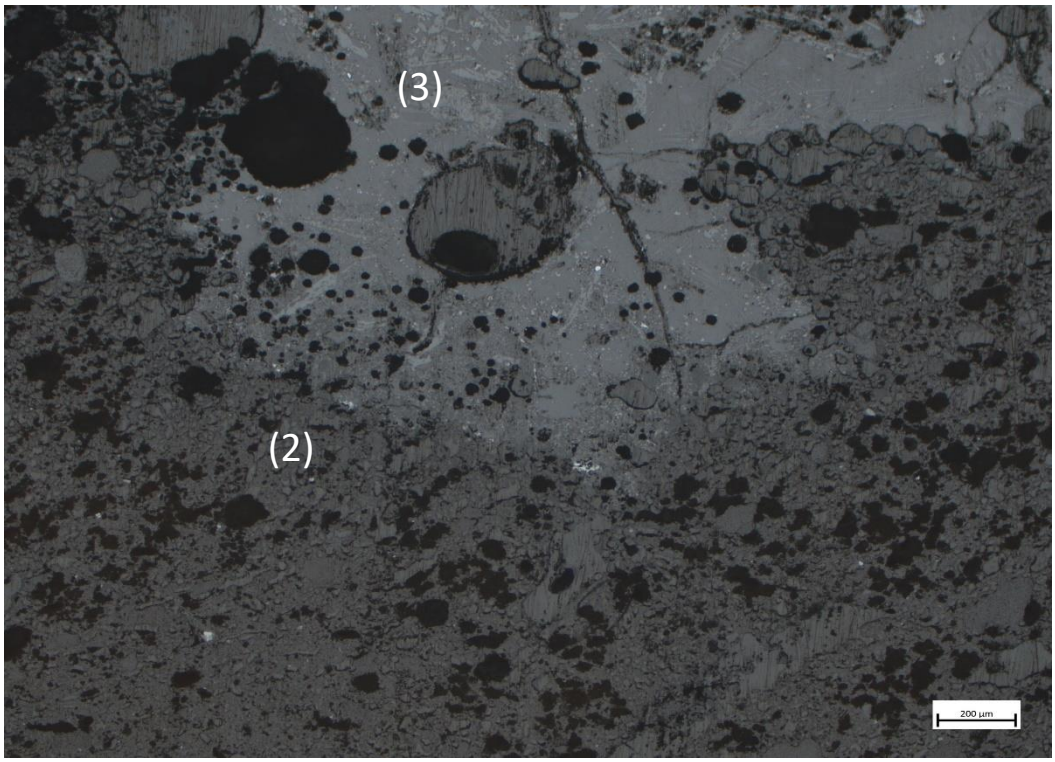


Figure 65 : Diagramme ternaire avec les principaux éléments traces des creusets de PBL. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

B. Microscopie Optique et MEB-EDS

23 échantillons ont été étudiés en microscopie (MO et MEB-EDS) afin d'identifier les différents composants de la pâte (voir Tableau 19). L'étude en microscopie permet d'identifier trois zones principales pour la plupart des fragments : (1) une partie de la céramique avec une plus faible chauffe (en bas), (2) une zone de transition vitrifiée où on observe une dissolution des phases puis (3) une couche de scorie dans la partie interne (Figure 66). Généralement, la couche de scorie s'étend jusqu'au bord supérieur du creuset (lorsqu'il est préservé). La zone de transition correspond à une réaction de la charge avec la pâte du creuset lors de la chauffe. Elle est d'épaisseur variable, correspondant surement à des changements de conditions opératoires, même à l'échelle d'un creuset (Rademakers, 2015).



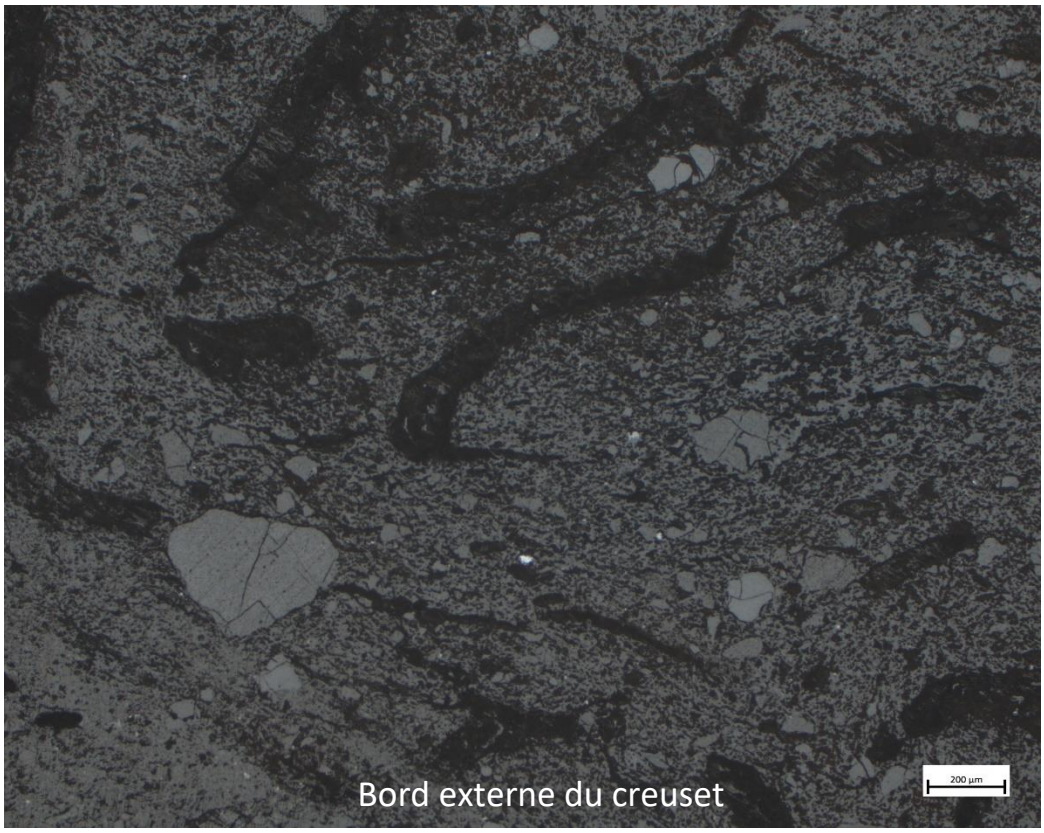


Figure 66: Micrographies montrant les différentes zones du creuset (PBL/D13/2/2/3706/a), la scorie, la zone vitrifiée et le bord externe de la pâte céramique.

N°	Type	Dégraissant	Quartz	Rutile	Zircon	K-Feldspath
PBL_G15_3_1_7309_7303_b	Bord	-	X	X	X	
PBL_G15_3_3_7311_c	Bord	Balle de riz	X	X		
PBL_G15_3_4_7316_d	Bord	Balle de riz	X	X	X	
PBL_E15_3225_a	Fond	Balle de riz	X	X		X
PBL_E15_2_1_3211	Fond	Balle de riz	X	X	X	X
PBL_C17_3_2_3119	Bord	-	X	X		
PBL_C17_1_2_b	Bord	-	X	X	X	
PBL_B14_1_1_7001_a	Fond	-	X	X		
PBL_A15_4_1_6709_b	Bord	Balle de riz	X	X	X	
PBL_A15_3_1_6703	Fond+bord	Balle de riz	X	X	X	
PBL_AA15_2_2_6803_a	Fond	Balle de riz	X	X	X	
PBL_C14_1_4_7205	Bord	Balle de riz	X	X	X	
PBL_C14_2_3_7217	Fond+bord	Balle de riz	X	X	X	
PBL_B17_2_1_3303_h	Bord	Balle de riz	X	X		X
PBL_B17_2_2_3314_a	Bord	Balle de riz	X	X	X	
PBL_B17_2_1_3303_f	Fond	Balle de riz	X	X	X	X
PBL_C16_3_1_3529	Bord+fond	-	X	X		X
PBL_DD14_2_1_7123_a	Lèvre	Balle de riz	X	X		
PBL_D13_2_1_3706_a	Bord	Balle de riz	X	X	X	
PBL_D13_2_1_3706_b	Bord	Balle de riz	X	X		X
PBL_S9_1_1_5503_c	Bord supérieur	Balle de riz	X	X	X	
PBL_WEST1_2_3_a	Bord	Balle de riz	X	X		X

Tableau 19: Caractéristiques microscopiques de la pâte des creusets de Puen Baolo.

Des différences peuvent être faites entre les fragments, par le degré d'altération plus ou moins avancé, par la chauffe et l'enfouissement. En effet, pour certains fragments la zone vitrifiée est plus étendue, parfois dans toute l'épaisseur du creuset. La surface externe des fragments est la zone présentant le moins d'altérations compte tenu de la chauffe apicale. Les analyses de la pâte ont été faites en sélectionnant au maximum les zones les plus préservées de l'altération, afin d'obtenir les résultats les plus représentatifs pour la composition de la pâte céramique. La part occupée par chaque phase dans la pâte n'a pas pu être évaluée.

La principale inclusion minérale composant la pâte des creusets semble être le quartz (Figure 67 et Figure 68), dont l'analyse des grains au MEB-EDS donne une composition en silicium de 48 %mass., ce qui est en accord avec la stœchiométrie du quartz (SiO_2). Les inclusions, parfois de taille macroscopique, peuvent être identifiées à l'œil nu. La taille des grains de quartz identifiés est variable, environ de 10 à 1200 µm. Ils ont une morphologie arrondie à subarrondie, signifiant qu'il s'agit de grains de quartz naturellement altérés (V. Kilikoglou et al., 1998). Pour certains échantillons, les grains de quartz présentent également des fissurations dans leur partie interne, ainsi que des interfaces de dissolution avec la pâte céramique les enveloppant. D'après Martinón-Torres et al., (2008), ces caractéristiques sont indicatives que les températures atteintes ont pu être au-delà de 1200°C, du moins localement, car on sait que la variabilité de la chauffe dans un creuset est très élevée. La

dissolution à l'interface des grains de quartz s'observe dans la partie vitrifiée des creusets, celle qui aurait été le plus en contact avec le mélange en fusion.

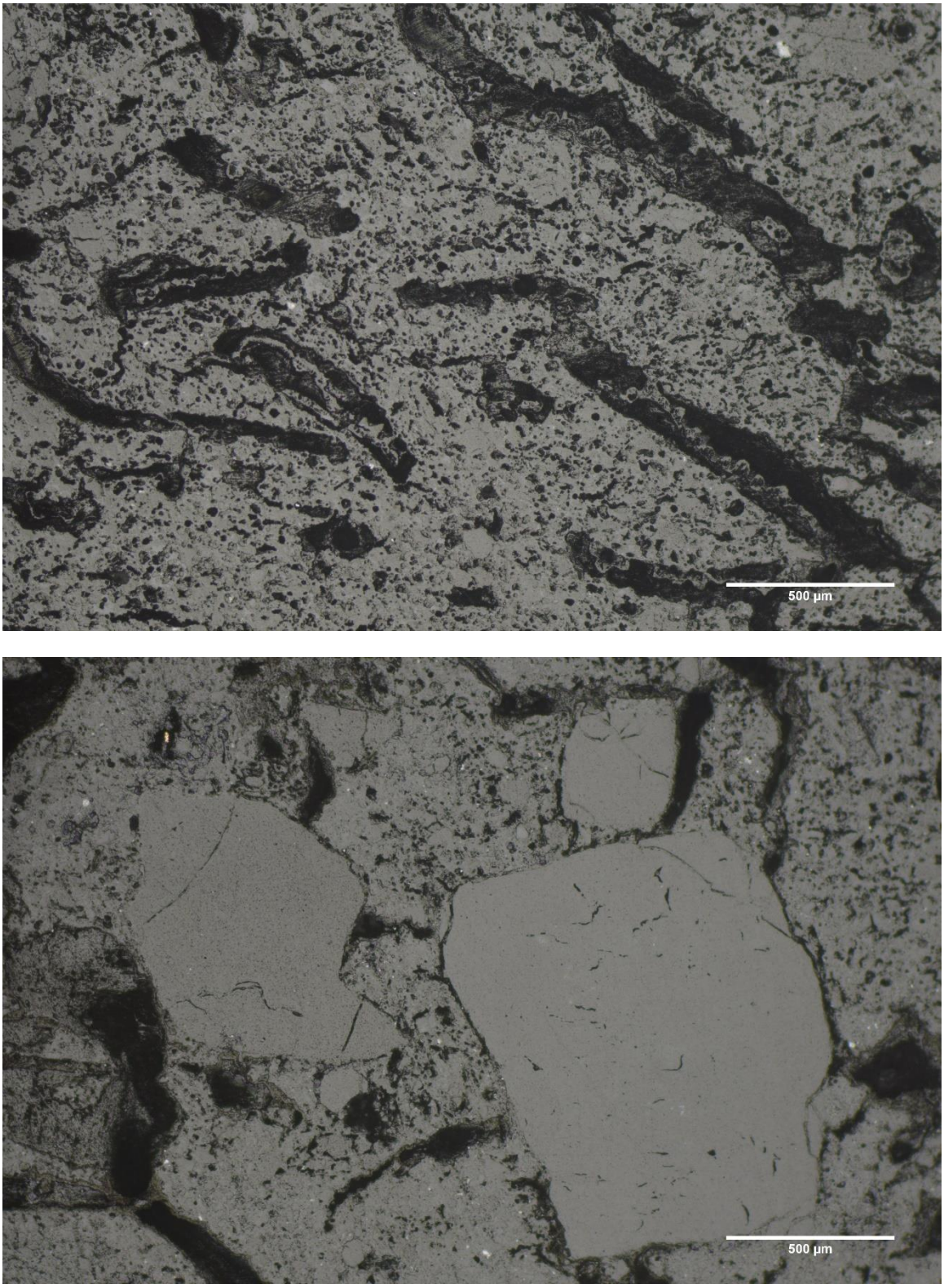


Figure 67 : Micrographies montrant les composants caractéristiques de la pâte des creusets identifiés au MO en coupe transversale. En haut (PBL/A15/4/1/6709/b), présence abondante de pores allongés signe de la présence d'un dégraissant organique ; en bas (PBL/AA15/2/2/6703/b) présence de grains de *quartz macroscopiques.*

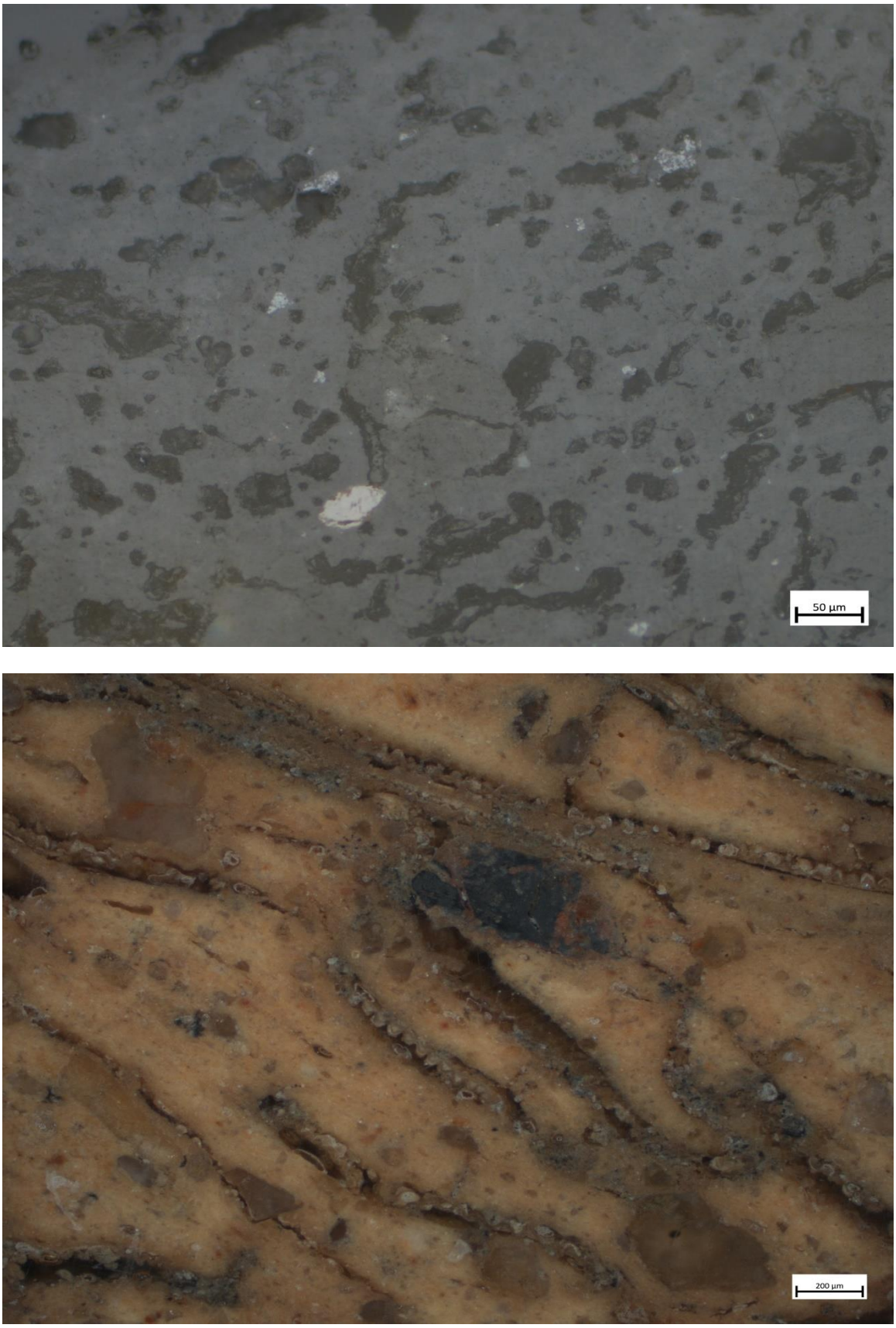


Figure 68: En haut (PBL/C14/2/3/7217), on identifie la présence d'inclusions (blanches) corresponand à du rutile dans la pâte, ainsi que des grains de quartz de plus petites dimensions avec une interface de dissolution. En bas (PBL/D13/2/1/3706/a), image en champ noir, de l'extérieur d'un creuset ayant conservé ses qualités en microscopie optique à la suite de la chauffe. On identifie également la présence du dégraissant organique.

En plus des grains de quartz, on identifie d'autres minéraux inclusionnaires dans la pâte des creusets. Tout d'abord un oxyde de titane, le rutile (TiO_2) ; qui a un point de fusion très élevé à 1843°C (Figure 68 et Figure 72). Ce minéral est identifié, d'une part par son aspect en microscopie, et d'autre part par sa composition. Au MEB-EDS, la composition moyenne des cristaux de rutile est de 50 %mass. de titane, ce qui correspond à la stœchiométrie de ce minéral (TiO_2). Pour valider complètement l'attribution de ce minéral à du rutile, une analyse structurale serait cependant nécessaire. On trouve d'autres éléments mineurs associés, comme le fer à 2,5 %mass., l'aluminium et le silicium à 3 et 2 %mass., mais également d'autres éléments comme le tungstène à 0,6 %mass., le vanadium est également présent pour certains cristaux. Le rutile se retrouve pour la totalité des creusets avec des tailles d'environs 5 à 80 µm.

On trouve ensuite encore deux autres types d'inclusions dans la pâte, plus sporadiques, que le quartz et le rutile. Tout d'abord, le zircon ($ZrSiO_4$), qu'on identifie par sa morphologie angulaire à subarrondie, sa couleur blanche brillante au MEB, avec des tailles généralement de 30 µm et une composition moyenne en zirconium de 45 %mass. et de silicium à 16 %mass., correspondant à la stœchiométrie de ce minéral. Encore plus rarement, on rencontre des oxydes de fer avec des tailles en dessous de 10 µm.

On identifie la présence d'un dernier minéral, plus rare, seulement identifié pour six échantillons (Tableau 19). Il s'agit de feldspaths potassiques ($KAlSi_3O_8$), généralement altérés par la chauffe. Les grains montrent des signes de dissolution dans la pâte du creuset. La présence de feldspaths potassiques a notamment été identifiée par la composition de ce minéral, avec une moyenne de 31 %mass. de silicium, 13 %mass. de potassium et 10 %mass. d'aluminium, correspondant à la stœchiométrie des feldspaths potassiques. Il est difficile d'identifier précisément le type de feldspath potassique (orthoclase, sanidine ou microcline) présent dans la pâte, en l'absence d'une analyse structurale. Ce minéral est parfois difficile à discerner du reste de la pâte céramique. Pour un échantillon, PBL/B17/2/1/3303/f, les feldspaths potassiques sont plus largement identifiés (Figure 69). Cet échantillon apparaît comme un des seuls creusets faiblement chauffé et représente potentiellement la composition de la pâte céramique d'origine.

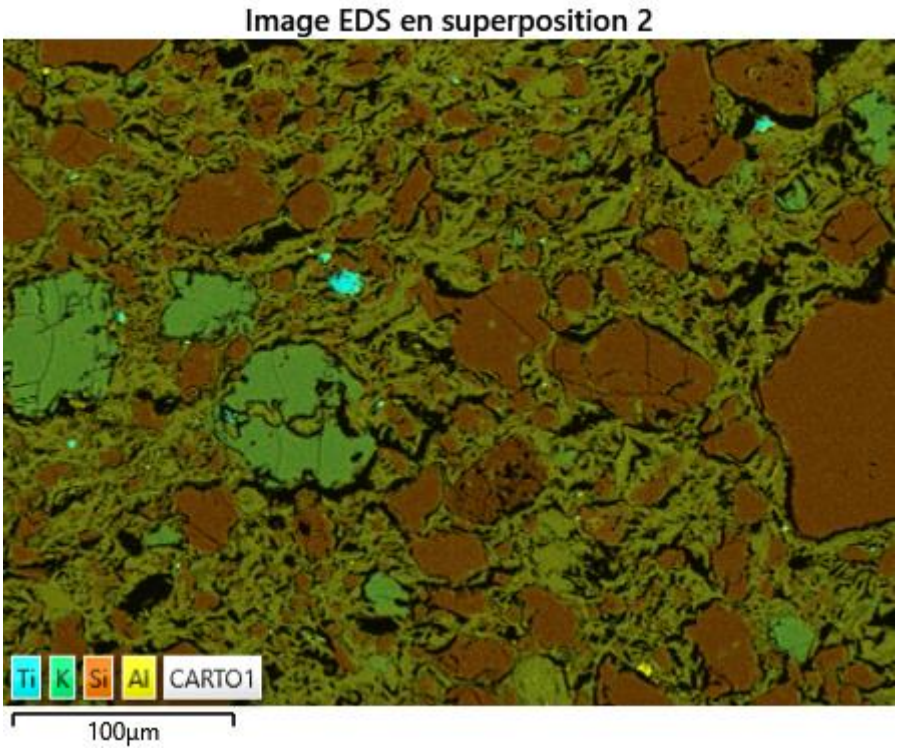


Figure 69: Cartographie des rayons X au MEB-EDS de l'échantillon PBL/B17/2/1/3303/f pour lequel on observe la présence des feldspaths potassiques (en vert).

Tous ces différents minéraux se retrouvent entourés par la fraction argileuse, qu'il a parfois été difficile d'analyser seule, compte tenu de la dissolution de certaines phases (Figure 73). Les données doivent donc être interprétées avec précaution. Néanmoins, les analyses moyennées sur l'ensemble des creusets révèlent que cette fraction argileuse se compose de SiO_2 à 58,5 %mass., Al_2O_3 à 30 %mass., K_2O à 4 %mass., FeO à 3 %mass., TiO_2 à 1 %mass., MgO à 1 %mass., CuO à 0,5 %mass. et CaO à 0,6 %mass (Figure 70). La composition de la fraction argileuse rejoint la composition globale décrite pour les creusets. La fraction argileuse semble contenir des minéraux riches en silice et en alumine, et pauvres en calcium.

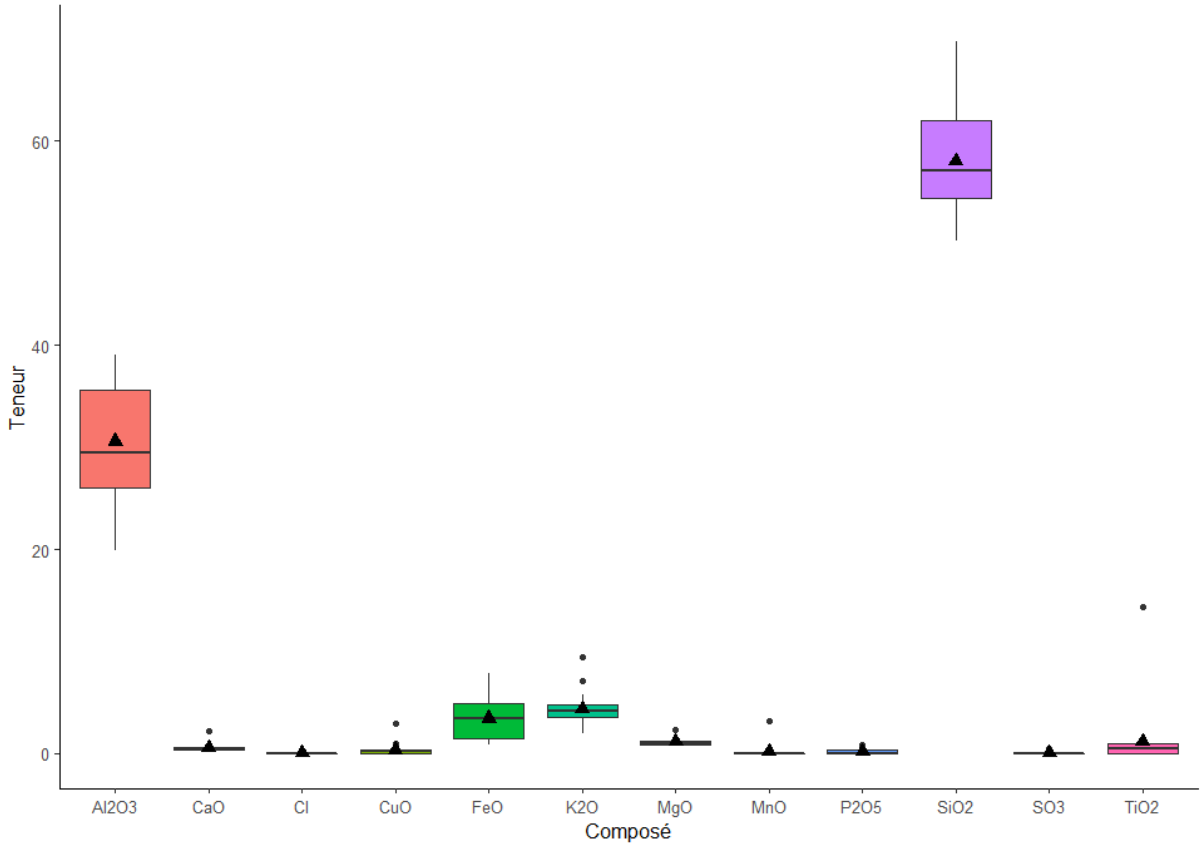


Figure 70 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes des différents composés détectés dans la fraction argileuse des creusets de PBL (n=22). Données moyennes obtenues par analyse au MEB-EDS.

L'analyse macroscopique avait permis de mettre en lumière la présence d'un dégraissant organique pour la majorité des échantillons. Il est ici identifié comme étant de la balle de riz (Figure 67 et Figure 71), via une comparaison avec la littérature (B. Vincent, 2003; T. O. Pryce, 2008; R. Tomber, C. Cartwright, et S. Gupta, 2011; L. Carratoni, C. Meucci, et F. Rispoli, 2018). La balle de riz a bien évidemment disparu à la suite de la chauffe, étant un composé organique, mais à son emplacement restent des pores allongés caractéristiques, conservant la structure d'origine. Les pores ne suivent pas une orientation préférentielle stricte, mais sont dans la plupart des cas parallèles aux bords internes du creuset. Pour certains échantillons (PBL/C17/1/2/b, PBL/G15/3/1/7309/7303/b, PBL/C16/3/1/3529, C17/3/2/3119 et PBL/B14/1/1/7001/a), le dégraissant organique semble absent.

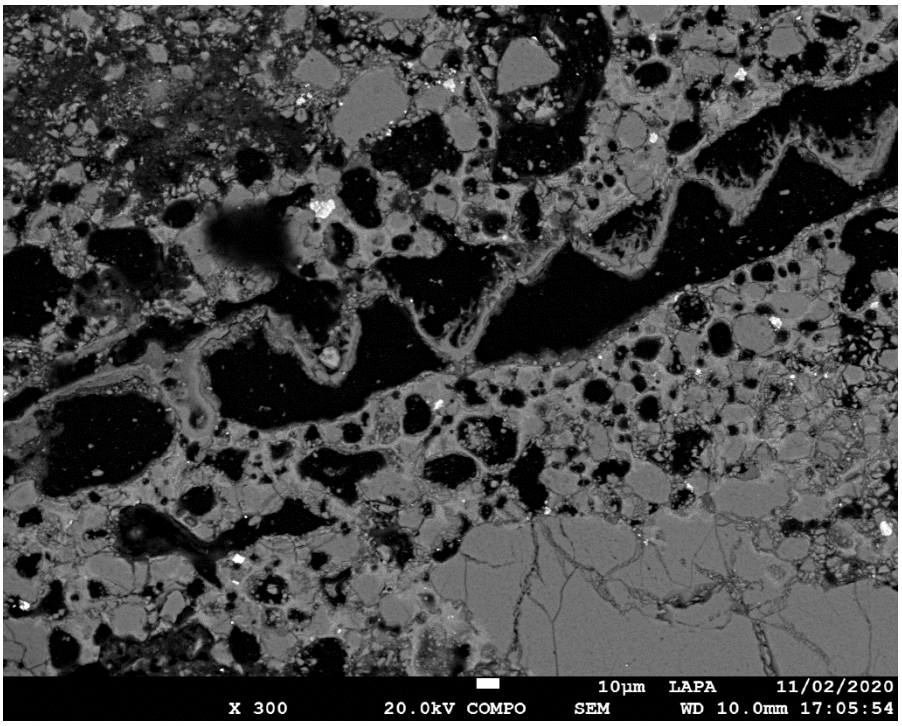


Figure 71: Images (PBL/AA15/2/2/6803/a) en BSE au MEB-EDS (x300), avec un pore résiduel de la présence de balle de riz, avec des grains de quartz.

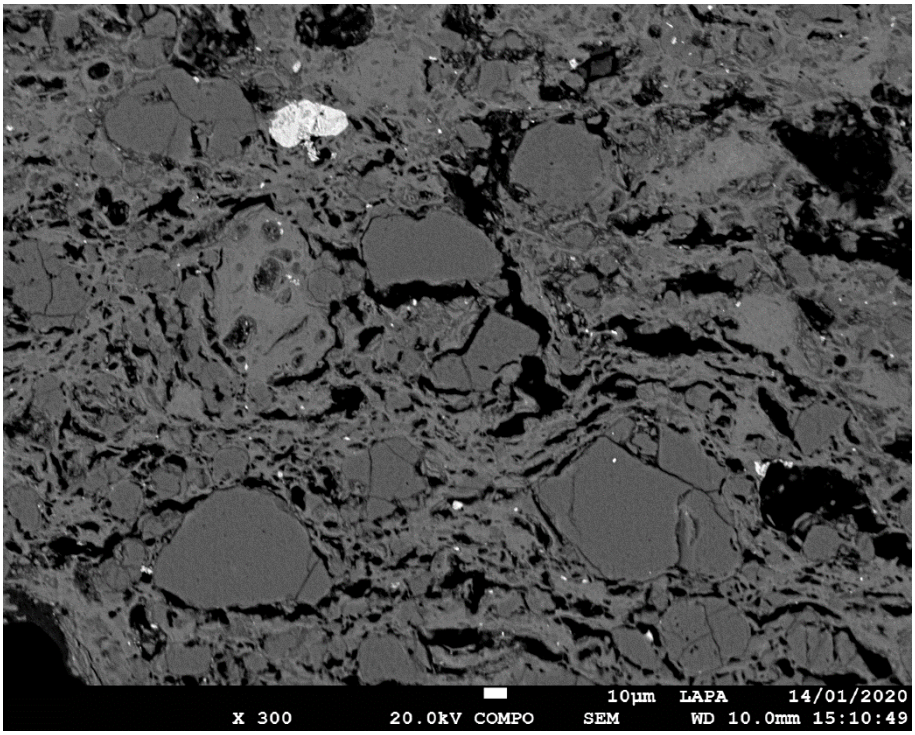


Figure 72: Image (PBL/B17/2/2/3314/a) en BSE au MEB-EDS (x300) d'une partie du creuset non altéré par la chauffe, où on identifie les grains de quartz (gris foncé) ainsi que les inclusions de rutile (blanc).

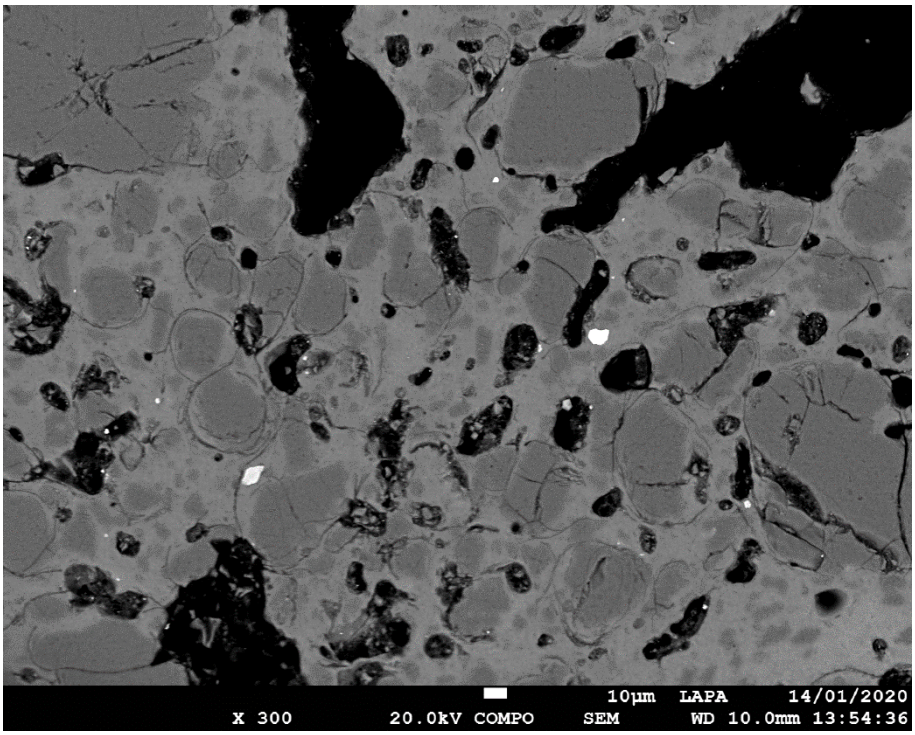


Figure 73 : Image (C14/2/3/7217) en BSE au MEB-EDS (x300), d'une partie vitrifiée du creuset avec l'interface des grains de quartz dissous ainsi que des inclusions de zircon (blanc brillant).

La matière première argileuse employée était donc une argile non calcaire riche en alumine et pauvre en fer, contenant également des feldspaths potassiques. La présence des différentes inclusions, quartz, rutile, zircon, oxyde de fer et les feldspaths potassiques, ainsi que la présence du dégraissant organique ajouté de balle de riz pour la quasi-totalité des échantillons analysés confirme que la matière première argileuse employée, ainsi que sa transformation, était proche pour l'ensemble des creusets. Des variations peuvent être notées tout de même, car la balle de riz ne semble pas systématiquement présente.

Description de la microstructure et de la composition de la couche de scorie adhérente

Une couche de scorie adhérente est identifiée pour tous les fragments où la partie interne du creuset est préservée. Cette couche est d'épaisseur variable comme mentionnée en partie VI.2.1. Son épaisseur varie de 1 à 7 mm avec une pénétration plus ou moins importante dans la pâte céramique. Cette couche de scorie a été analysée via le MEB-EDS afin d'éviter toutes interactions avec la partie céramique du creuset. Contrairement à la partie céramique, la couche de scorie n'était que peu altérée, elle permet alors des analyses plus fiables.

A. Composition globale

Les résultats moyennés après analyse de plusieurs zones dans la couche de scorie interne de chaque échantillon, montrent que celle-ci se compose pour tous de SiO_2 à 41 %mass., FeO à 38 %mass. et Al_2O_3 à 9 %mass. (Figure 74) pour les composés majeurs, avec SiO_2 possédant un coefficient de variation à 27 %, alors que FeO et Al_2O_3 sont plus variables avec 49% et 37% (Tableau 20). Ces variations moyennes pourraient signifier des fluctuations dans la charge

contenue dans les creusets. Ensuite on trouve des composés mineurs, à commencer par CuO à 5 %mass., K_2O à 2 %mass., CaO à 2 %mass., MgO et MnO à 1 %mass. Les coefficients de variations de CuO et MnO sont élevés, autour de 100% alors que les autres sont plutôt bas. Les taux en cuivre sont particulièrement variables de 0,8 à 23 %mass. en moyenne.

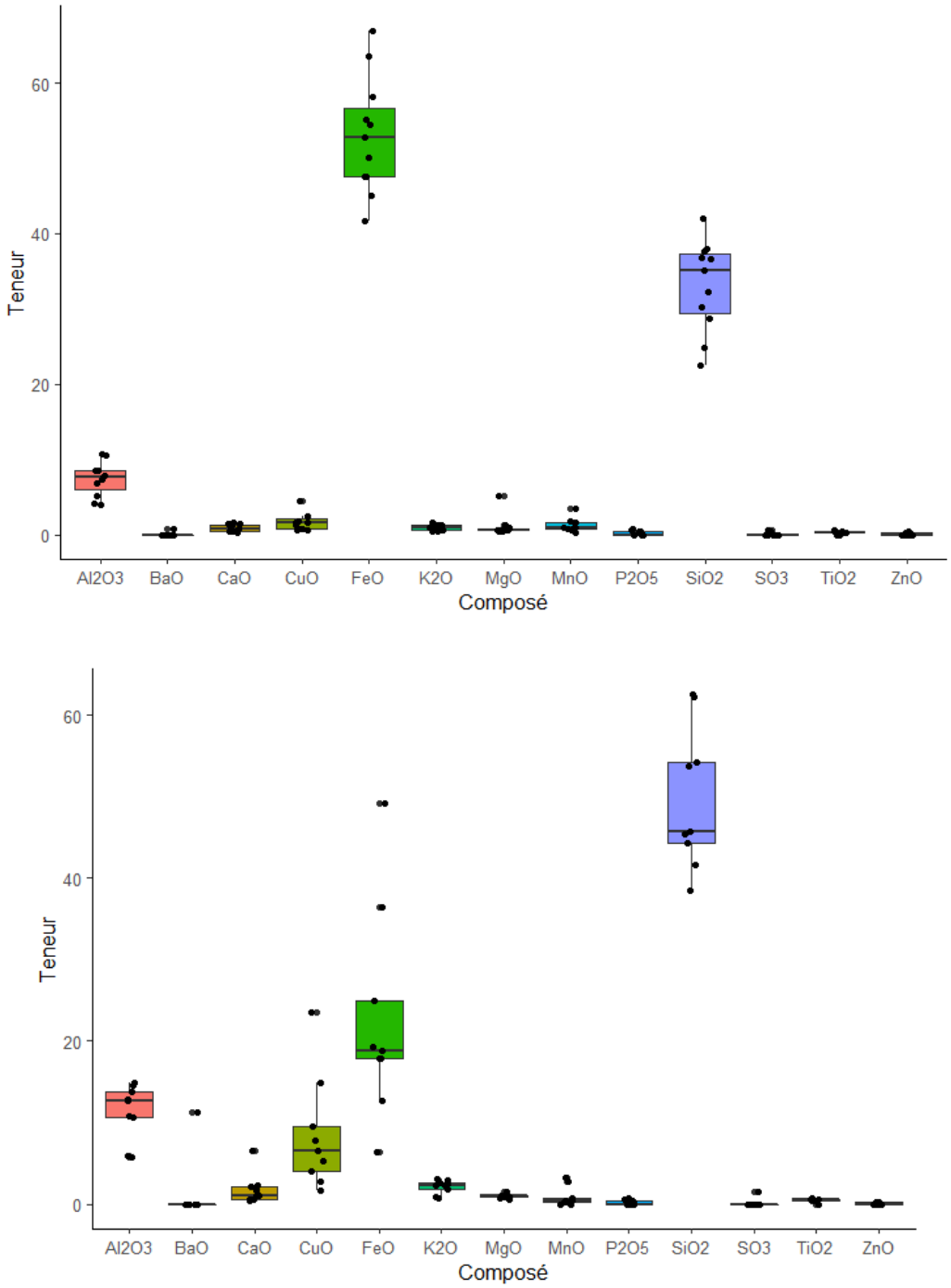


Figure 74 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) obtenues au MEB-EDS pour les scories adhérentes au creuset de PBL (n=20). En haut, les scories de type fayalite et en bas, les scories vitreuses riche en cuivre. Données obtenues pour chaque échantillon après moyenne sur différentes zones d'analyses.

	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO	CuO	ZnO
CV	93%	37%	27%	132%	272%	65%	133%	46%	93%	49%	119%	152%

Tableau 20 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans la couche de scorie adhérente au creuset (données MEB-EDS).

B. Microscopie Optique et MEB-EDS

L'étude en microscopie révèle des scories en majorité contenant des minéraux n'ayant pas réagi, principalement des grains de quartz, probablement issus de la pâte céramique.

Échantillon	Épaisseur	Réaction	Oxyde de fer	Olivines	Verre	Cu inclusion	Del
PBL_G15_3_1_7309_7303_b	<6 mm	Forte					
PBL_G15_3_3_7311_c	<6 mm	Forte	P	A, S,P	X	Cu	
PBL_G15_3_4_7316_d	<2,5 mm	Moyenne	P,D		X		
PBL_E15_3225_a	< 4,5 mm	Faible	P,D	A	X	Cu, CuS (chalc, cov)	
PBL_E15_2_1_3211	<1,5 mm	Faible	P	S	X	Cu, CuS (chalc, cov)	
PBL_C17_3_2_3119	<1,5 mm	Moyenne	P,D		X	Cu	
PBL_C17_1_2_b	1 mm	Forte			X	Cu, CuS	
PBL_B14_1_1_7001_a	<1,5 mm	Forte	P	S	X	CuS (chalc, cov)	
PBL_A15_4_1_6709_b	<1 mm	Faible	D		X	Cu	
PBL_A15_3_1_6703	<2 mm	Moyenne			X	Cu	
PBL_AA15_2_2_6803_a					X		**X**
PBL_C14_1_4_7205	<7 mm	Moyenne	P	S	X	Cu, CuS (chalc, cov)	
PBL_C14_2_3_7217	< 4,5 mm	Forte	P	S	X	Cu, CuS (chalc, cov)	
PBL_B17_2_1_3303_h	<5 mm	Faible	P	S	X	Cu, CuS (chalc, cov)	
PBL_B17_2_2_3314_a	< 4,5 mm	Forte	P,D		X		**X**
PBL_B17_2_2_3303_f	Aucune						
PBL_C16_3_1_3529	<5,5 mm	Faible	P	S	X	Cu, CuS (chalc, cov)	
PBL_DD14_2_1_7123_a	<6,5 mm	Moyenne			X	Cu	
PBL_D13_2_1_3706_a	<1,8 mm	Faible	P	S	X	CuS (chalc, cov)	
PBL_D13_2_1_3706_b	< 1 mm	Faible	P	S	X	CuS (chalc, cov), Cu	
PBL_S9_1_1_5503_c	< 2 mm	Forte	P,D		X	Non	
PBL_WEST1_2_3_a	<3 mm	Moyenne	P	A	X	CuS (chalc, cov), Cu	

Tableau 21 : Caractéristiques microscopiques de la couche de scorie adhérente aux creusets de Puen Baolo. Abréviations : P=polyèdre, D=dendrite, CuS= sulfures de cuivre, Cu= cuivre métallique, chalc= chalcocite, cov=covellite, S= squelette, A = aiguille, Del= delafossite.

La microstructure permet de différencier deux types de résidus scoriacés. Les différences majeures entre ces deux types de scories sont, d'une part la cristallisation d'olivines ferreuses dans le cas du premier type (8 fragments) souvent associé à des inclusions de sulfures de cuivre, dont l'identification sera développée dans la suite. Le second type de scorie (10 fragments) contient en majorité du verre à taux élevé de cuivre et aucune inclusion de sulfures de cuivre (Figure 76 et Figure 78). Cette différence est confirmée en regardant la composition de ces scories dans un diagramme ternaire SiO_2-AL_2O_3-FeO (Figure 75).

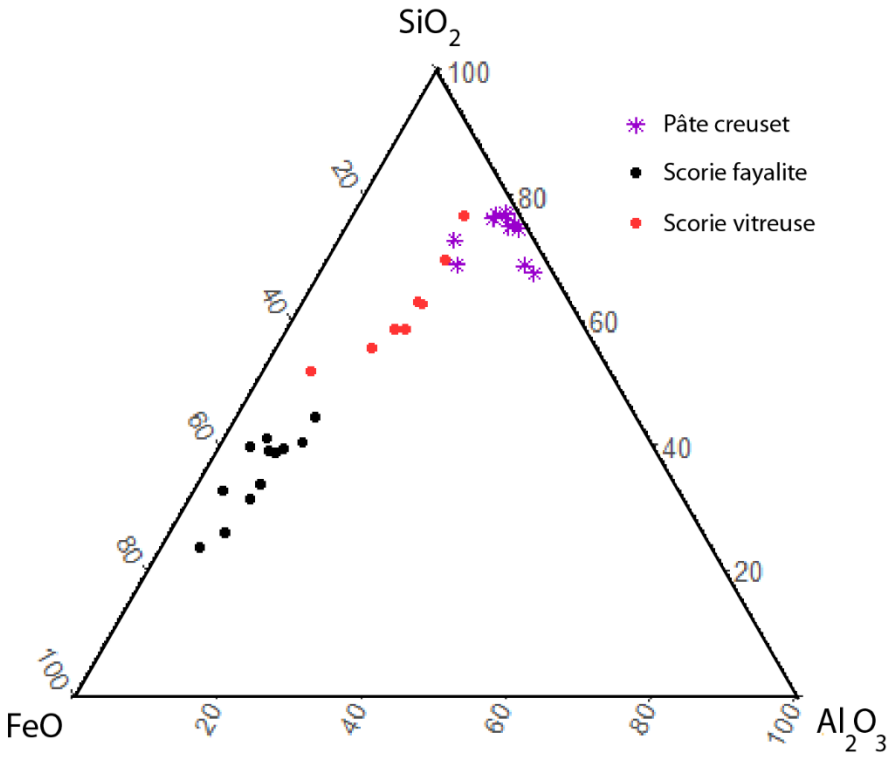


Figure 75 : Diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 (%mass.) des couches de scories adhérentes avec les deux types définis, fayalite et vitreuse ainsi que la composition globale de la pâte des creusets. Données obtenues au MEB-EDS.

La couche de scorie considérée comme fayalitique (Figure 76 et Figure 78), après moyenne sur plusieurs analyses pour chaque échantillon, montre qu'elle se compose de FeO (52 %mass.), SiO_2 (34 %mass.) et Al_2O_3 (7 %mass.) pour les composés majeurs. On trouve ensuite des composés mineurs, MnO (1 %mass.), K_2O et CaO (0,8 %mass.) et MgO (1 %mass.). Le cuivre résiduel est bas avec 2 % mass. en moyenne et le soufre non détecté. Les scories de type fayalitique se composent de trois phases majeures : des olivines ferreuses, des oxydes de fer, principalement de la magnétite, dans une phase vitreuse. Les cristaux d'olivines ferreuses sont identifiés grâce à leur morphologie, en majorité en squelette et parfois en plume, matérialisant une vitesse de refroidissement assez rapide. Les olivines ferreuses sont identifiées également par leur composition moyenne en FeO (60 %mass.) et SiO_2 (33 %mass.), correspondant à la stœchiométrie de la fayalite (Fe_2SiO_4). Des composés mineurs y sont associés : Al_2O_3 (2 %mass.), MgO (3 %mass.) et MnO (2 %mass.).

Ensuite on retrouve des oxydes de fer, cristallisés principalement en polyèdres, plus rarement en dendrites, composés en moyenne de Fe à 70 % mass., O à 25 % mass., avec une part d'Al à 4 % mass., Si à 0,6 % mass. et Ti à 0,5 % mass. Ils sont donc associés à un spinelle, la magnétite (Fe_3O_4). On retrouve également associées à ces scories de type fayalitique différentes inclusions métalliques : du cuivre métallique et des inclusions de sulfures de cuivre,

principalement la chalcocite (Cu_2S), mais également la covellite (CuS), identifiées par leur forme sphéroïdale, leur couleur et leurs teneurs en cuivre et en soufre.

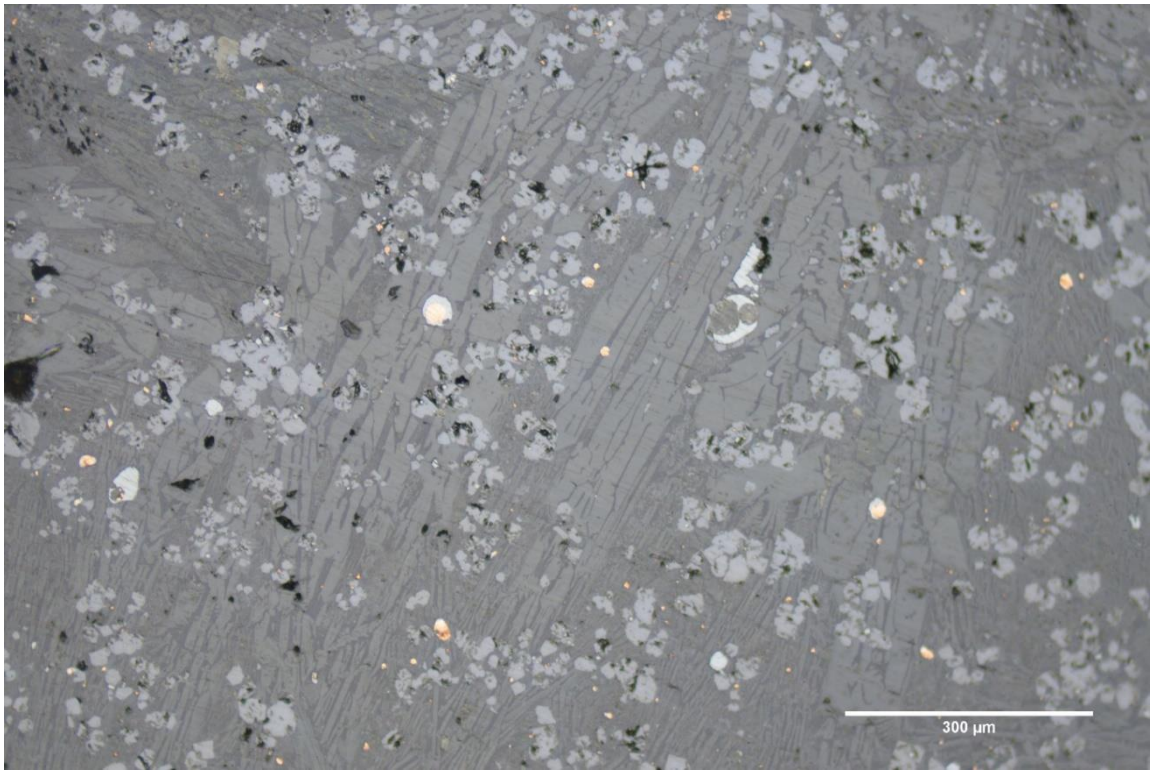


Figure 76: Micrographie d'une scorie de type fayalitique adhérente à un creuset (PBL/B17/2/1/3303/h) avec la présence majoritaire d'olivines ferreuses en squelette, de magnétite en polyèdre ainsi que d'inclusions de cuivre métalliques et de sulfures de cuivre (chalcocite).

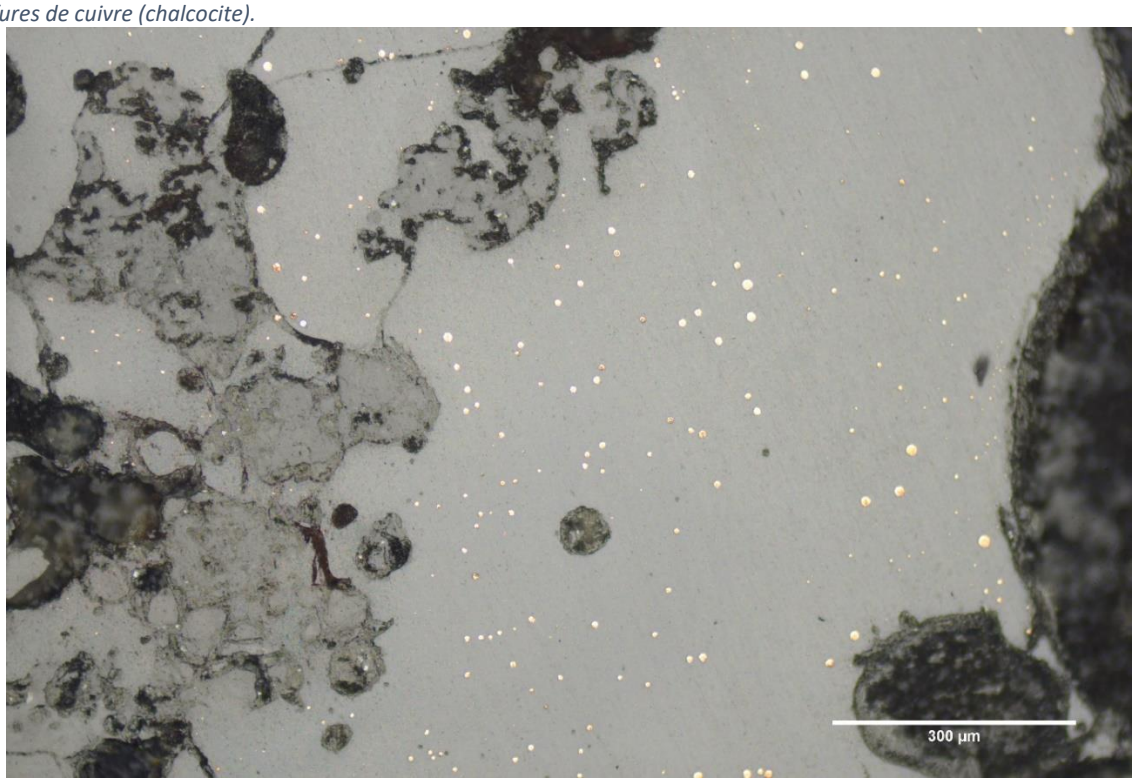


Figure 77: Micrographie d'une scorie de type vitreuse adhérente à un creuset (PBL/A15/3/1/6703), avec des inclusions de cuivre métallique, ainsi que du quartz résiduel provenant du creuset.

Le second type de scorie à dominance de verre riche en cuivre (Figure 77 et Figure 79) se compose en moyenne sur les dix échantillons, en majorité de SiO_2 (51,0 %mass.), FeO (19,0 %mass.) et Al_2O_3 (12 %mass.). Les composés mineurs sont K_2O (2,0 %mass.), CaO (2,0 %mass.), MgO (1,0 %mass.) et MnO (1,0 %mass.). Le taux de cuivre résiduel est ici en moyenne de 9 % mass. avec un taux jusqu'à 23 % mass. (PBL/B17/2/2/3314/a). On voit déjà ici que le taux de silice est supérieur à celui des scories fayalitique, ainsi que le taux de cuivre. Si on regarde maintenant les phases présentes dans ce type de scorie, on a donc en majorité une phase vitreuse, des oxydes de fer, généralement cristallisés en dendrites, ainsi que des inclusions de cuivre métallique. C'est dans la phase vitreuse qu'on retrouve la plus grande proportion de cuivre avec 9,5 % mass. Les oxydes de fer, souvent cristallisés en dendrite, se composent en moyenne de Fe à 61,5 % mass., O à 32 % mass. ainsi que d'Al à 3 % mass., Si à 1,5 % mass., Mn à 0,8 % mass. et Mg à 0,9 % mass. Ils contiennent également un taux élevé de cuivre, en moyenne de 6,3 % mass. La solubilité de Cu dans la magnétite est faible (Luraschi et Elliott, 1976). En revanche, la solubilité de Cu^{2+} augmente dans des conditions réductrices moyennes à 900-1000 °C, menant à la formation d'une solution solide $CuFe_2O4–Fe_3O_4$ (S. Schaefer et al., 1970). Ce type de scorie semble davantage résulter d'une vitrification par suite d'une réaction de la pâte du creuset avec la charge. Dans le cas des scories de type fayalitique, la couche de scorie est bien plus démarquée du restant du creuset adhérent.

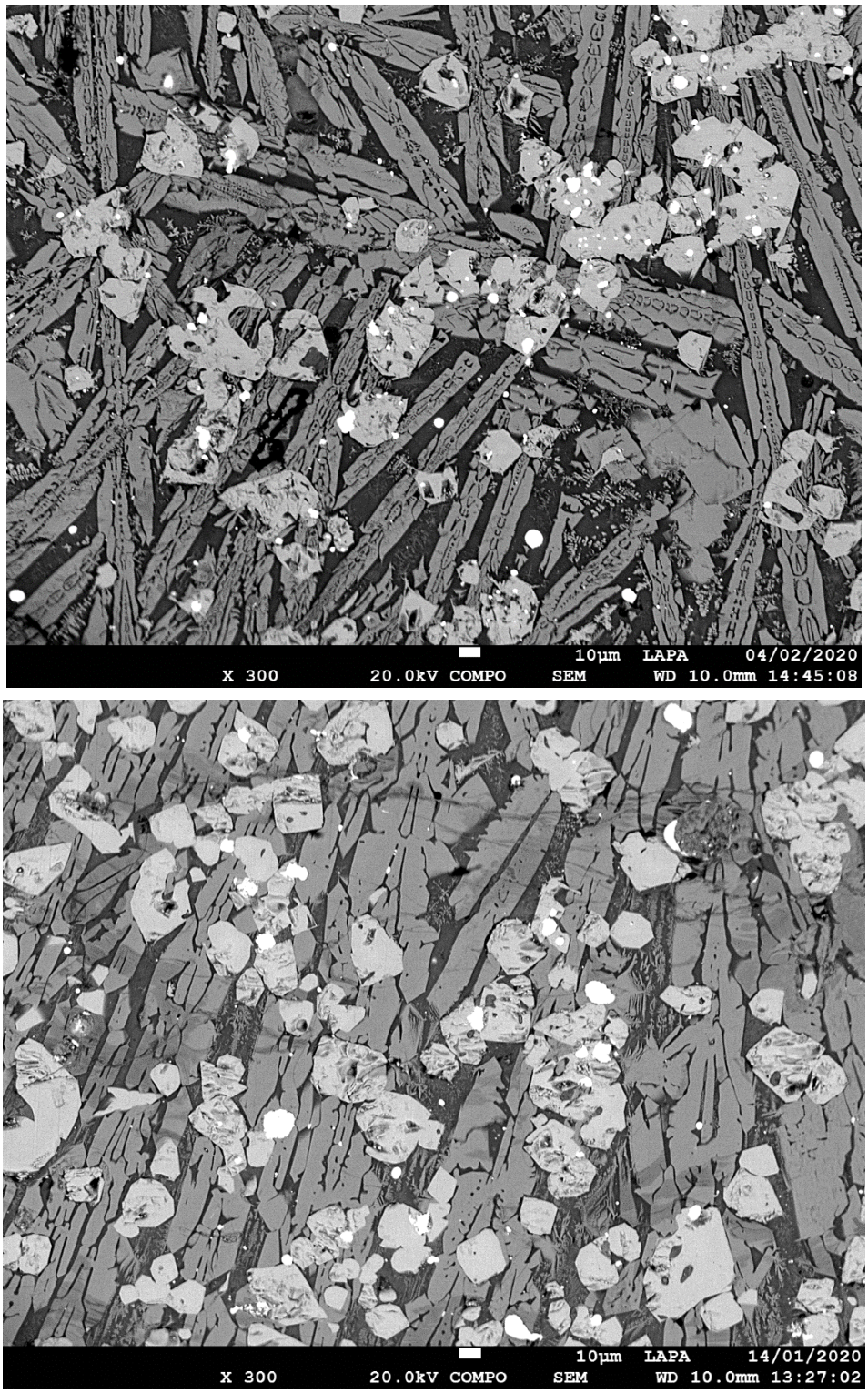


Figure 78 : Images en BSE au MEB-EDS (x300) de la couche de scorie adhérente aux creusets de PBL. En haut (PBL/B14/1/1/7001/a), scorie de type fayalite avec des olivines ferreuses (gris foncé) cristallisées en squelette, de la magnétite en polyèdre (gris clair), dans une phase vitreuse (noir) ainsi que des inclusions métalliques (blanc) ; en bas PBL/(C14/2/3/7217), mêmes caractéristiques que pour l'image précédente.

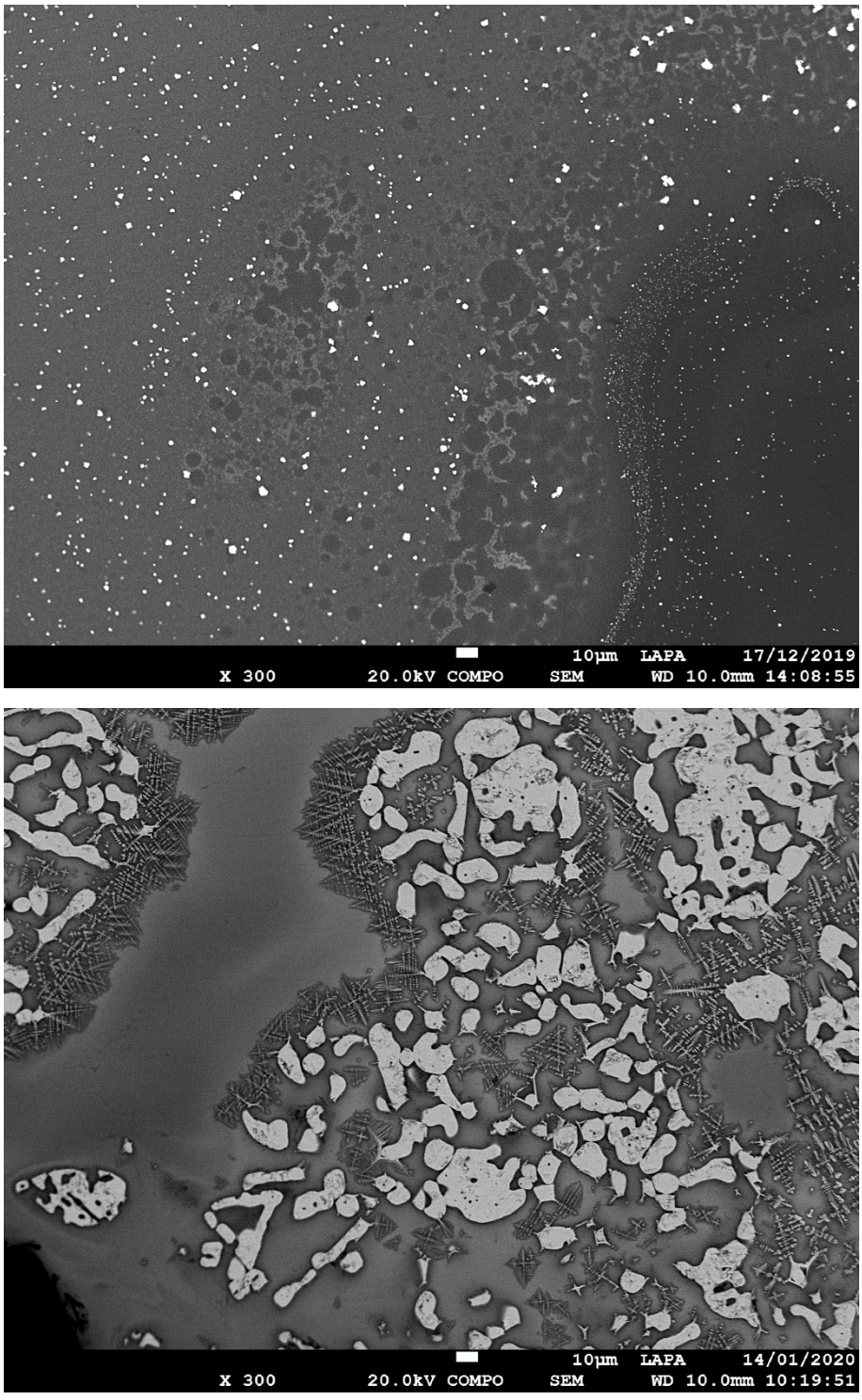


Figure 79 : Images en BSE au MEB-EDS (x300) de la couche de scorie adhérente aux creusets de PBL. En haut (PBL/C17/1/2/b), une scorie vitreuse riche en cuivre avec de nombreuses inclusions de cuivre métallique (blanc) ; en bas (PBL/S9/1/1/5503), une scorie vitreuse avec la cristallisation d'oxydes de fer (gris clair) de forme arrondie.

Il est intéressant de comparer la composition moyenne des composés majeurs dans la couche de scorie et dans la pâte du creuset (Figure 75 et Figure 80) afin de définir si leur apport provient uniquement de la pâte du creuset, ou s'il est apporté par une source externe. Cette comparaison est tout particulièrement importante dans une tentative de discriminer les différentes utilisations d'un creuset (M. Martinón-Torres et T. Rehren, 2014).

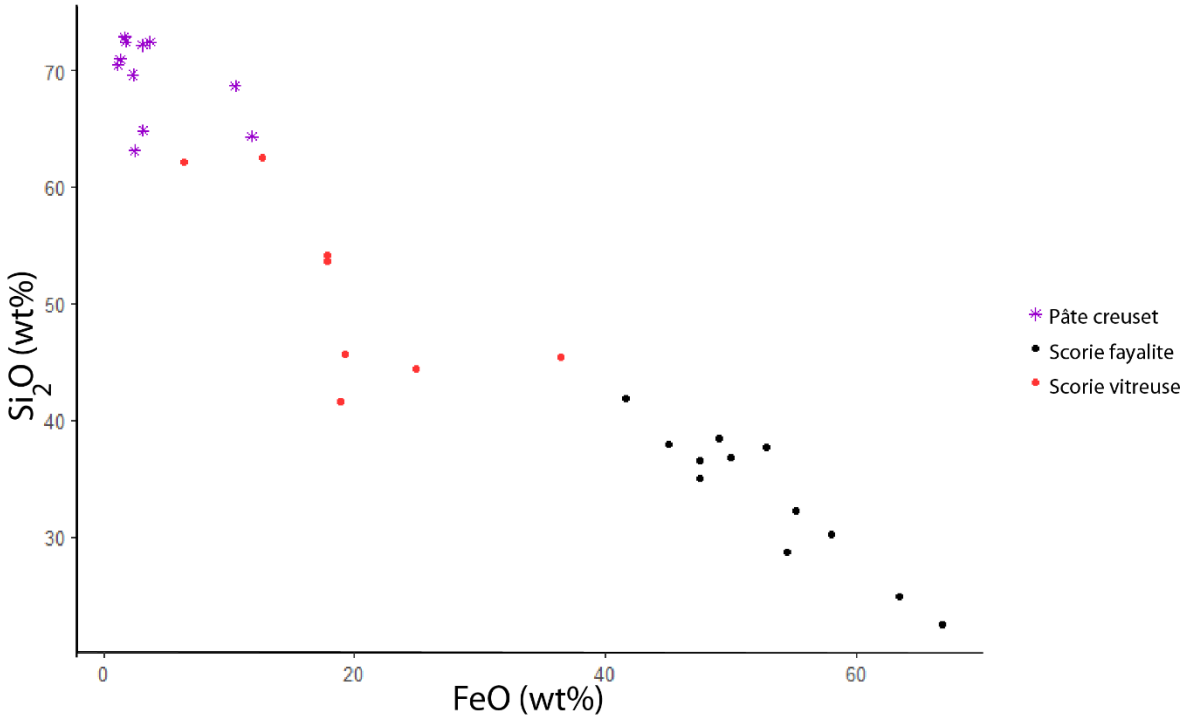


Figure 80 : Comparaison des taux (%mass.) en oxyde de fer et en silice dans les scories et dans la pâte des creusets de PBL. Données obtenues au MEB-EDS.

On remarque que les taux en fer contenus dans la scorie adhérente sont plus élevés que ceux contenus dans la pâte des creusets (Figure 80), à la fois pour les scories de type vitreuses et les scories de type fayalitique, signifiant qu'une source de fer externe doit entrer en jeu dans la charge. On voit tout de même que les taux en fer sont plus bas pour les scories de type vitreuses, que pour les scories fayalitiques, montrant que le fer était moins présent dans le système. Les taux d'alumine sont en revanche plus bas dans les scories que dans la pâte, signifiant une faible contribution de ce composé via la réaction avec la pâte céramique, contenant environ 30 % mass. d'Al_2O_3. Les taux d'alumine sont tout de même plus élevés dans le cas des scories vitreuses, signifiant que ce composé y tient une plus forte contribution, provenant probablement d'une réaction avec la pâte céramique plus élevée.

Si on regarde maintenant le rapport Al_2O_3/SiO_2 (Figure 81) qui nous permettent d'évaluer la contribution de la pâte céramique à la formation des scories, on remarque que la pâte des creusets possède des rapports qui s'échelonnent de 0,1 à 0,5, alors que les scories adhérentes au creuset possèdent des rapports plus resserrés et moins élevés, signifiant que davantage de SiO_2 est présent, donc qu'il y a une influence de la charge. Si on tente à présent de corréler ce rapport avec les taux d'oxydes de fer (FeO), aucun rapport spécifique n'est observé, ce qui signifie que les scories vitreuses et les scories fayalitiques pourraient être issues de la même étape (Figure 82). Leurs différences de composition proviendraient alors de variations de la charge, particulièrement en oxydes de fer. On ne peut pas exclure également une plus forte

contribution de la pâte céramique à la formation des scories de type vitreuses, qui sont plus riches en silice et qui semblent être issues d'une plus forte vitrification du creuset.

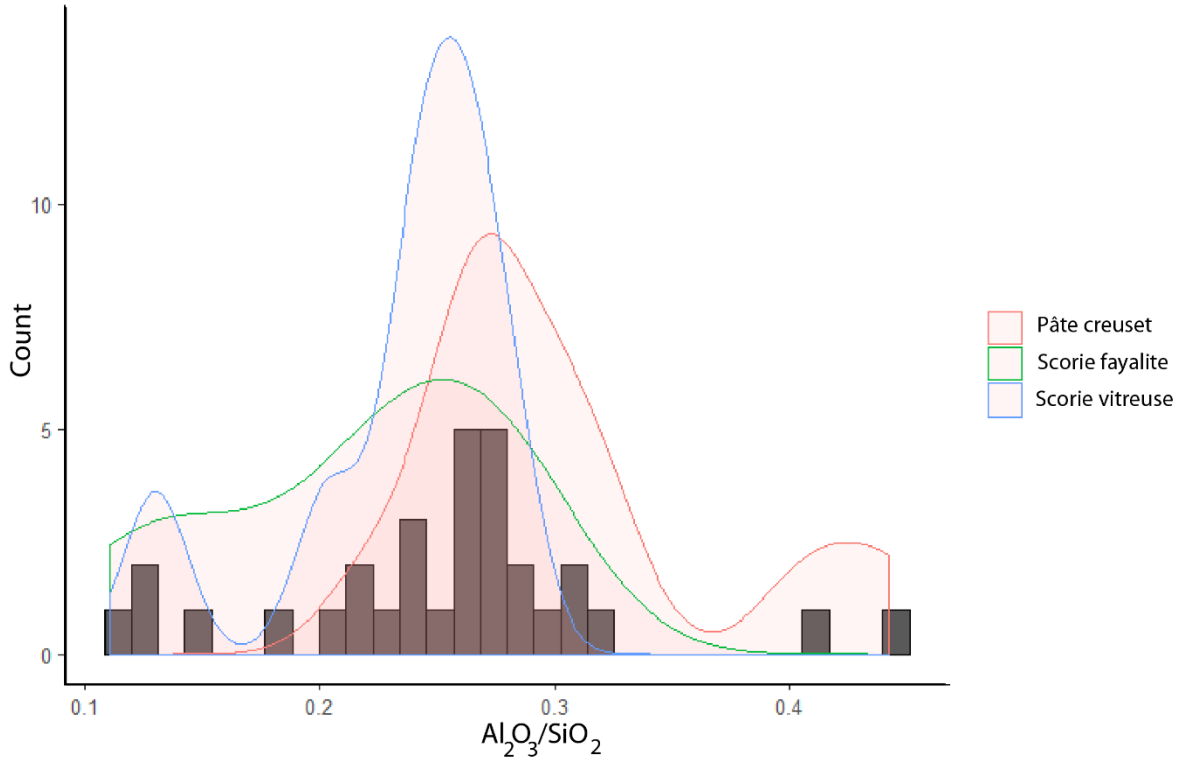


Figure 81 : Histogramme représentant la distribution des rapports Al_2O_3/SiO_2 entre la pâte des creusets et les scories adhérentes aux creusets (vitreuses et fayalites). Données obtenues au MEB-EDS.

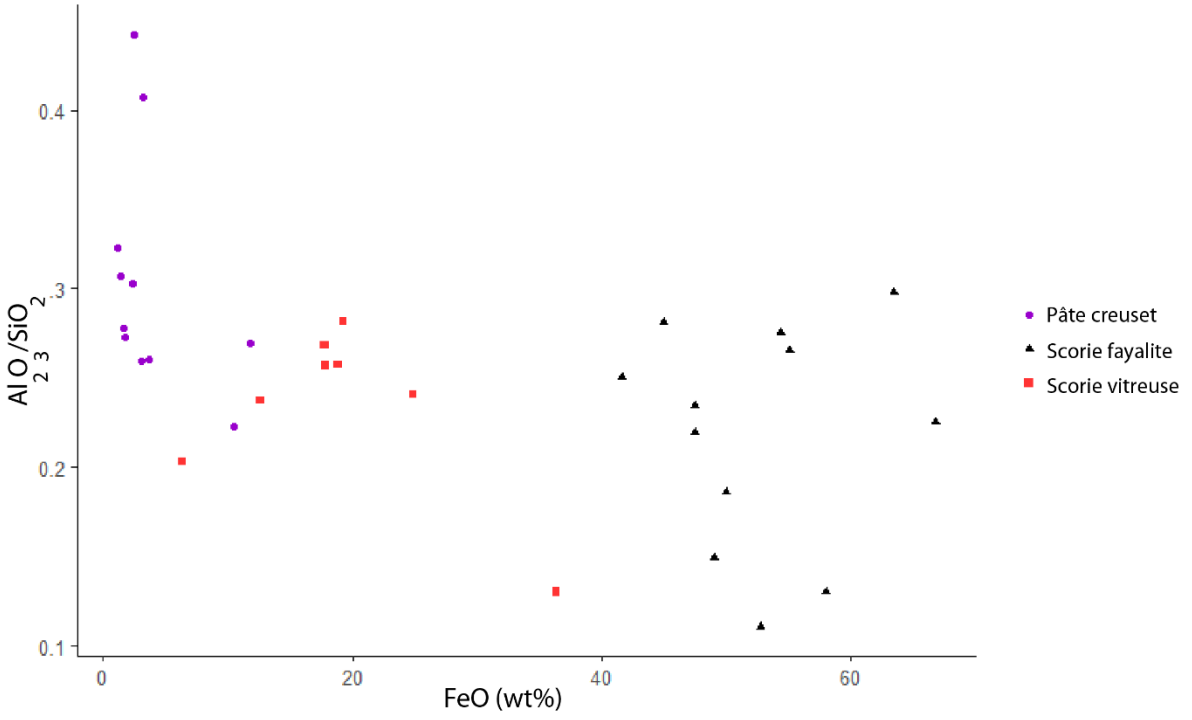


Figure 82 : Comparaison des rapports Al_2O_3/SiO_2 et des taux en FeO de la pâte des creusets et des scories adhérentes (vitreuses et fayalites). Données obtenues au MEB-EDS.

2. Thong Na Nguak

Minéralogie et composition de la pâte des creusets

A. Composition globale

Quatre fragments de creusets de TNN ont été analysés par ICP-OES et ICP-MS (voir partie IV.4) afin d'obtenir leur composition en éléments majeurs, mineurs et traces. Les prélèvements ont pu être faits en évitant les résidus scoriacés internes afin d'éviter de biaiser les données. Les données sont présentées en Annexe 2.

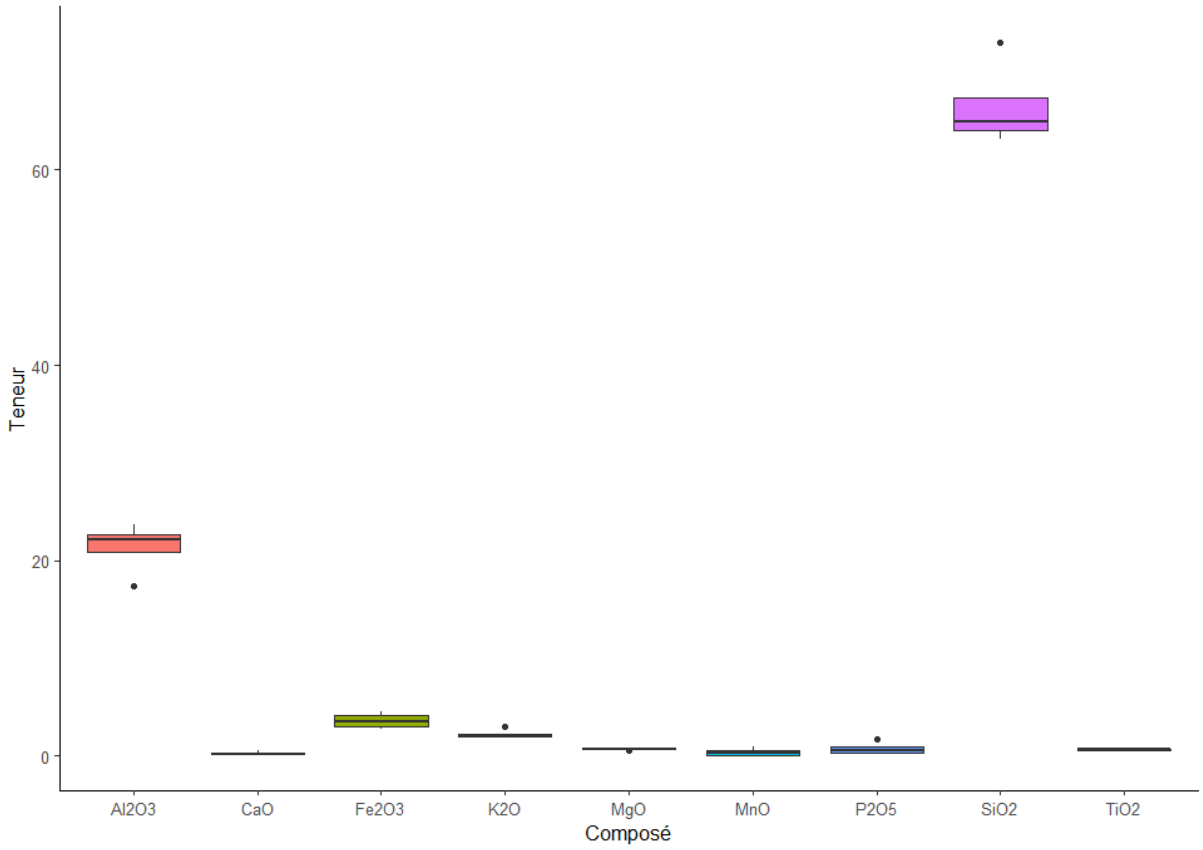


Figure 83 : Diagramme en boite représentant les compositions (%mass.) des creusets de TNN (n=4). Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
CV	7%	13%	24%	110%	14%	89%	35%	22%	25%	93%

Tableau 22 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans la pâte des creusets de TNN (ICP-MS et ICP-OES).

Les résultats sur chaque échantillon montrent que la pâte des creusets se compose en majorité de silice (66,5 %mass.), d'alumine (20 %mass.) et d'oxyde de fer (3,2 %mass., Figure 83 et Figure 84). Les coefficients de variations pour ces composés sont faibles pour SiO_2 et Al_2O_3, avec 7 et 13% respectivement et de 24 % pour FeO (Tableau 22). Le peu de variation dans les composés majeurs signifie que la nature de la matière première argileuse employée est la même pour tous les creusets.

On retrouve ensuite des composés mineurs, à commencer par K_2O (2,2 %mass.), MgO (0,7 %mass.), TiO_2 (0,6 %mass.), et P_2O_5 (0,7 %mass.). L'oxyde de calcium est détecté à seulement 0,2 %mass. Leurs coefficients de variations sont également peu élevés (K_2O =22%, TiO_2 = 25%, MgO= 14%). Ils sont plus élevés pour CaO= 89% et P_2O_5 = 93 %mass. Tout comme dans le cas des composés majeurs ce peu de variation indique que la source de matière argileuse était de même nature pour tous les creusets analysés.

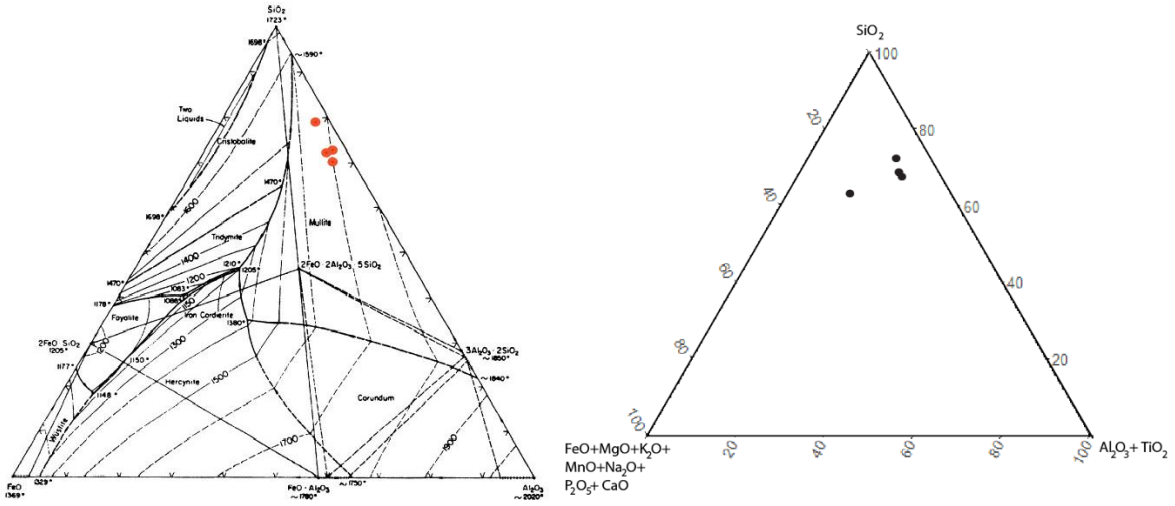


Figure 84 : À gauche, composition globale de la pâte des creusets (%mass.) avec les composés majeurs FeO-SiO_2-Al_2O_3 de la pâte des creusets de TNN représentés dans un diagramme de phase d'après Levin et al, 1956. À droite, diagramme ternaire représentant les données globales en éléments majeurs et mineurs des creusets. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

Tout comme dans le cas de Puen Baolo, mise à part le cuivre détecté ici en moyenne à 0,5 %mass., les autres éléments métalliques susceptibles d'être présents sont ici à l'état de traces (Tableau 23), avec Pb (200 ppm) et Zn (600 ppm). Comme pour PBL si on regarde les éléments traces principaux, aucune homogénéité ne semble se distinguer (Figure 85).

	As	***Ba***	***Cu***	***Pb***	***Sn***	***Zn***	***Zr***
DF/1-A/4/131/b	68	748	3546	97	8	281	218
DF/1-A/B3/90	46	397	3212	204	6	342	185
DF/1-B/3/113	44	272	770	176	10	254	214
DF/1-C/2	52	1100	15543	445	35	1485	154

Tableau 23 : Principaux éléments traces (ppm) détectés dans la pâte des creusets de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

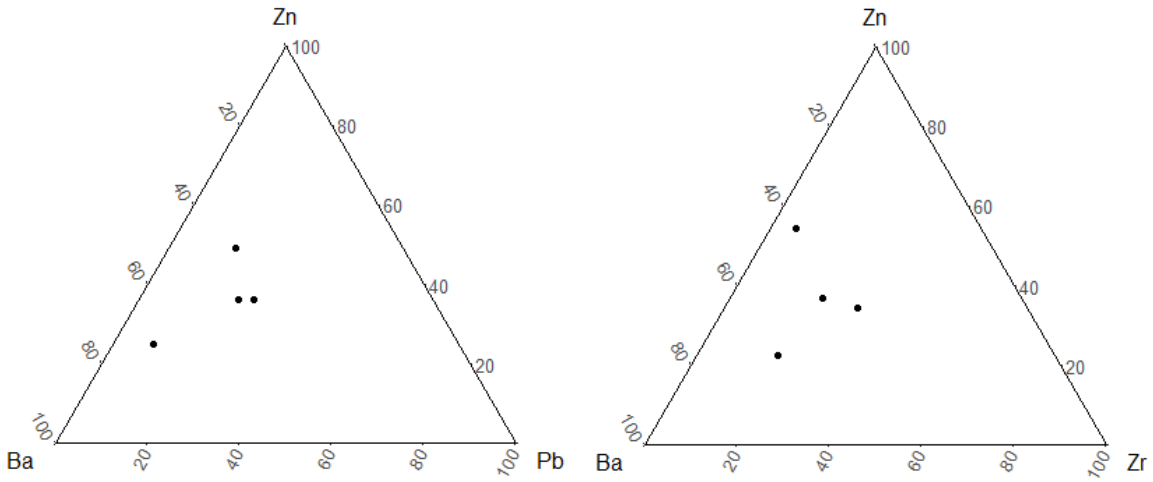


Figure 85 : Diagramme ternaire avec les principaux éléments traces de la pâte des creusets de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

B. Microscopie Optique et MEB-EDS

Les fragments de creusets de TNN sont en majorité plus altérés que ceux de PBL. Les analyses ont été faites dans les zones apparaissant les plus préservées, afin d'obtenir les données les plus représentatives possibles. Les mêmes inclusions que pour PBL peuvent ainsi être identifiées dans la pâte des creusets de TNN (Tableau 24).

La principale inclusion minérale composant la pâte des creusets se trouve être le quartz, identifié au MEB-EDS grâce à sa composition en silicium de 48 %mass., correspondant à la stœchiométrie du quartz. La taille des grains de quartz est variable, environ de 10 à 1200 µm. Ils ont une morphologie à dominante arrondie à subarrondie signifiant qu'ils ont été naturellement altérés (V. Kilikoglou et al., 1998). Pour certains échantillons, les grains de quartz présentent également fréquemment des fissures ainsi que des interfaces de dissolution avec la pâte céramique les enveloppant. Tout comme dans le cas de PBL, ces caractéristiques peuvent signifier des températures locales atteintes au-delà de 1200°C.

Échantillon	Type	Dégraissant	Quartz	Rutile	Zircon	K-Feldspath
DF_1-B_3_113	Bord+fond	Balle de riz				
DF_1-A_B3_90	Fond	-	X	X	X	
DF_1-C_2	Fond	Balle de riz	X	X		
DF_1-E_3_37	Fond	Balle de riz	X	X	X	
DF_1-A_4_131_a	Fond	Balle de riz	X	X	X	
DF_1-A_4_131_b	Bord	Balle de riz	X	X		

Tableau 24 : Caractéristiques microscopiques de la pâte des creusets de Thong Na Nguak.

En plus des grains de quartz, on identifie d'autres minéraux. Tout d'abord un oxyde de titane, le rutile (TiO_2), déjà identifié pour PBL, avec des compositions moyennes des cristaux de 44,5 %mass. de titane, correspondant à la stœchiométrie du rutile. On trouve d'autres éléments

mineurs associés, comme le fer à 3 %mass., l'aluminium et le silicium également à 3 %mass. et 2 %mass. Le rutile se retrouve pour la totalité des creusets avec des tailles d'environ 5 à 70 µm. Des cristaux de zircon ($ZrSiO_4$) sont également identifiés de manière sporadique dans la pâte, grâce à leur morphologie et leur composition moyenne de 47,5 %mass. de Zr et 15,5 %mass. de Si.

Les feldspaths potassiques ne sont pas présents dans la pâte des creusets de TNN, sa forte altération peut être à l'origine de cette absence. Le taux global de K_2O (2 %mass.) dans la pâte des creusets pourrait indiquer leur présence à certains endroits, mais on a vu pour PBL qu'ils tendaient à être en grande partie dissouts dans la part argileuse, difficile donc parfois à discerner.

Ces différents minéraux se retrouvent entourés par la fraction argileuse qu'il a parfois été difficile d'analyser seule, compte tenu de la dissolution de certaines phases liées à la chauffe. Les données doivent donc être interprétées avec précaution. Néanmoins, les moyennes des analyses pour chaque échantillon révèlent que cette fraction argileuse se compose de SiO_2 à 60,5 %mass., Al_2O_3 à 30 %mass., K_2O à 4 %mass., FeO à 3 %mass., TiO_2 à 0,5 %mass., MgO à 1 %mass., CuO à 0,7 %mass. et CaO à 0,4 %mass. (Figure 86). La fraction argileuse semble contenir des minéraux riches en silice et alumine, et pauvres en calcium.

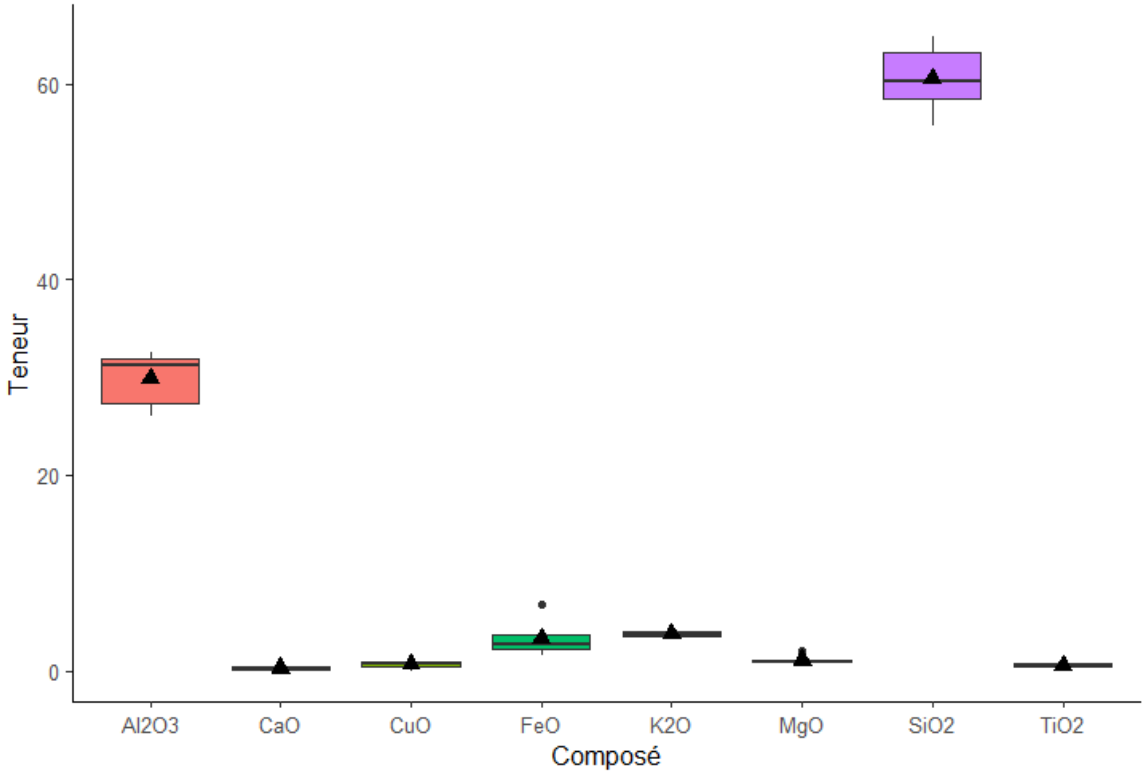


Figure 86 : Diagramme en boite avec les teneurs moyennes des composés identifiés dans la part argileuse des creusets de TNN (n=6). Données obtenues après moyenne sur des analyses au MEB-EDS. Les triangles noirs représentent la moyenne globale pour chaque composé.

L'analyse macroscopique avait permis de mettre en lumière la présence d'un dégraissant organique. Il est ici identifié comme étant de la balle de riz via une comparaison avec la littérature. La balle de riz a bien évidemment disparu à la suite de la chauffe, étant un composé organique, mais à son emplacement restent des pores allongés caractéristiques, conservant la structure d'origine. Les pores ne suivent pas une orientation préférentielle stricte, mais sont dans la plupart des cas parallèles à l'intérieur du creuset. Pour un échantillon (DF/1-A/B3/90) le dégraissant organique n'est pas présent.

La matière première argileuse employée était donc une argile non calcaire riche en alumine et pauvre en fer, comme dans le cas des creusets de PBL. La présence des différentes inclusions, quartz, rutile et zircon, ainsi que la présence du dégraissant organique ajouté de balle de riz pour la quasi-totalité des échantillons analysés, confirme que la matière première argileuse employée, ainsi que sa transformation étaient similaire pour l'ensemble des creusets.

Aucune différence n'émerge entre la pâte des creusets de PBL et ceux de TNN, matérialisant peut-être une même source d'approvisionnement pour les matières premières, ainsi qu'une même technique de mise en forme. Même si les creusets de TNN, très fragmentaires, ne permettent pas de faire une comparaison sur la forme.

Description de la microstructure et de la composition de la couche de scorie adhérente de TNN

Une couche de scorie adhérente est identifiée pour tous les fragments où la partie interne du creuset est préservée. Cette couche est d'épaisseur variable comme mentionnée en partie V.2.1. Son épaisseur varie de 200 à 7000 µm avec une pénétration plus ou moins importante dans la pâte céramique. Pour deux fragments (DF/1-A/B3/90 et DF/1/B/3/113), une couche de scorie est également présente sur les bordures externes des creusets. Cette couche de scorie a été analysée via le MEB-EDS, afin d'éviter toutes inclusions et/ou zones liées à la partie céramique du creuset. Contrairement à la partie céramique, la couche de scorie n'était que peu altérée permettant des analyses plus fiables.

A. Composition globale

L'étude en microscopie révèle des scories en majorité hétérogènes, contenant des minéraux n'ayant pas réagi, principalement des grains de quartz, probablement issus de la pâte céramique. La couche scoriacée des creusets de TNN peut être rapprochée du type de scories à dominance vitreuse riche en cuivre, identifiée pour les scories de PBL. Un seul exemple, DF/1-B/3/113 correspond à une scorie de type fayalitique.

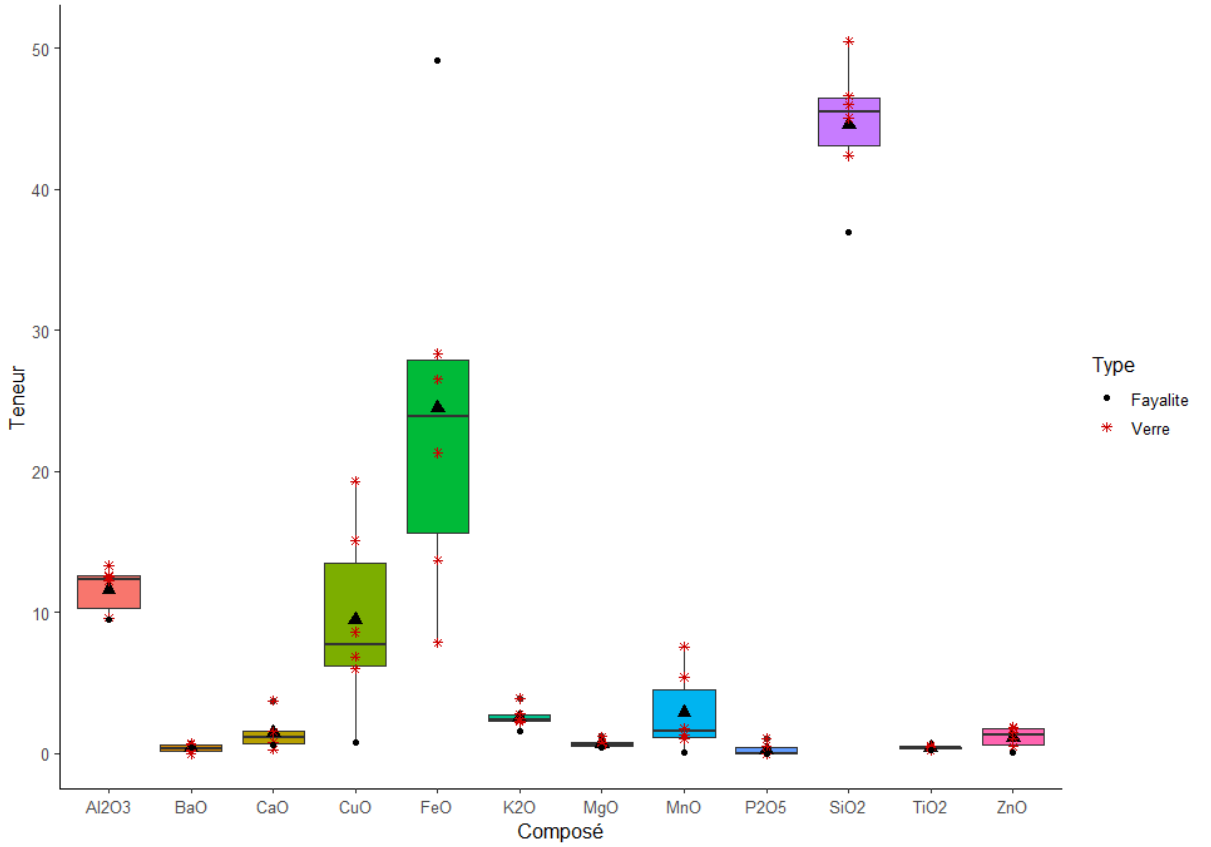


Figure 87 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) pour les scories adhérentes au creuset de TNN (n=6). Données obtenues pour chaque échantillon après moyenne sur différentes zones d'analyses au MEB-EDS. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé.

	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO	CuO	ZnO	BaO
CV	37%	14%	10%	148%	30%	86%	29%	102%	59%	71%	62%	74%

Tableau 25 : Coefficients de variation pour chaque composé identifié dans la couche de scorie adhérente au creuset de TNN (données MEB-EDS).

Les analyses moyennées sur les scories de TNN montrent qu'elles se composent en majorité de SiO_2 à 44,5 %mass., FeO (24,5 %mass.) et Al_2O_3 (12,0 %mass., Figure 87). Les taux en SiO_2 et Al_2O_3 sont peu variables (CV = 10 et 14%), en revanche le taux en FeO l'est davantage avec 59% (Tableau 25). Les composés mineurs associés sont MnO (3,0 %mass.), K_2O (2,5 %mass.), ZnO (1,0 %mass.), CaO (1,5 %mass.) et MgO (0,7 %mass.). Tout comme pour PBL, le taux de cuivre résiduel moyen est élevé, de 11 %mass. On voit ici une différence se dessiner entre la composition moyenne des scories de PBL et celles de TNN dans les taux en MnO et ZnO qui sont plus élevés dans le cas de TNN, et seront plus largement abordés dans la partie V.3. De plus, les taux en MnO étant détectés à l'état de trace dans la pâte des creusets, la présence de ce composé dans les scories ne peut pas provenir d'une contribution de la pâte céramique et provient donc d'un ajout externe, contenu dans la charge.

B. Microstructure

Les phases principales identifiées dans les scories de TNN (hormis DF/1-B/3/113, Figure 90) sont en premier lieu la phase vitreuse, des oxydes de fer cristallisés en dendrite et en polyèdre, ainsi que des inclusions métalliques (Figure 88 et Figure 89). Cette phase vitreuse se compose en moyenne de SiO_2 (52 %mass.), Al_2O_3 (13 %mass.), CuO (11 %mass.) et FeO (13 %mass.). On trouve ensuite des composés mineurs MnO (4 %mass.), K_2O (3 %mass.), CaO (2 %mass.), ZnO (1 %mass.) et MgO (0,7 %mass.). La plus grande part du cuivre résiduel se retrouve donc dans le verre.

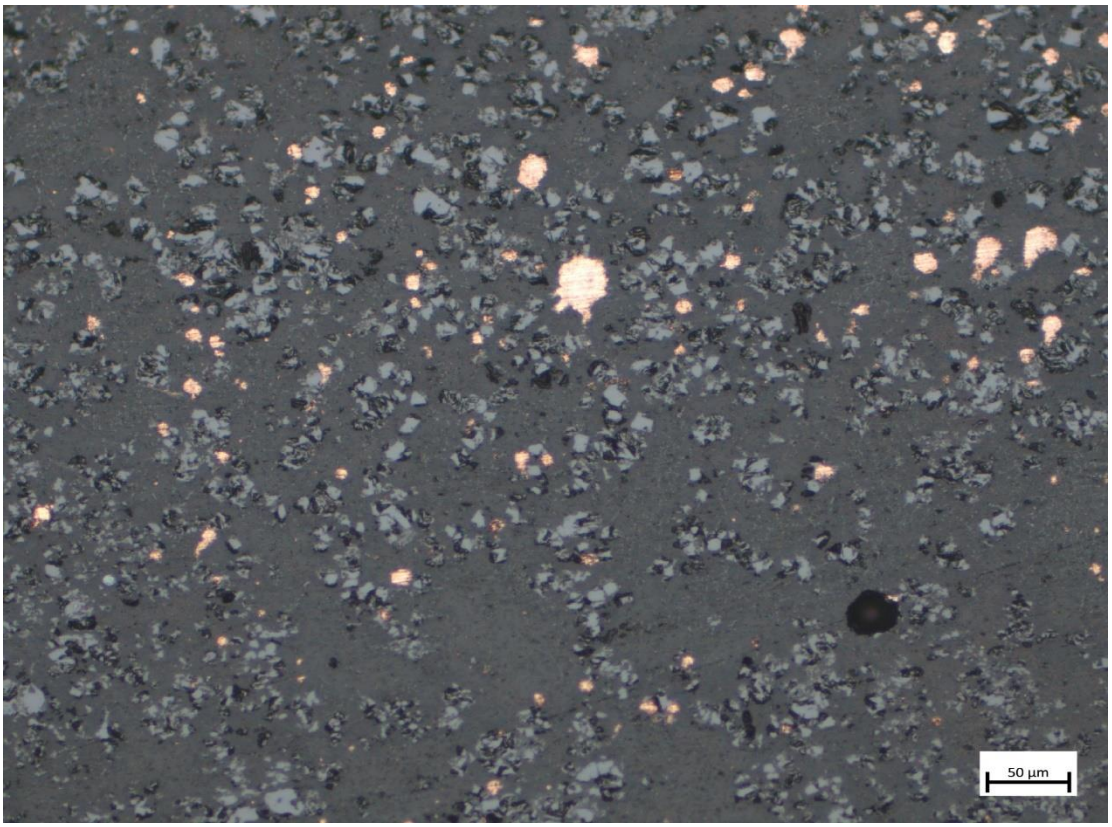


Figure 88 : Micrographie d'une scorie adhérente aux creusets de TNN (DF/1-A/4/131/b). Il s'agit d'une scorie vitreuse avec des oxydes de fer cristallisés en polyèdre (gris clair) ainsi que des inclusions de cuivre métallique.

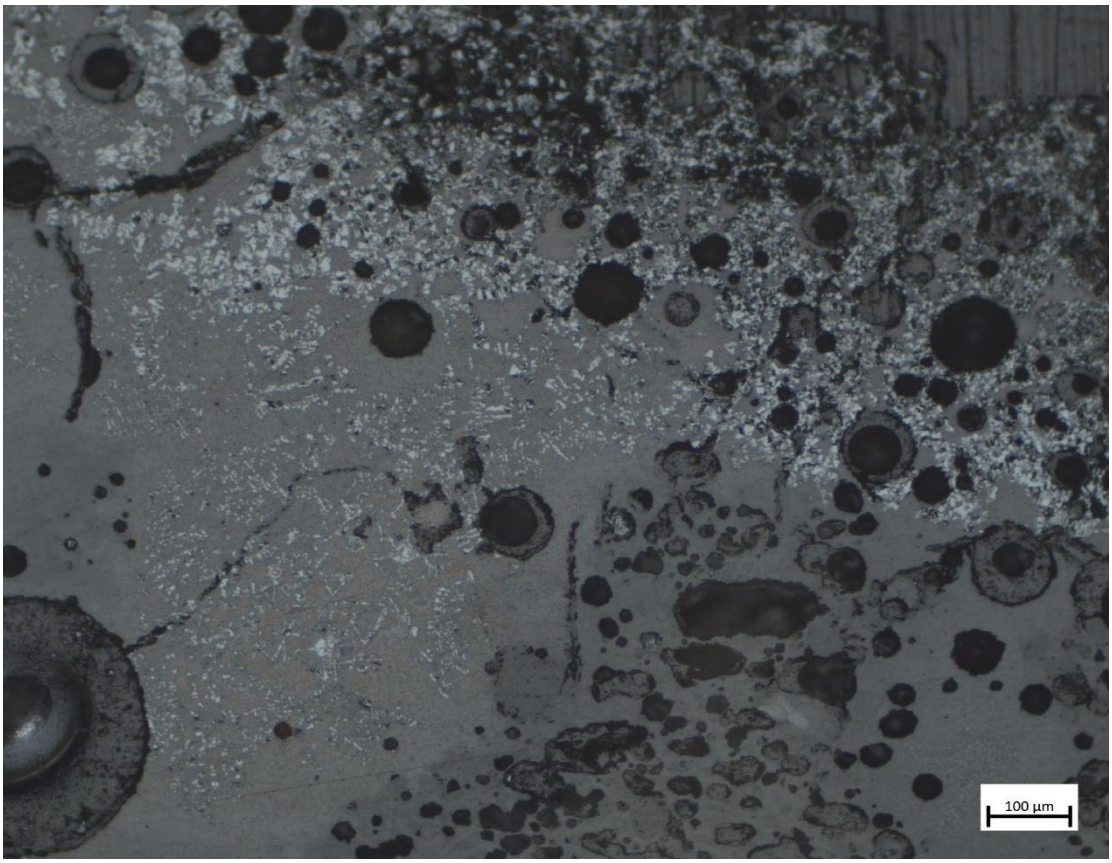


Figure 89 : Micrographie d'une scorie adhérente au creuset de TNN (DF/1/C/2). Il s'agit d'une scorie vitreuse avec des oxydes de fer riche en cuivre.

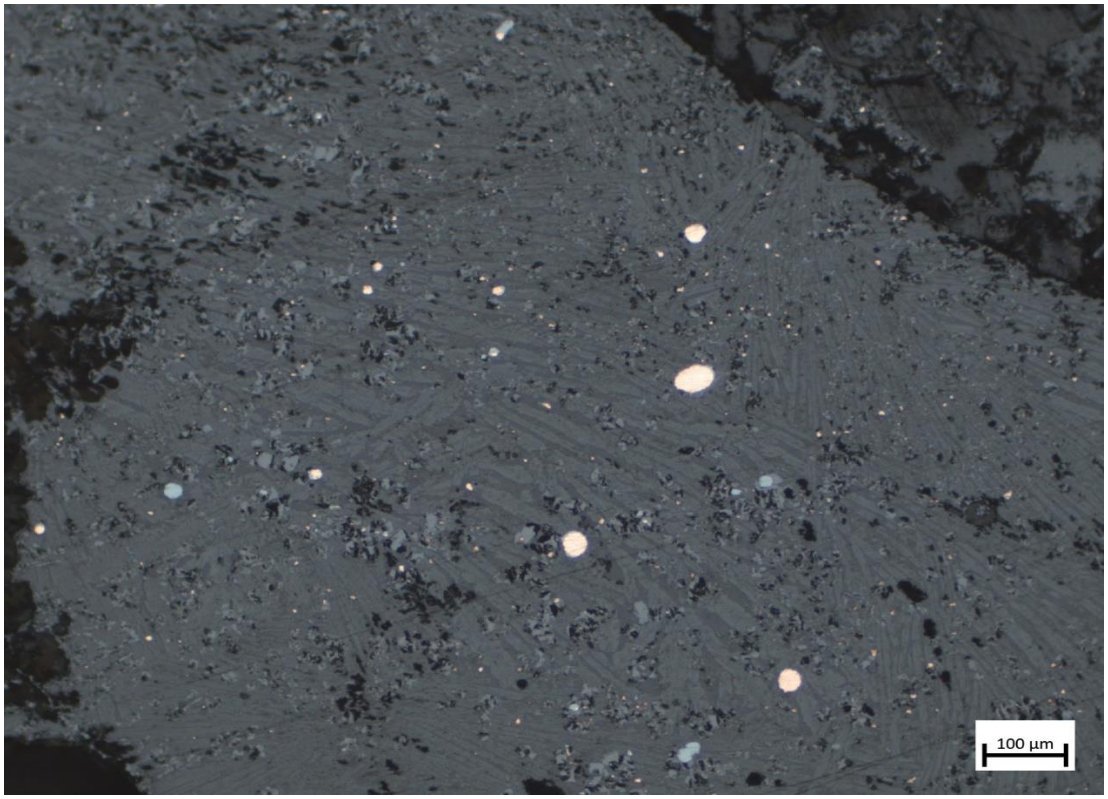
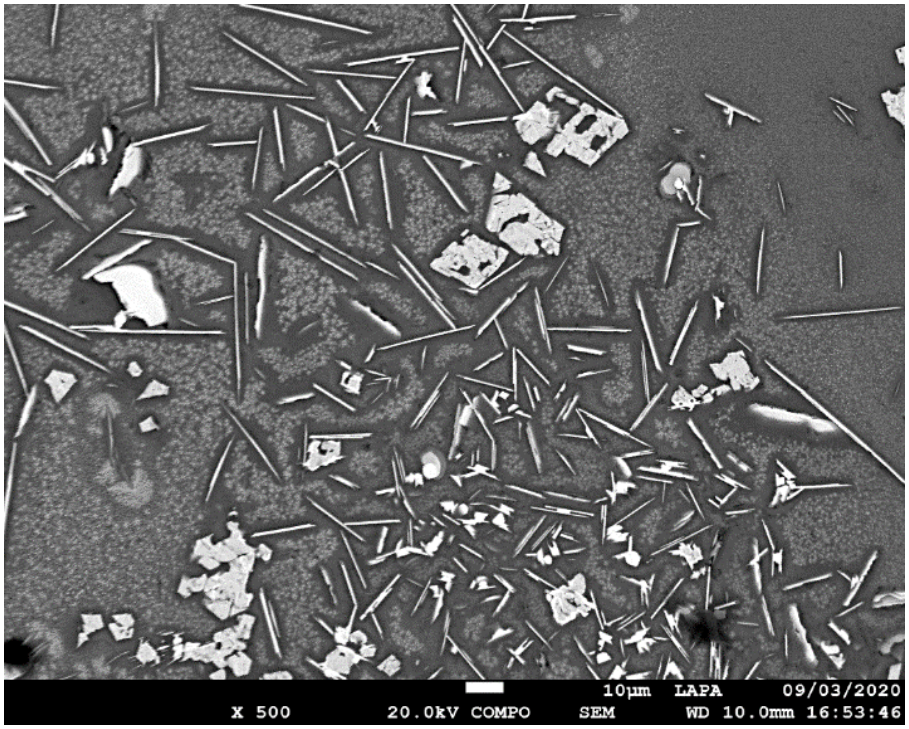


Figure 90 : Micrographie d'une scorie adhérente au creuset de TNN (DF/1-B/3/113). Il s'agit du seul exemple de scorie de type fayalitique pour TNN.

Les oxydes de fer sont attribués à la magnétite (Fe_3O_4) étant donné leur morphologie en polyèdre et leur composition moyenne en Fe de 61 %mass. et O à 23 %mass., accompagné de 4 %mass. d'Al, Cu à 5 %mass., Mn à 3 %mass., Zn 3 w%, Si 0,6 %mass., Mg 0,5 %mass. et Ti 0,4 %mass. On voit à nouveau ici que le taux de cuivre est élevé dans la magnétite. Contrairement à PBL, on a identifié dans le cas de deux échantillons (DF/1-A/4/131/a et b) de TNN la présence de l'oxyde de fer et de cuivre, la delafossite ($CuFeO_2$, Figure 91). La delafossite est ici identifiée avec certitude par les taux de cuivre élevés (en moyenne 53 %mass.) avec du fer à 34 %mass., correspondant à la stœchiométrie de ce minéral, et sa cristallisation en aiguille caractéristique. Leur présence dénote des conditions oxydantes, qui ont mené à la perte de cuivre dans la scorie. La même constatation peut être faite des autres scories. Même si la delafossite est absente, on voit que les oxydes de fer sont tout de même enrichis en cuivre, tout comme le verre. Les inclusions arrondies de cuivre métallique sont également présentes dans la matrice de toutes les scories de TNN.



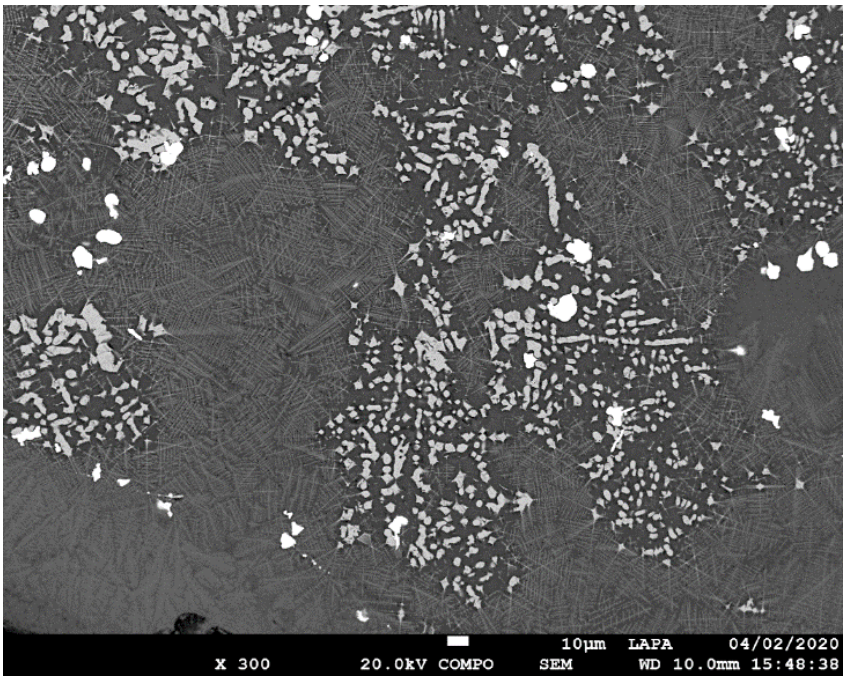


Figure 91 : Images en BSE au MEB-EDS identifiant la présence de delafossite et d'oxydes de fer riche en cuivre. En haut (DF/1-A/3/131/a), présence de delafossite cristallisée en aiguilles (blanc brillant) ; en bas (DF/1-A/B/3/90), oxydes de fer cristallisés en dendrites contenant une proportion importante cuivre.

Si on regarde maintenant, comme pour PBL, la comparaison des composés majeurs FeO-SiO_2-Al_2O_3 dans les scories et la pâte des creusets, on remarque également qu'une partie du fer doit entrer dans le système par une source externe à la composition du creuset (Figure 92 et Figure 93). Même si l'apport en fer ne semble pas avoir été suffisant pour que les olivines ferreuses cristallisent.

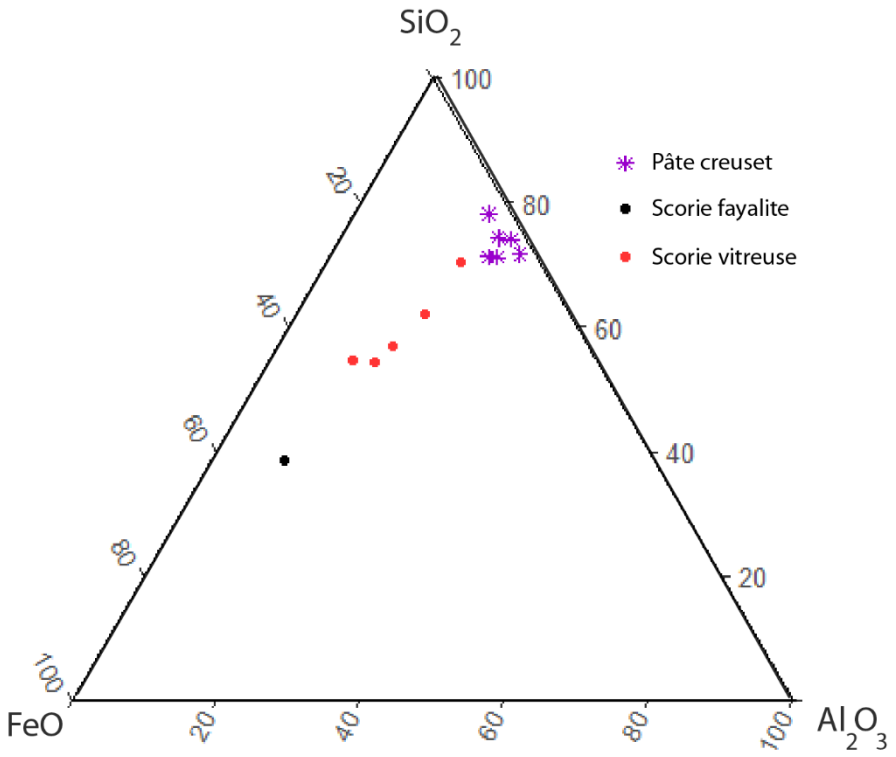


Figure 92 : Comparaison des taux (%mass.) en composés majeurs FeO-SiO_2-Al_2O_3 dans les scories et dans la pâte des creusets de TNN. Données obtenues au MEB-EDS.

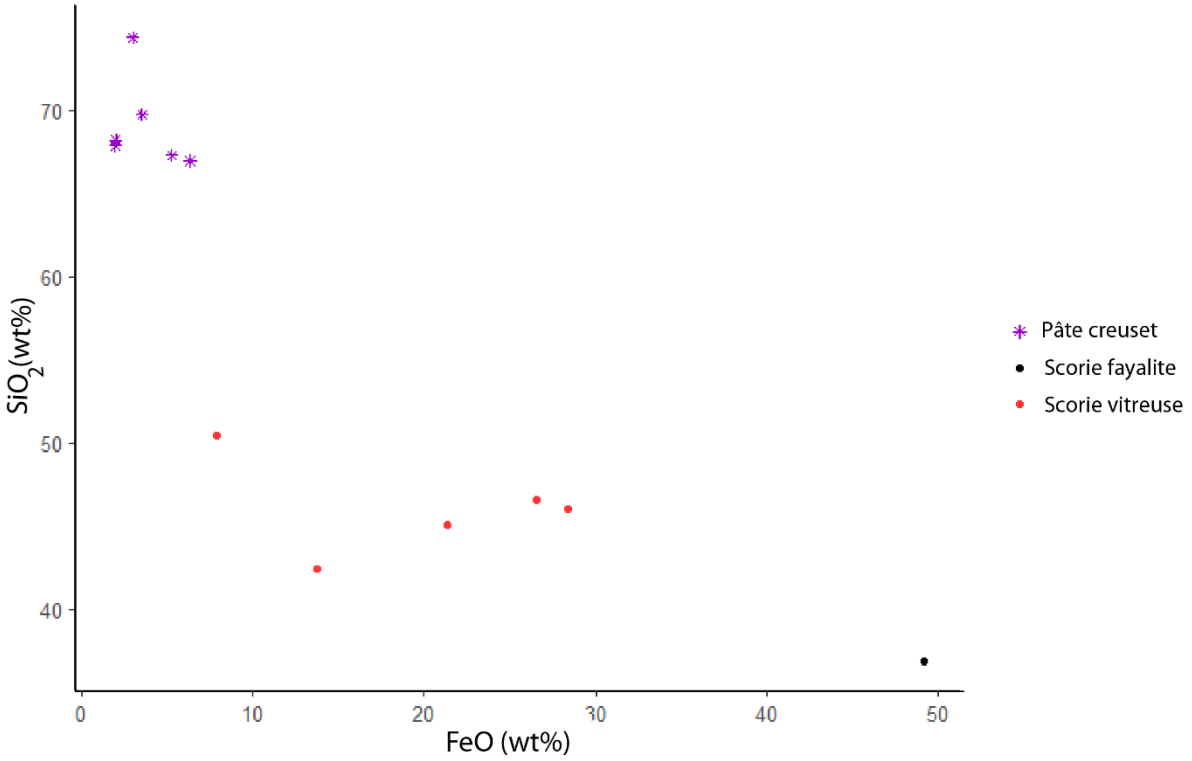


Figure 93 : Comparaison des taux (%mass.) en oxyde de fer et en silice des scories et de la pâte des creusets de TNN. Données obtenues au MEB-EDS.

Les scories de TNN appartiennent donc majoritairement au type de scories vitreuses riches en cuivre, également identifié à PBL. L'apport en fer ne semble pas avoir été suffisant afin de voir la cristallisation d'olivines ferreuses, mis à part pour l'échantillon DF/1/B/3/113. Les conditions devaient également être plus oxydantes, car une part du cuivre métallique a été oxydée, se retrouvant piégée dans le verre et également dans les oxydes de fer. Dans le cas de deux échantillons, la cristallisation de delafossite ($CuFeO_2$) indique que des conditions encore plus oxydantes ont pu être atteintes. La perte de cuivre métallique est donc aussi élevée que dans le cas des scories de PBL.

Échantillon	Épaisseur	Réaction	Oxyde de fer	Olivines	Verre	Cu inclusion	Delafossite
DF_1-B_3_113	<5000 µm	Moyenne	P	S	X	CuS (chalc, cov), Cu	
DF_1-A_B3_90	< 2000 µm	Moyenne	P,D		X	Cu	
DF_1-C_2	< 3000 µm	Moyenne	P,D		X		X
DF_1-E_3_37	< 3000 µm	Forte	P,D		X	Cu	
DF_1-A_4_131_a	<7000 µm	Forte	P		X		X
DF_1-A_4_131_b	< 4000 µm	Forte			X	Cu	X

Tableau 26 : Caractéristiques microscopiques des scories de Thong Na Nguak. Abréviations : P=polyèdre, D=dendrite, S=squelette, CuS=sulfure de cuivre, Cu= cuivre métallique, chalc=chalcocite, cov=covellite.

V.2.3. Autres : microscopie et composition

En plus des fragments identifiés comme creusets, quatre autres fragments de céramiques techniques, d'une nature différente, ont pu être distingués au sein du corpus (Tableau 27). Ces quatre échantillons peuvent être également séparés en deux types après un examen visuel. PBL/B17/2/1/3303/g et PBL/C17/2/1/3112 semblent être des nodules d'argiles rubéfiées sans forme particulière, dont la chauffe est visible à l'œil nu, alors que PBL/DD14/1/1/7108 et PBL/A5/159/367 possèdent une forme cuboïde plus définie, mais dont la provenance est difficile à déterminer. De plus, un gradient thermique peut être perçu pour ces deux échantillons.

	Balle de riz	Quartz	Rutile	Oxydes de fer	K-feldspath	Zone vitrifiée
PBL/B17/2/1/3303/g		X	X	X	X	
PBL/C17/2/1/3112		X	X	X	X	
PBL/DD14/1/1/7108		X	X	X	X	X
PBL/A5/159/367	X	X	X	X		X

Tableau 27 : Les différents composés identifiés dans la pâte.

L'analyse au microscope optique et au MEB-EDS confirme la différence entre ces deux groupes d'échantillons. Pour PBL/DD14/1/1/7108 et PBL/A5/159/367, une zone vitrifiée d'un côté de l'échantillon peut être distinguée, alors qu'elle est absente de PBL/B17/2/1/3303/g et PBL/C17/2/1/3112. En revanche, au niveau de la microstructure (Tableau 27) PBL/B17/2/1/3303/g, PBL/C17/2/1/3112 et PBL/DD14/1/1/7108 sont proches avec la présence de grains de quartz (SiO_2), de rutile (TiO_2), d'oxydes de fer et de feldspaths potassiques, disséminés dans la fraction argileuse (Figure 94). Les différents minéraux ont été

identifiés via les mêmes caractéristiques que celles décrites pour les creusets de PBL et TNN. PBL/A5/159/367 possède une microstructure similaire (composition et forme des cristaux) à celle observée pour les fragments de creusets (Figure 94). De plus, il s'agit du seul échantillon pour lequel de la balle de riz a été identifiée.

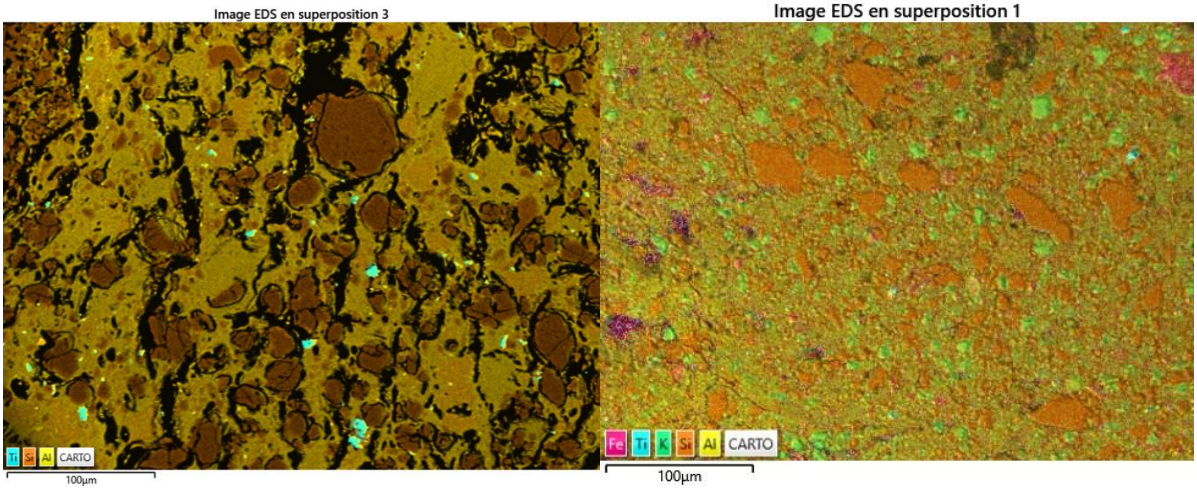


Figure 94 : Cartographie des rayons X au MEB-EDS de l'échantillon PBL/A5/367/159 (à gauche) avec une microstructure similaire aux fragments de creusets et de l'échantillon PBL/B17/3303/g (à droite).

Si on regarde maintenant la composition moyenne des quatre échantillons, on voit qu'elle est comparable (Figure 95) avec une argile non calcaire riche en alumine, comme dans le cas des creusets. En revanche, on remarque que le taux en oxyde de fer détecté dans la pâte est plus élevé pour les échantillons dont la microstructure diffère de celle des creusets avec environs 7 %mass. Ce taux plus élevé en oxyde de fer provient de la présence plus abondante de ces minéraux dans la pâte.

La zone de vitrification identifiée pour deux échantillons (PBL/A5/367/159 et PBL/DD14/1/1/7108) se compose en majorité de verre, avec des oxydes de fer néoformés, cristallisés en polyèdres et en dendrites (Figure 96). Le taux en cuivre détecté est de 4 %mass. pour PBL/A5/367/159 et 16 %mass. pour PBL/DD14/1/1/7108.

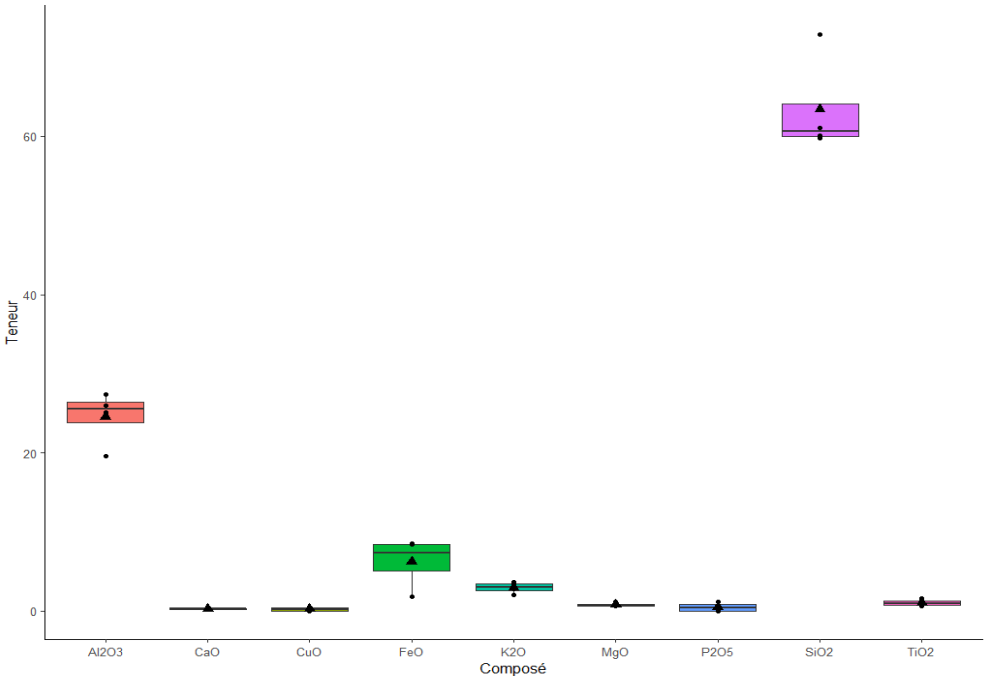


Figure 95 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) pour les autres types de céramiques techniques du corpus (n=4). Données obtenues pour chaque échantillon après moyenne sur différentes zones d'analyses au MEB-EDS. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé.

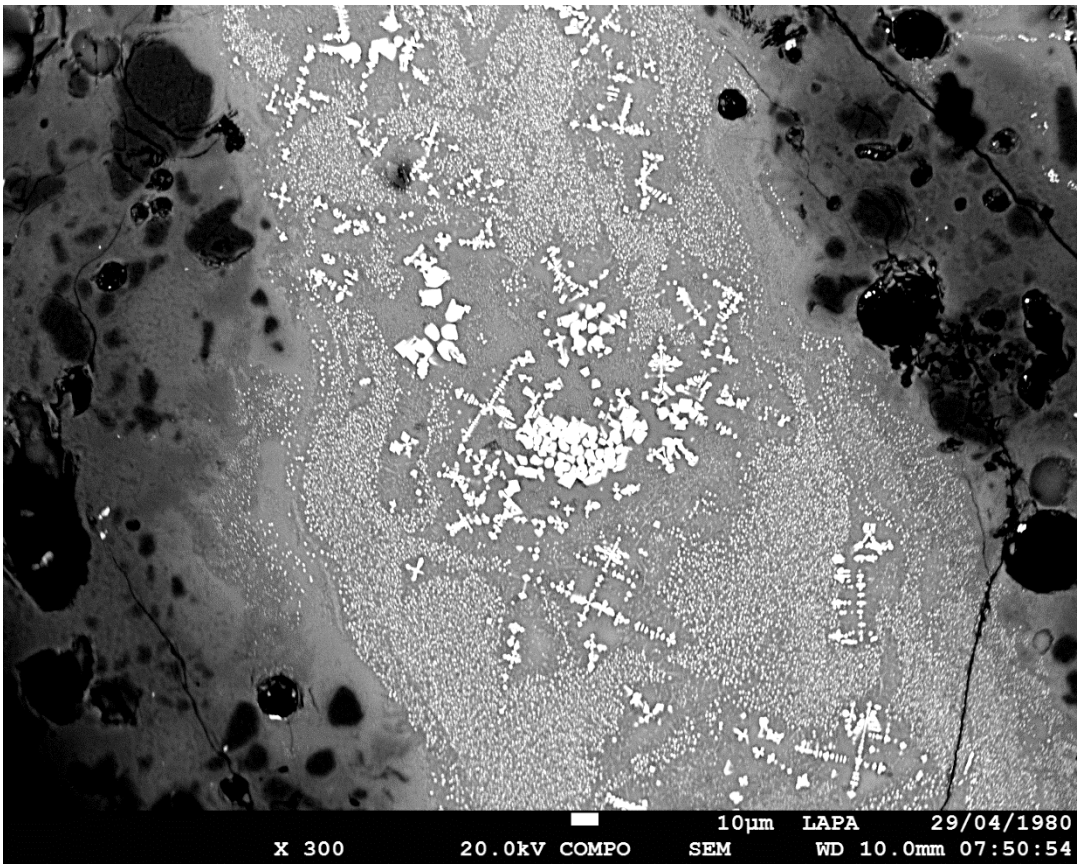


Figure 96 : Image au MEB en BSE montrant la zone vitreuse où des oxydes de fer ont été identifiés pour l'échantillon PBL/A5/367/159.

Les traces d'une chauffe, d'une zone vitrifiée et d'un taux de cuivre significatifs nous permettent de dire que les échantillons PBL/A5/367/159 et PBL/DD14/1/1/7108 sont associés à une étape du procédé métallurgique. Leur forme n'a pas permis de déterminer leur usage, mais ils pourraient être des éléments de maintien ou de chemisage de fosse durant l'opération. En revanche, pour les deux autres, l'association est moins certaine. Certes, l'argile a été chauffée et sa présence à *Puen Baolo* associée à d'autres éléments de la chaine opératoire, comme les scories et les creusets, pourrait nous le laisser penser, mais aucune indication analytique ne vient confirmer que les échantillons ont été employés pour la métallurgie.

Concernant le fragment de moule, une analyse en XRF du dépôt interne de ce potentiel moule révèle la présence de cuivre en dessous de 1%mass., qui pourrait donc signifier l'association de ce fragment à un moule pour la fonte de lingot de cuivre.

V.2.4. Bilan

L'étude macroscopique et microscopique des creusets de PBL et TNN démontre qu'ils ont été utilisés durant une étape du procédé métallurgique, étant donné les traces de chauffe et la présence d'une couche de scorie interne, signant leur utilisation. La forme des creusets semble assez standard, ouverte avec un fond convexe plein et des bords supérieurs non recourbés. En revanche, leurs dimensions semblent varier, notamment les diamètres entre 50 et 150 mm. La forme semble donc standardisée, cependant les dimensions ne le sont pas. La standardisation n'est alors que partielle : pourrait-elle dénoter différentes utilisations ?

Les analyses ont montré que la composition de la pâte était globalement standard pour tous les creusets, avec une forte part d'inclusions de quartz, ainsi que d'inclusions mineures comme le rutile, le zircon ou des oxydes de fer, dispersés dans une fraction argileuse non calcaire riche en minéraux alumineux et pauvre en fer. Il est connu que la présence d'alumine augmente la qualité réfractaire (capacité de résistance à des matériaux agressifs chimiquement) d'une céramique, alors que la présence de composés comme le calcium, le sodium ou encore le potassium la font décroitre (Martinon-Torres et Rehren, 2014). En ce sens, la part d'alumine est ici relativement élevée, accompagnée d'une forte présence de silice, à la fois dans la part argileuse et sous forme d'inclusions de quartz, alors que les autres composés ont des teneurs moyennes inférieures à 2 %mass. La silice possède également des propriétés réfractaires.

En revanche, cette céramique ne peut pas être qualifiée de réfractaire. En effet, le mélange contenu dans le creuset a entraîné une réaction avec la pâte céramique se matérialisant par la présence plus ou moins importante d'une zone vitrifiée et de scories. Cependant, les propriétés de ces creusets s'avèrent satisfaisantes pour la réalisation de l'opération métallurgique. Bien que les fragments de creusets soient globalement altérés, pas seulement

par la chauffe, mais également par l'enfouissement, leurs propriétés semblent adaptées pour une étape haute température et ont permis leur maintien lors de l'opération. La présence de la couche de scorie adhérente et d'une zone vitrifiée à l'interface entre la scorie et la pâte céramique montre que le creuset a réagi avec la charge. La qualité réfractaire du creuset n'était donc pas suffisamment élevée pour empêcher cette interaction, mais devait être suffisante afin d'aboutir au résultat souhaité durant l'étape pyrométallurgique, dans le sens où les fragments n'apparaissent tout de même pas entièrement détruits à la suite de la chauffe. La dénomination réfractaire n'est pas ici à prendre dans le sens de la définition moderne qui s'applique à des céramiques capables au moins de résister à 1580 °C (I. C. Freestone, 1989).

La teneur des trois principaux composés de la pâte des creusets de Vilabouly reportée dans le diagramme ternaire FeO-SiO_2-AL_2O_3 se retrouve dans le domaine de la mullite avec des températures minimums de liquidus de 1500-1600°C. La pâte ne semble pas composée de mullite, d'après les observations en microscopie, et il semble peu probable que des températures si élevées aient été atteintes. Si on regarde maintenant les teneurs des scories, celles de type fayalitique donnent des températures minimums de 1100°C-1200°C à l'intérieur du creuset. Des reconstitutions expérimentales ont montré que les argiles communes peuvent supporter des températures jusqu'à 1100°C sans fondre, mais peu au-dessus. Un des défis du procédé métallurgique est d'atteindre les températures suffisantes à l'opération, mais un autre, encore plus nécessaire, est de les maintenir suffisamment longtemps pour avoir les réactions souhaitées. Lors des débuts de la métallurgie, les argiles qu'on nomme réfractaires, dans le sens moderne de la définition, n'étaient que peu employées, car l'utilisation des argiles communes, souvent locales, auxquelles pouvait être ajouté un dégraissant et associées à de fines parois, était suffisante pour l'usage voulu. C'est ce qu'on observe ici pour Vilabouly.

Un dégraissant organique, la balle de riz, a été ajouté à la majorité de la pâte des creusets analysés. L'ajout volontaire de ce dégraissant marque une transformation voulue des propriétés mécaniques des creusets, afin d'augmenter leur tenue durant l'opération haute température. L'ajout de dégraissant organique va permettre de renforcer la céramique en évitant les cassures, par la création d'espace vide lors de la chauffe (I. C. Freestone, 1989).

Dans une étude de 1986, Freestone et Tite ont analysé des creusets de la période romaine et des débuts du Moyen Âge provenant de Londres, pour lesquels une composition proche des creusets de Vilabouly a pu être déterminée. Des expérimentations de rechauffe ont été réalisées. Elles ont permis de déterminer une température moyenne de 1200°C contenue par ce type de creusets (I. C. Freestone et M. S. Tite, 1986)

La couche scoriacée est identifiée pour tous les fragments où la partie interne du creuset est préservée. Leur analyse permet de révéler certaines différences. D'une part, dans la composition globale entre les scories de PBL et TNN, avec des taux de MnO et ZnO plus élevés pour TNN, signant peut-être des compositions de charge différentes. À confirmer dans la suite de l'étude. D'autre part, deux types de scories ont pu être définis à la suite des résultats : des scories de type fayalitique, contenant des olivines ferreuses et des spinelles dans une phase vitreuse, ainsi que des inclusions métalliques de cuivre et de sulfures de cuivre. Alors que le second regroupe des scories à dominance de verre, riche en cuivre. Pour PBL, chaque type de scorie représente environ la moitié des creusets analysés, alors que TNN correspond en grande partie au type des scories vitreuses (une exception).

La différence observée entre ces scories pourrait signifier deux choses : d'une part, deux utilisations différentes (affinage et réduction ?), ou d'autre part une variabilité des types de charges/conditions utilisées, et tout particulièrement dans les taux en fer. Les variations dans la composition des creusets peuvent être induites par deux facteurs principaux : l'apport en oxygène, la température, la vitesse de refroidissement dans un premier temps et dans un second temps par les variations dans la charge (F. W. Rademakers, 2015, p.420; F. W. Rademakers et T. Rehren, 2016). On a vu que les scories vitreuses riches en cuivre impliquaient des conditions plus oxydantes, menant à la perte d'une part de cuivre métallique plus importante dans la scorie, à relier donc directement aux conditions lors du processus. De plus, on a vu que les taux de fer devaient être plus élevés dans le cas des scories de type fayalitique pour que la cristallisation des olivines ferreuses apparaisse. Cela pourrait donc dénoter une variation dans les taux de fer présent dans la charge originelle. De plus, les taux de fer dans la pâte sont généralement inférieurs à 5 %mass. La source de fer ne peut donc pas provenir de la céramique et vient forcément d'un ajout externe.

Si on prend maintenant l'hypothèse d'une utilisation différente des creusets, par exemple dans le cas d'un affinage (scorie vitreuse) et d'une réduction (scorie fayalitique), le taux en fer de la charge originelle apparaîtrait normalement plus bas lors d'un procédé ayant pour but de réduire le taux de fer parfois élevé (et des impuretés) dans un cuivre déjà réduit (A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003; T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016). Cette utilisation d'un cuivre riche en fer durant l'affinage pourrait expliquer la présence des scories vitreuses de plus faible épaisseur, et riche en cuivre, mais avec un taux en fer tout de même supérieur à celui de la pâte céramique. De plus, l'affinage nécessite des conditions plus oxydantes, ce qui semble également être le cas pour les scories vitreuses avec un taux en oxyde de cuivre élevé.

Or, les rapports Al_2O_3/SiO_2 ont également permis de montrer que les scories vitreuses et les scories fayalitique possèdent des rapports proches, diffèrent également de ceux de la pâte des creusets, cela montre alors une contribution de la charge à la formation des scories. Les rapports similaires entre scories vitreuses et scories fayalitiques montrent également que ces deux types de scories peuvent provenir de la même étape du procédé. Ces résultats semblent alors confirmer la première hypothèse, celle d'une variation de charge et/ou des conditions, particulièrement pour les taux en oxyde de fer. Nous verrons que cette hypothèse va venir rejoindre les résultats sur les scories macroscopiques du corpus.

De plus, les variations entre les deux types de scories peuvent également être reliées à leur emplacement dans le creuset. En effet, les conditions et la chauffe étant très variables dans un creuset (F. W. Rademakers, 2015; F. W. Rademakers et T. Rehren, 2016) cela pourrait également expliquer certaines des différences observées. Notamment pour les scories vitreuses qui semblent correspondre à des conditions plus oxydantes. Ces conditions plus oxydantes pourraient être attendues dans la partie haute du creuset, à la lèvre. L'état fragmentaire de certains creusets n'a pas permis de vérifier cette hypothèse, mais elle reste probable.

Une corrélation entre forme/dimensions et type de résidus scoriacés a été tentée. À priori, aucun lien n'existe entre type de scorie et dimension des creusets, bien que les creusets soient très fragmentaires et ne permettent pas dans certains cas de proposer une reconstitution de leur forme/dimension d'origine, tout particulièrement pour les fragments de TNN.

L'épaisseur de la couche de scorie, ainsi que la morphologie des creusets pourraient laisser penser que le mélange contenu était coulé après l'étape haute température. Les creusets étant des vaisselles portables, leur utilisation facilite grandement cette opération. Nous verrons dans la suite de l'étude que l'hypothèse de la coulée directe est renforcée par d'autres types de produits. De plus, quatre creusets complets ont été mis au jour à PBL, dont trois possèdent un bec de coulée, ce qui viendrait renforcer cette hypothèse (Figure 97). Ces creusets ont été retrouvés hors contexte de fouille et doivent donc être interprétés avec précaution. Leur dimension et leur forme semblent tout de même se corréler avec les observations faites sur les fragments de creusets des niveaux archéologiques. Parmi les creusets entiers découverts hors fouille, on peut distinguer deux types : un premier composé de creusets avec un bec de coulée, un diamètre en moyenne de 100 mm et une hauteur de 50 mm, et un second avec un creuset de plus larges dimensions, 150 mm et diamètre et 80 mm de hauteur, sans bec de coulée.

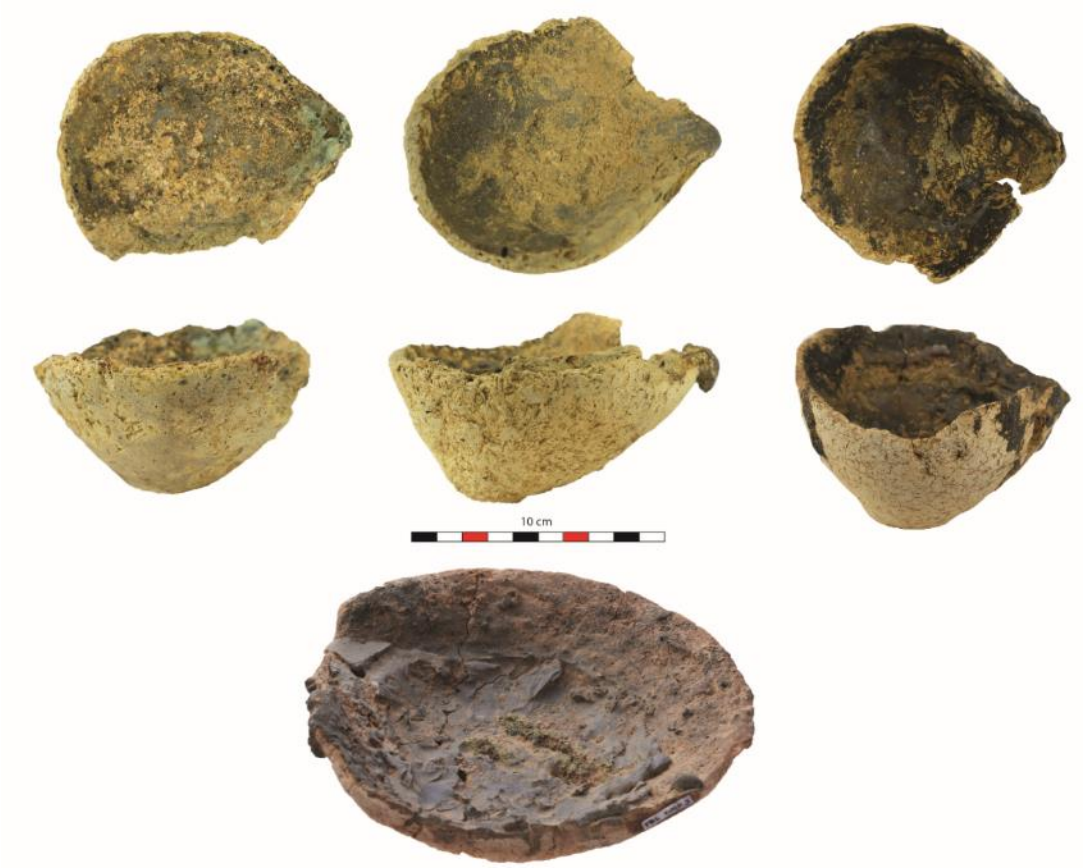


Figure 97 : Les quatre exemples de creusets entiers découverts hors contexte à Puen Baolo.

Hormis les creusets et quelques potentiels revêtements de fosse, aucun autre type de céramique technique n'a été mis en évidence à Vilabouly, et plus particulièrement, aucune trace de tuyère ou de dispositif d'apport en air. Nous verrons par la suite qu'un apport en air forcé est pourtant à privilégier compte tenu des types de sous-produits obtenus. L'étude des creusets n'a pas permis de révéler d'informations sur cette source d'apport en air. Leur nature fragmentaire ne permet pas de distinguer une orientation particulière du dispositif, comme cela peut être possible dans certains cas. En effet, l'altération plus importante d'une partie du creuset peut signifier que l'apport en air y était plus important, et donc qu'une tuyère pouvait être présente, orientée principalement sur un côté (E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010).

En ce qui concerne la source de la matière argileuse, l'étude des principaux éléments traces pour PBL et TNN ne montre pas d'homogénéité dans la composition chimique, ce qui pourrait signifier l'utilisation de sources variées, mais de même nature. Si on compare les données de TNN et PBL (Figure 98), les teneurs en éléments traces se situent dans le même domaine, mais encore une fois, les résultats sont très dispersés, ce qui empêche une hypothèse sur la/les sources d'argile. De plus, des prospections au Complexe de Vilabouly seraient nécessaires afin de collecter des échantillons d'argile et d'identifier les potentielles sources.

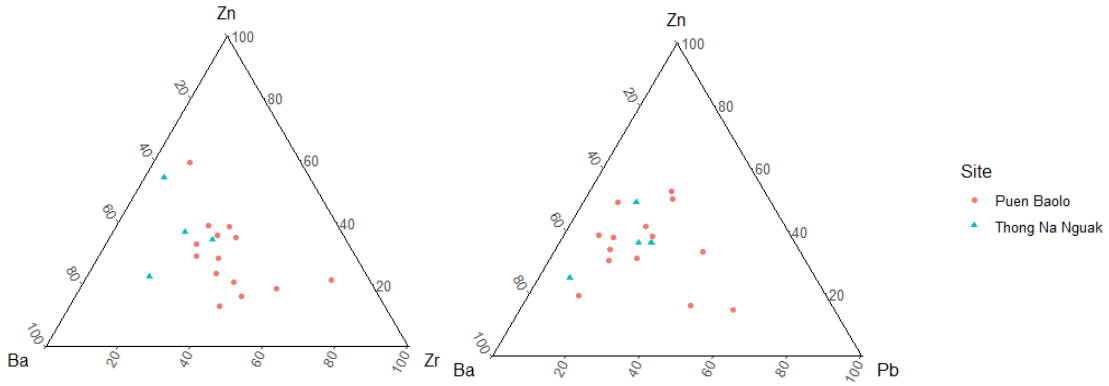


Figure 98 : Diagramme ternaire comparant les teneurs des éléments traces principaux de la pâte des creusets de PBL et TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

En tout état de cause, ces creusets ont été utilisés seulement pour la production du cuivre et non pour un alliage, car aucune trace d'étain, de plomb ou autre élément d'alliage n'a été identifié. Les creusets analysés ici entreraient donc en jeu lors de la production du cuivre seule : la réduction (peut-être l'affinage) et également dans le cadre de la fonderie.

V.3. Les scories

Les scories représentent la majorité du corpus du Complexe de Vilabouly. Comme décrit au Chapitre IV, 132 ont été sélectionnées pour analyses des éléments majeurs, mineurs et traces au CRPG. De ces 132 scories, 15 proviennent du site de TNN et 117 du site de PBL. Les données complètes sont présentées en Annexe 3. Par le biais de ces résultats, une sous-sélection de 56 scories a été faite via un traitement statistique (ACP et CAH, voir chapitre V) pour observation au microscope optique et au MEB-EDS, des différentes phases et de leur composition élémentaire.

V.3.1. Morphologie

Les données macroscopiques pour les 56 scories sélectionnées pour analyses sont présentées dans le Tableau 29. La totalité des données pour les 132 scories se retrouve en Annexe 3. Les scories du Complexe de Vilabouly sont dans la majorité fragmentaire, donc non indicative de leur taille d'origine, pour la plupart avec une longueur inférieure à 50 mm. L'aspect fragmentaire des scories pourrait signifier que les métallurgistes de Vilabouly les brisaient afin de récupérer le cuivre métallique. Une seconde hypothèse serait un concassage dans le but de réutiliser certaines scories, par exemple comme fondant, durant une autre réduction. Une étude ethnographique réalisée par Anfinset (2011) sur un procédé métallurgique encore utilisé au Népal montre une réduction continue en plusieurs étapes où les scories d'une première réduction sont utilisées dans la seconde. Bien qu'aucune scorie de type *schlackensand*, dit sable de scorie (H. G. Bachmann, 1982; B. Metten, 2003), signe de leur concassage, n'ait été identifiée à Vilabouly, cette option reste tout de même à considérer. Quelques rares exemples sont plus volumineux, comme la scorie PBL/G15/3/4/7316/7309

avec une longueur de presque 80 mm, qui est pourtant également fragmentée (Figure 99), donc indicative de dimensions plus larges. Il n'a pas été possible de remonter à leur taille d'origine. Leur couleur est majoritairement noire, parfois marron/verdâtre, signe de la présence de composés d'altérations cuivreux.



Figure 99 : Scorie PBL/G15/3/4/7316/7309.

Les scories du Complexe de Vilabouly ont été divisées en trois grands types basés sur leurs caractéristiques macroscopiques (Figure 100) :

-la première catégorie regroupe des scories dites *plates*, qui sont majoritaires dans tout l'assemblage. 47 scories ont été sélectionnées dans cette catégorie. Ces scories se caractérisent par une faible épaisseur (jusqu'à 5 mm), une forte homogénéité et densité. Elles présentent des surfaces supérieures lisses avec pour certaines des textures dites en peau de lait (H. G. Bachmann, 1982; D. Bourgarit et al., 2010; A. Addis et al., 2016). Leur morphologie est souvent perçue comme provenant d'une solidification rapide au-dessus d'un autre liquide en fusion ;

-La seconde catégorie regroupe des scories dites *massives*, 37 scories au total. Ces scories possèdent les mêmes caractéristiques générales que les scories plates, à l'exception d'une plus large épaisseur, de 5 à 18 mm, avec des surfaces moins lisses ;

-La dernière catégorie regroupe des scories qualifiées de *grossières*, 53 au total. Elles n'ont pas de forme régulière, apparaissent souvent grumeleuses et plus hétérogènes en extérieur. Les scories de *Thong Na Nguak* correspondent en majorité à ce type.



Figure 100 : Les différents types de scories identifiés dans le corpus de Vilabouly, de gauche à droite : scorie massive, scorie plate et scorie grossière.

Certaines scories possèdent un de leur côté arrondi (quatre échantillons), empreinte du contenant/dépression dans lequel elles ont solidifié. Le diamètre de ces scories a pu être estimé à environ 50 mm et nous pourrons voir que cette dimension trouve des correspondances avec d'autres types d'objets de l'assemblage développés en partie V.4.

Il ne semble pas y avoir de corrélation entre les types de scories et la stratigraphie du site, au meilleur de nos connaissances, notamment à *Puen Baolo* d'où est issue la majorité. Tous les types de scories se retrouvent associés dans les mêmes contextes (Tableau 28), ce qui pourrait montrer leur appartenance à la même chaine opératoire sans variation chronologique majeure. Cela est ensuite confirmé par la composition minéralogique et élémentaire.

Niveau	*Grossière*	*Plate*	*Massive*
1	10	11	10
2	14	12	8
3	11	11	8
4	1	3	0

Tableau 28 : Présence des types de scories en fonction des niveaux archéologiques.

Pour huit scories, la présence de résidus de céramique ou de sols, probablement de creuset, peut être remarquée dans leur partie inférieure (Figure 101) signe qu'elles ont, à un moment donné, dut y être associées. La présence de ces résidus pourrait aussi être due à un détachement d'un fragment de céramique/sol durant l'opération. Ils seraient ensuite tombés dans la scorie liquide, piégés lors de la solidification. Certains fragments comme ceux de la figure 101 semblent correspondre à des fonds de creusets. Ils pourraient être le produit d'une charge impure et/ou d'une mauvaise opération.



Figure 101 : Exemples de scories associées à une couche résiduelle de céramique ou de sol dans leur partie inférieure.

Sur la partie inférieure d'une scorie (PBL/C17/1/1/3117/a), une empreinte allongée semble pouvoir correspondre à l'empreinte laissée par un outil (Figure 102). Cet outil aurait pu avoir été employé afin d'extraire la scorie de son contenant. On peut distinguer une autre alternative. La scorie liquide aurait pu être retirée de son contenant de réduction, puis avoir solidifié sur un morceau de bois/bambou, au sol.



Figure 102 : Echantillon PBL/C17/1/1/3117/a comportant la potentielle empreinte d'outil.

Bien que les scories du Complexe de Vilabouly aient été séparées en plusieurs types, basés sur leurs caractéristiques macroscopiques, elles se regroupent également par de nombreux aspects. En section, elles se composent d'une phase dense et homogène, signe de l'atteinte d'un état liquide. Hormis pour certaines scories grossières, très peu d'inclusions de minéraux

n'ayant pas réagi sont visibles à l'œil nu. Pour certaines scories, du cuivre métallique résiduel peut être détecté également par son aspect brillant, mais sporadiquement.

Échantillon	Unité	Niveau	Masse (g)	Longueur (cm)	Épaisseur (cm)	Céramique/sol	Type
PBL_A15_3_1_6705_a	A15	3	25	3,4	1,2	Non	massive
PBL_AA15_2_2_6803_b	AA15	2	2	2,5	0,3	Non	plate
PBL_AA15_2_3_6811_b	AA15	2	20	3	0,6	Non	massive
PBL_AA15_3_1_6808_b	AA15	3	10	1,7	1,3	Oui(sol?)	grossière
PBL_AA15_3_1_6808_d	AA15	3	10	1,9	0,7	Oui(sol?)	massive
PBL_AA15_3_1_6808_e	AA15	3	5	2,3	0,3	Non	plate
PBL_B14_1_1_7001_c	B14	1	4	1,8	0,3	Non	plate
PBL_B14_1_2_7002_b	B14	1	14	3,5	0,6	Non	plate
PBL_B17_1_1_3301_b	B17	1	22	3	1,2	Non	massive
PBL_B17_2_1_3303_d	B17	2	2	1,8	0,3	Non	plate
PBL_B17_2_1_3303_i	B17	2	11	3,5	0,4	Non	plate
PBL_B17_3_1_3312_c	B17	3	1	1,9	1	Non	grossière
PBL_C14_1_4_7205_a	C14	1	18	3,5	2	Non	grossière
C14_1_4_7205_c	C14	1	4	2,5	0,5	Non	plate
C14_2_1_7209_b	C14	2	8	2,2	0,6	Oui(ceram)	massive
PBL_C14_2_3_7219_a	C14	2	7	2,8	0,7	Non	massive
PBL_C14_2_3_7219_c	C14	2	3	2,2	0,2	Non	plate
PBL_C16_3503_a	C16		45	4,5	0,7	Oui(Ceram)	grossière
PBL_C16_3503_b	C16		8	2,5	0,3	Non	plate
PBL_C16_GENSPIT_3501_a	C16		7	2,7	0,2		plate
PBL_C17_1_1_3117_a	C17	1	55	5,5	0,9	Non	massive
PBL_C17_1_1_3117_b	C17	1	10	2,5	1	Non	massive
PBL_C17_1_1_3117_c	C17	1	10	5	2	Non	grossière
PBL_C17_1_2_a	C17	1	80	4,5	2	Non	grossière
PBL_C17_1_2_d	C17	1	8	2,5	0,4	Non	plate
PBL_C17_2_1_3107_b	C17	2	72	4,7	0,5	Oui(?)	massive
PBL_C17_2_1_3107_e	C17	2	2	1,5	1	Non	grossière
PBL_CC14_3_7116_a	CC14	3	12	3,2	0,4	Non	plate
PBL_CC14_3_7116_c	CC14	3	35	3	1,8	Oui(ceram)	massive
PBL_CC14_3_7116_g	CC14	3	3	2	0,8	Non	grossière
PBL_D10_1_1_2004	D10	1	118	5,5	2,9	Oui(sol?)	grossière
PBL_D13_3729_1709	D13		76	4,8	2,6	Oui(ceram)	grossière
PBL_E15_2_2_3218_b	E15	2	8	2,5	1,4	Non	grossière
PBL_E15_2_2_3218_c	E15	2	11	2,3	1,5	Non	grossière
PBL_E15_2_2_3218_e	E15	2	12	3	0,4	Non	plate
PBL_E15_3_1_3277_b	E15	3	2	2	0,7	Non	grossière
PBL_G15_1_3_7304_c	G15	1	45	4,5	0,6	Non	massive
PBL_G15_2_2_7305_b	G15	2	3	2,9	0,4	Non	plate
PBL_G15_2_2_7305_h	G15	2	12	3	1,2	Non	grossière
PBL_G15_3_1_7309_a	G15	3	6	2,5	0,2	Non	plate
PBL_G15_3_4_7316_7309	G15	3	75	7,7	1,5	Non	plate?
PBL_S9_2_2_5505_b	S9	2	4	1,5	1,3	Non	grossière

PBL_S9_2_2_5508	S9	2	4	2,5	1,5	Non	grossière
TNN_1_2_2_43	DF		10	2,5	1,2	Non	grossière
TNN_1_A_2_40	DF		4	2	1,2	Non	grossière
TNN_1_A_4_165_b	DF		28	3	1,7	Non	grossière
TNN_1_A_4_133	DF		3	1,4	0,3	Non	plate
TNN_1_A_4_165_a	DF		15	4	1,3	Non	grossière
TNN_1_A_138_a	DF		31	3	2,5	Non	grossière
TNN_1_A_138_b	DF		3	2,5	1	Non	grossière
TNN_1_B_2_42	DF		28	3,5	1,6	Non	grossière
TNN_1_B_3_93_a	DF		5	2,6	0,3	Non	plate
TNN_1_B_3_93_b	DF		5	2	1	Non	grossière
TNN_1_C_3_8_c	DF		4	2	1,5	Non	grossière
TNN_1_D_3_99	DF		34	3,5	2,3	Non	grossière
TNN_1_E_2_39	DF		1		0,2		plate

Tableau 29 : Caractéristique macroscopique des 56 scories sélectionnées pour analyses aux MO et MEB-EDS.

V.3.2. Composition élémentaire

La composition élémentaire globale des 122 scories de Puen Baolo et des 15 de Thong Na Nguak a été obtenue par analyses des éléments majeurs, mineurs et traces par ICP-MS et ICP-OES (voir partie IV.4). Les données sont présentées en Annexe 3.

1. Puen Baolo

Les 122 scories de Puen Baolo ont une composition moyenne de FeO (61,9 %mass.), SiO_2 (26,3 %mass.) et Al_2O_3 (4,9 %mass.) pour les oxydes majeurs avec peu de variations (Figure 103). Les coefficients de variation calculés indiquent 12% pour FeO, 20% pour SiO_2 et 26% pour Al_2O_3 (Tableau 30), suggérant que les composés majeurs de la charge de réduction utilisée étaient relativement stables. Les trois oxydes principaux représentant 90% de la composition totale. La composition des scories de PBL a donc pu être placée dans un diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 (Figure 104). On remarque que la grande majorité des scories tombe proche des deux vallées eutectiques de la fayalite, avec un groupe plus proche de l'optimum 2 à 1148 °C, défini par Th. Rehren. et consorts (T. Rehren et al., 2007; M. F. Charlton et al., 2010) comme facilitant la fusion. La grande majorité des scories de PBL peut donc être perçue comme de type fayalitique. Seuls 10 échantillons se trouvent en dehors du champ de la fayalite, dont un beaucoup plus riche en silice (PBL/G15/1/3/7304/b, PBL/G15/2/2/7305/b, PBL/G15/2/2/7305/f, PBL/E15/1/2/3204/c, PBL/C17/2/1/3107/c, PBL/E15/3/1/3277/b, PBL/E15/2/2/3218/b, PBL/C17/1/1/3117/b, PBL/AA15/4/2/6822/a, PBL/AA15/4/3/6826).

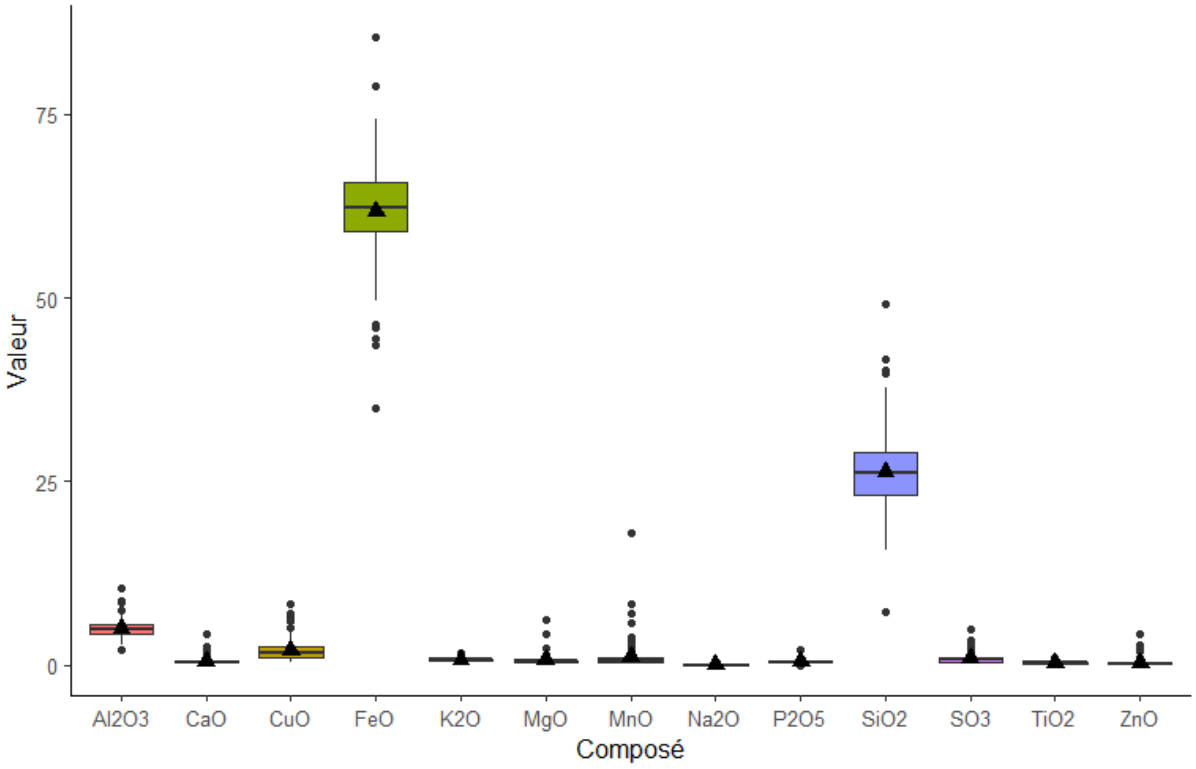


Figure 103 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) globales des scories de PBL (n=117) obtenues par ICP-OES et ICP-MS. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé.

	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CuO	ZnO	SO_3	BaO
CV	20%	26%	12%	182%	104%	106%	149%	40%	39%	58%	71%	161%	81%	353%

Tableau 30 : Coefficients de variations pour chaque composé présent dans les scories de PBL (ICP-OES et ICP-MS).

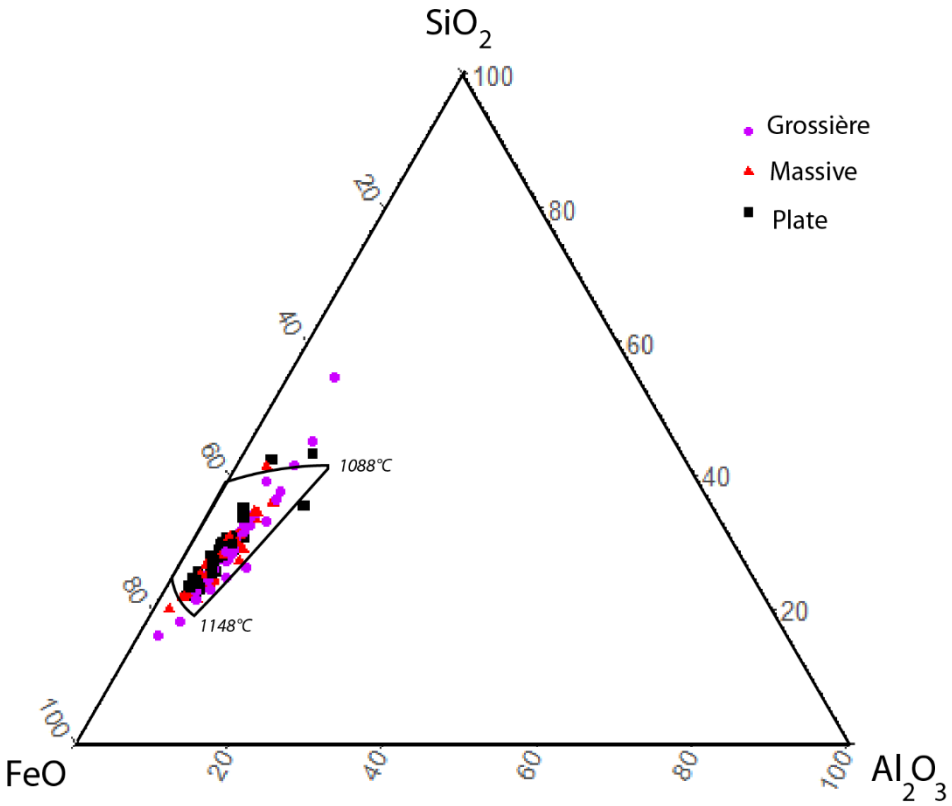


Figure 104 : Diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 des composés majeurs des scories de PBL avec le domaine de la fayalite (modifié d'après Rehren et al, 2007). Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

Les variations de composition les plus importantes sont observées par les fluctuations entre FeO et SiO_2 (Figure 105). Si on regarde le coefficient de corrélation de ces deux oxydes; SiO_2 et FeO sont corrélés négativement (R^2 = 0,700), suggérant que plus le taux en fer se retrouve élevé dans le système plus le taux de silice décroit, et inversement. Cette variation peut révéler une fluctuation dans la quantité de ces deux composés dans la charge d'origine. Cette observation rejoint également celle des scories adhérentes au creuset pour lesquelles on avait pu également observer ces mêmes variations en oxyde de fer. Cela pourrait donc signifier que ce composé est variable dans la charge d'origine. En revanche, même si ces variations sont présentes, elles permettent tout de même d'obtenir des scories de type fayalitique, signifiant que les variations ne mènent pas à la production de scories hétérogènes, avec forte variation de composition. Elles sont donc minimes sur les résultats.

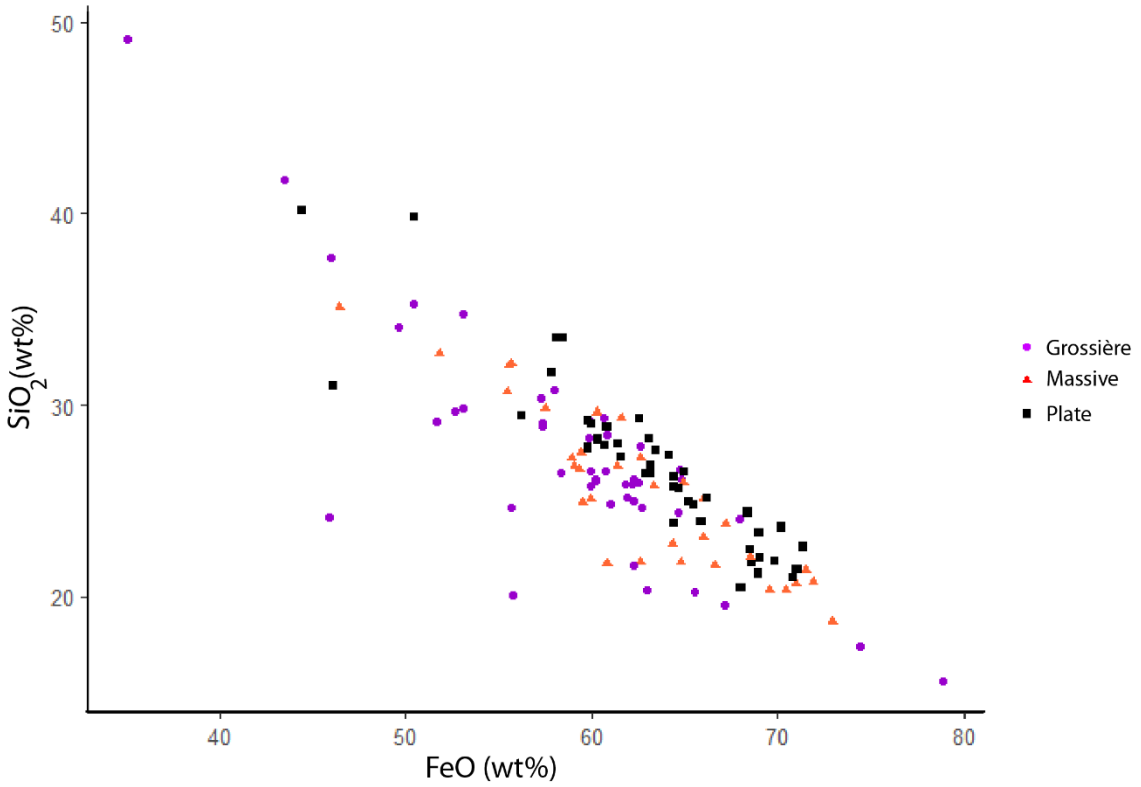


Figure 105 : Diagramme binaire représentant les teneurs (%mass.) en FeO et SiO_2 des scories de Puen Baolo. Données obtenues par ICP-MS et ICP-OES.

SiO_2 et Al_2O_3 sont en revanche corrélés (Figure 106), alors que Al_2O_3 est corrélé négativement avec FeO. Une partie de l'alumine et de la silice pourraient donc avoir intégrée le système via la même source. En revanche, l'oxyde de fer ne semble corrélé avec aucun autre composé.

La variation dans la charge et la sélection des minerais peut s'appréhender au travers de ratios d'oxydes, particulièrement Al_2O_3/SiO_2 (Charlton et al, 2009). Dans le cas des creusets et des scories adhérentes au creuset, le rapport Al_2O_3/SiO_2 s'est révélé différent, montrant alors une plus forte contribution de la charge à la formation des scories. Ici, les rapports Al_2O_3/SiO_2 des scories macroscopiques du corpus sont différents de ceux des scories adhérentes et de la pâte des creusets (Figure 107), confirmant ainsi la faible contribution de la pâte des creusets à la formation des scories macroscopiques et le rôle majeur joué par la charge.

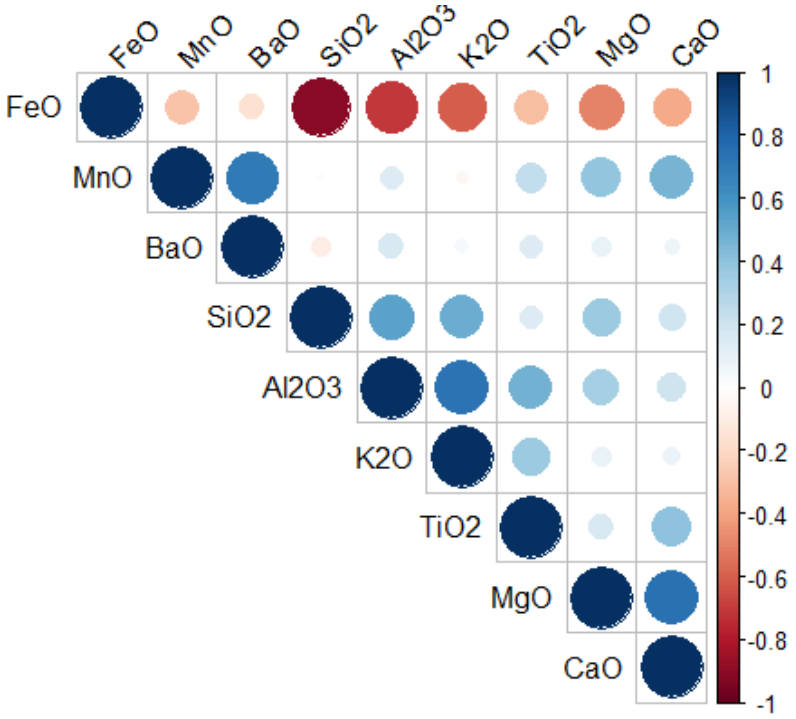


Figure 106 : Matrice de corrélation entre les composés majeurs et mineurs des scories macroscopiques de PBL. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

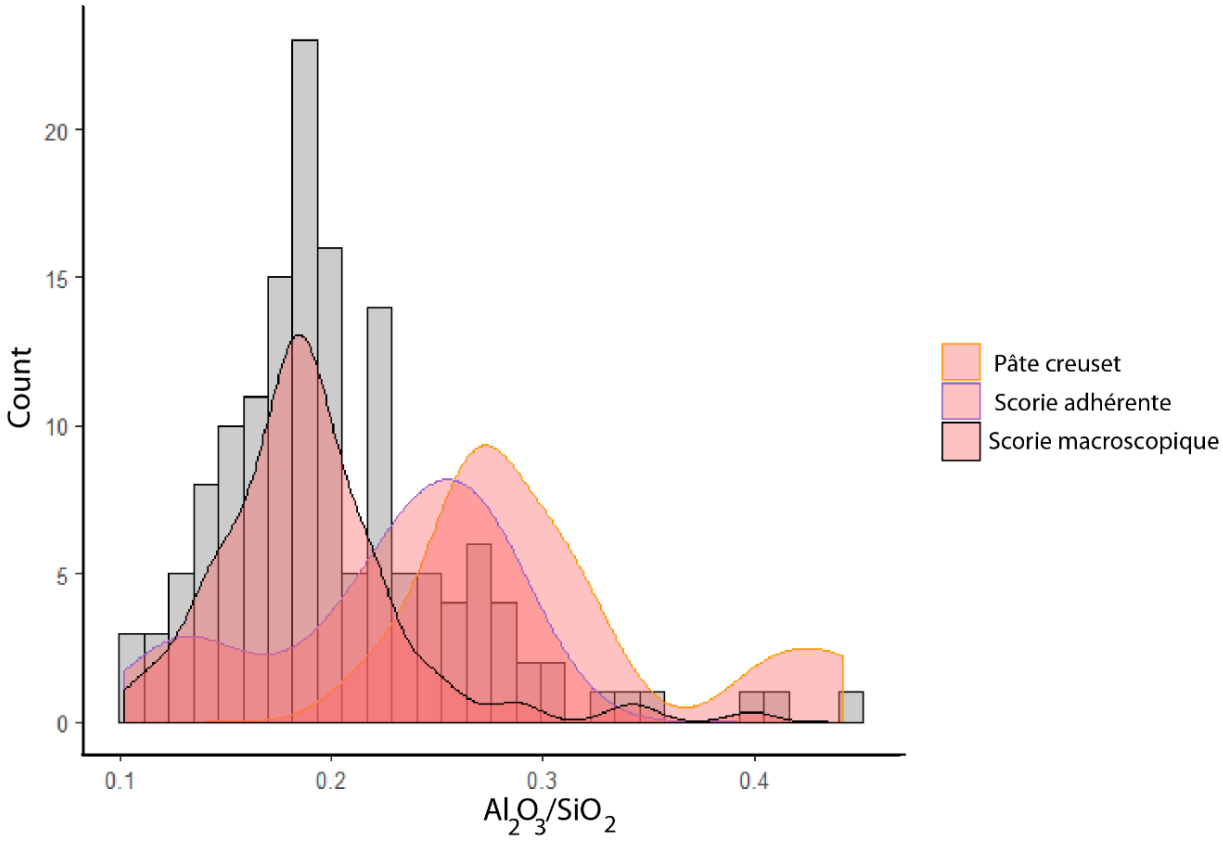


Figure 107 : Histogramme représentant la distribution des rapports Al_2O_3/SiO_2 par rapport aux scories macroscopiques, aux scories adhérentes aux creusets et la pâte céramique. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.).

On trouve ensuite des oxydes mineurs, CaO (0,5 %mass.), MgO (0,6 %mass.), K_2O (0,7 %mass.), MnO (1,1 %mass.), P_2O_5 (0,4 %mass.) et TiO_2 (0,3 %mass.). Le taux en oxyde de calcium bas signifie que la gangue des minerais utilisés est principalement constituée de minéraux non calcaires, ou que les minerais ont été préparés pour enlever une partie de la gangue. Les taux d'oxydes de calcium bas trouvent un écho dans leur faible teneur détectée pour les creusets, avec une pâte composée d'argile non calcaire.

Si on regarde la composition en oxydes majeurs en fonction des types de scories, aucune variation ne semble être induite par le type de scorie définie (Figure 104). Tous les types de scories pourraient donc provenir du même procédé. Cela peut être représentatif d'un procédé en une étape.

Le cuivre et le soufre résiduel moyen des scories de Puen Baolo est de Cu (1,6 %mass.) et S (0,3 %mass.), avec des coefficients de variation entre 70 et 80 %. Le taux de cuivre résiduel moyenné est bas indiquant un procédé efficace dans la récupération du cuivre métallique, avec une quantité maximum de cuivre résiduel à 8,2 %mass. (PBL/C16/GENSPIT/3501/b). Les taux en cuivre et en soufre ne sont pas corrélés (Figure 108), ce qui pourrait signifier l'incorporation variable de minéraux contenant des sulfures dans la charge.

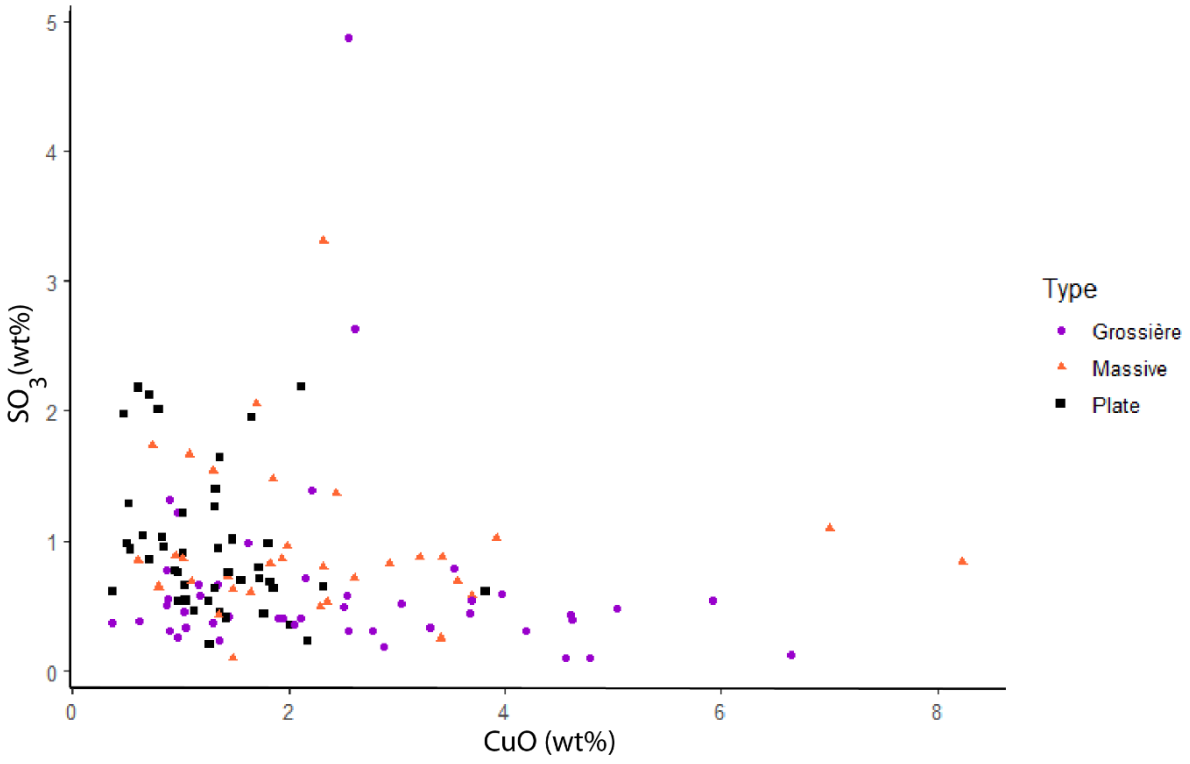
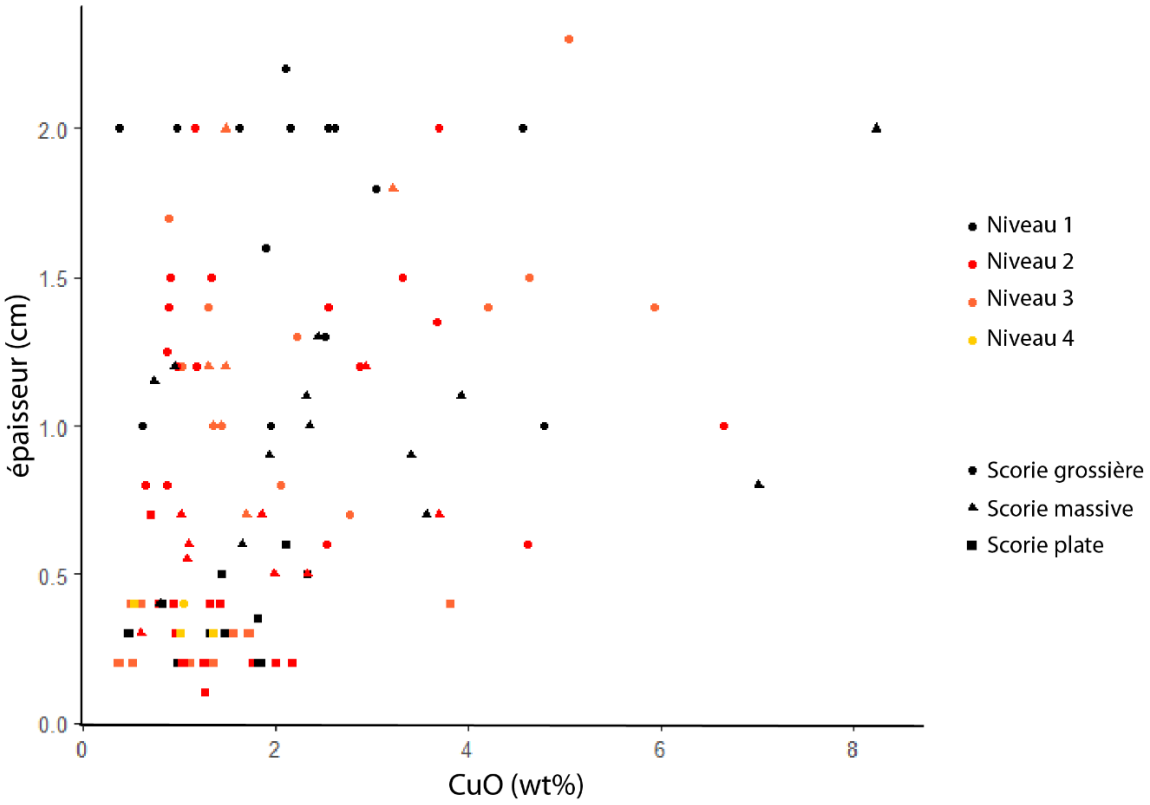


Figure 108 : Diagramme binaire représentant les teneurs(%mass.) en oxyde de cuivre en fonction des teneurs oxyde de soufre dans les scories de PBL (données obtenues par ICP-OES et ICP-MS).

Les taux de cuivre et de soufre ont également été analysés par rapport aux niveaux (Figure 109) auxquels ils sont associés dans le contexte archéologique, dans le but de détecter une

matérialisation d'une évolution temporelle. Ils pourraient par exemple mettre en lumière un changement dans le rendement de récupération du cuivre. Dans le cas du cuivre, il s'agit de voir si une évolution dans l'efficacité du procédé peut être perçue. Pour le soufre, si une quantité plus ou moins importante est présente dans le système en fonction des niveaux, cela pourrait matérialiser l'ajout plus ou moins élevé de minerais sulfurés. Dans le cas du cuivre, aucune corrélation ne semble pouvoir être faite entre le taux en cuivre, les niveaux archéologiques et les types de scories, ne montrant donc pas d'évolution du procédé dans l'efficacité de récupération en cuivre. La même chose est constatée pour les taux en soufre, pas de corrélation, ni avec les niveaux archéologiques, ni avec les types de scories.



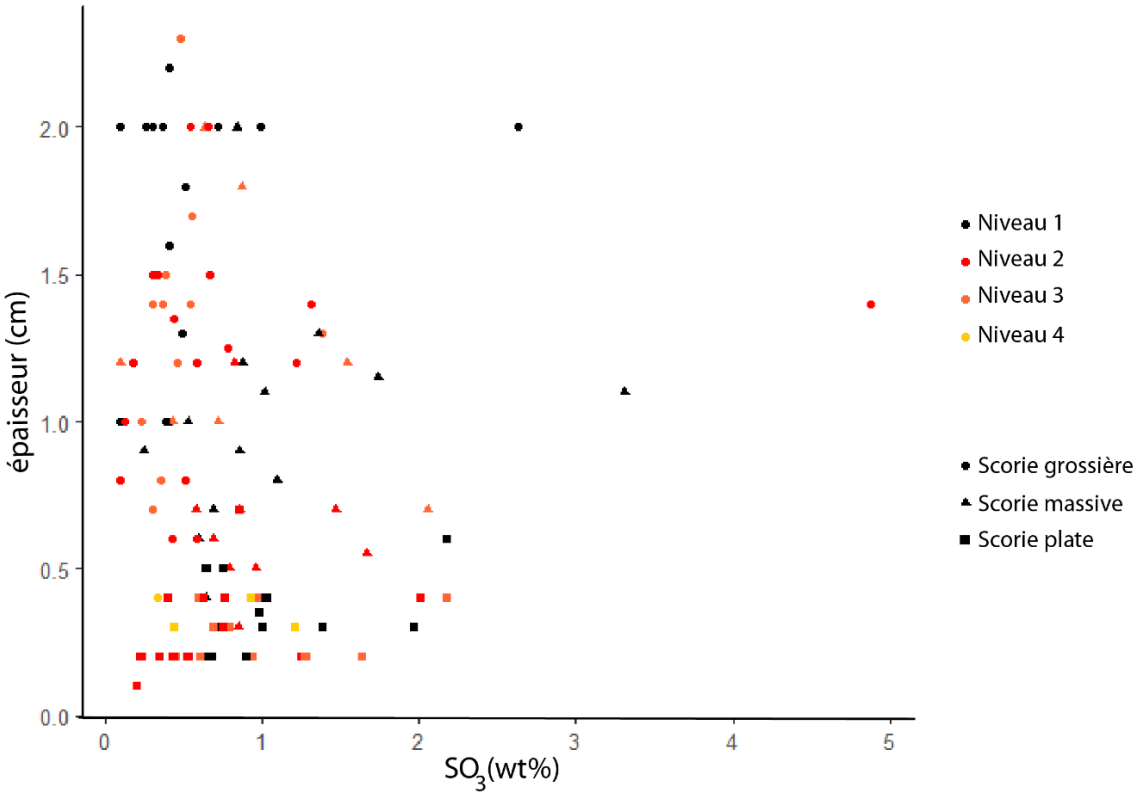


Figure 109 : Représentation des taux de cuivre et de soufre(%mass.) en fonction de l'épaisseur en cm des scories en section avec leur type associé et colorés par rapport aux niveaux archéologiques. Le niveau 1 correspond au niveau le plus proche de la surface, le 4, le plus profond. Données obtenues par ICP-MS et ICP-OES.

Au sein du corpus de Puen Baolo se trouvent également sept scories (PBL/S9/1/1/5503/a, PBL/S9/1/1/5503/b, PBL/S9/2/2/5505/a, PBL/S9/2/2/5505/b, PBL/S9/2/2/5508, PBL/WEST1/1/2/b et PBL/WEST1/2/c) provenant de la zone adjacente à la fouille principale vers l'ouest, notée PBL WEST. Les scories de PBL WEST semblent différentes de celles de Puen Baolo sur plusieurs aspects. Tout d'abord par leur taux d'oxyde de manganèse qui est plus élevé, en moyenne de 5,9 %mass. avec quatre de ces échantillons (PBL/S9/1/1/5503/a, PBL/S9/1/1/5503/b, PBL/S9/2/2/5508 et PBL/S9/2/2/5505/b) possédant un taux encore plus élevé entre 6,9 et 18,0 %mass. Les quatre mêmes échantillons possèdent également un taux d'oxydes de zinc supérieur entre 1,9 et 4,1 %mass. et en moyenne de 1,6 %mass., alors que pour Puen Baolo, ce taux est en moyenne de 0,2 %mass. Ces différences de composition entre PBL et PBL WEST, bien qu'ils soient situés dans la même zone, pourraient signifier des différences dans l'emploi des matières premières. Bien qu'aucune datation ne soit disponible pour PBL WEST, on peut également envisager une variation temporelle.

Les principaux éléments traces pour les scories de PBL sont le plomb (300 ppm), le zirconium (130 ppm), le vanadium (100 ppm), le molybdène (100 ppm) et le cobalt (90 ppm).

2. Thong Na Nguak

Les 15 scories de Thong Na Nguak analysées ont une composition moyenne de FeO (49,22 %mass.) ; SiO_2 (30,15 %mass.) et Al_2O_3 (6,39 %mass., Figure 110) avec des coefficients de variation bas respectivement de 15%, 13% et 20% (Tableau 31). Comme dans le cas de Puen Baolo, la composition de la charge semble peu varier. Étant donné qu'ils représentent 85% de la composition totale, la composition des trois oxydes principaux a donc été placée dans un diagramme ternaire FeO-SiO_2-AL_2O_3(Figure 111). Les données se trouvent dans le domaine de la fayalite, à l'exception d'un échantillon plus riche en silice et pauvre en fer (DF/1-A/138/a), une scorie plus vitreuse, sans cristallisation d'olivine ferreuse, comme nous le verrons par la suite. On remarque ici que les compositions des scories de TNN se rapprochent davantage de l'optimum 1 (Rehren et al., 2007, Charlton et al, 2010), avec une température de liquidus plus basse autour de 1100°C, que pour PBL à l'optimum 2.

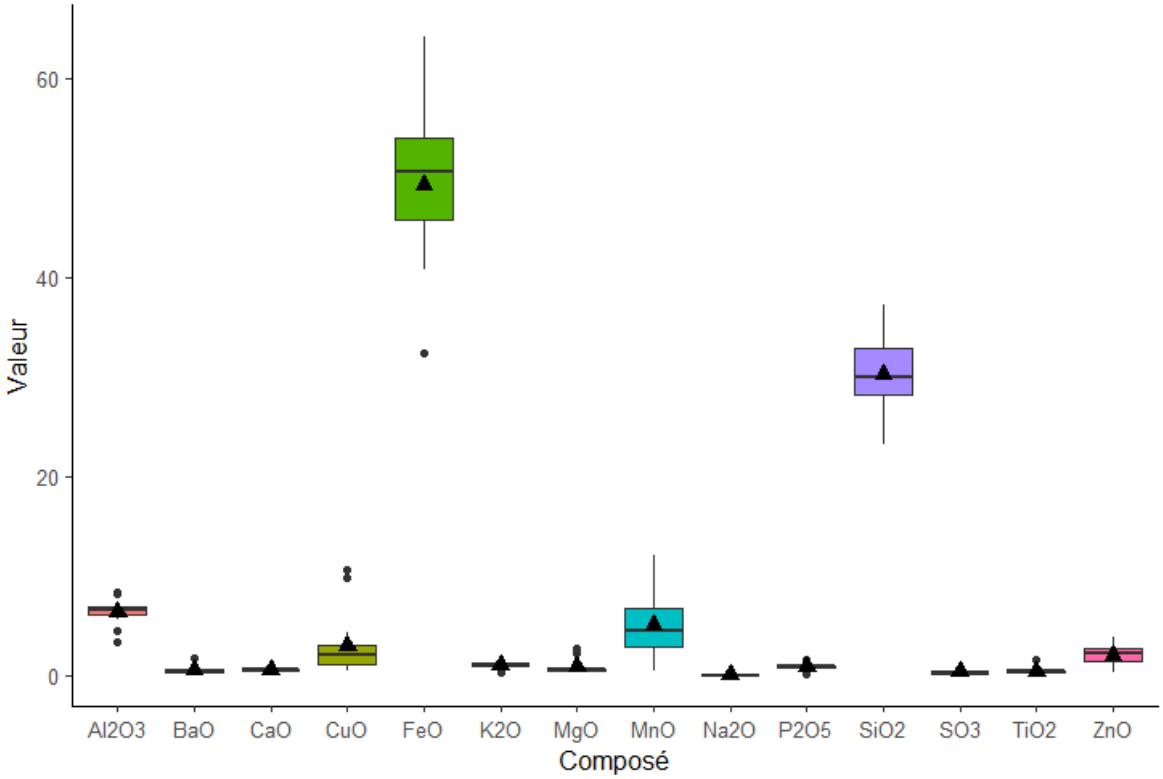


Figure 110 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennes (%mass.) globales des scories de TNN (n=15) obtenues par ICP-MS et ICP-OES. Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé.

	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CuO	ZnO	SO_3	BaO
CV	13%	20%	15%	67%	88%	29%	117%	31%	76%	38%	104%	50%	77%	89%

Tableau 31 : Coefficient de variation pour chaque composé identifié dans les scories de TNN (ICP-MS et ICP-OES).

La corrélation entre FeO et SiO_2 (R_2=0,4967485) est moyenne (Figure 112), signifiant qu'une partie des deux oxydes pourrait avoir intégré le système via la même source.

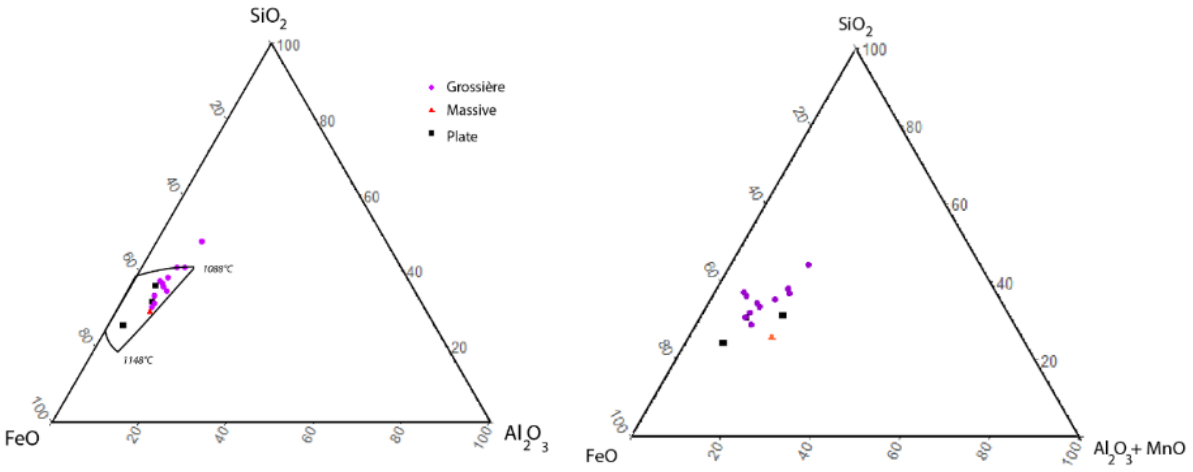


Figure 111 : À gauche, diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 avec les composés majeurs des scories de TNN, et le domaine de la fayalite (modifié d'après Rehren et al, 2007). À droite, diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 auquel les taux en MnO ont été ajoutés, car il est parfois le troisième composé majeur des scories de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

Ensuite, on trouve la présence d'oxydes mineurs, MnO (4,98 %mass.), ZnO (1,97 %mass.), K_2O (1,05 %mass.), MgO (0,77 %mass.), P_2O_5 (0,82 %mass.), CaO (0,47 %mass.) et TiO_2 (0,39 %mass.). Les coefficients de variations des oxydes mineurs sont plus élevés, au-dessus de 50% pour MgO, MnO et TiO_2. Les coefficients de variations apparaissent moins élevés que pour les composés mineurs de PBL, signifiant peut-être que leur présence est moins variable dans la charge utilisée à TNN.

Les taux en MnO et ZnO sont ici plus élevés que dans le cas des scories de Puen Baolo. MnO est même, dans le cas de certaines scories (DF/1-A/4/133, DF/1-B-2/42, DF/1-C/3/8/c et DF/1-2/2/43), le troisième oxyde majeur détecté. La présence plus élevée de ces deux oxydes par rapport à Puen Baolo pourrait matérialiser une variation dans les matières premières utilisées lors de la réduction. À noter que ces augmentations en oxyde de manganèse et de zinc ont pareillement été observées pour certaines scories de PBL WEST, pour lesquelles une correspondance pourrait être perçue (Figure 113).

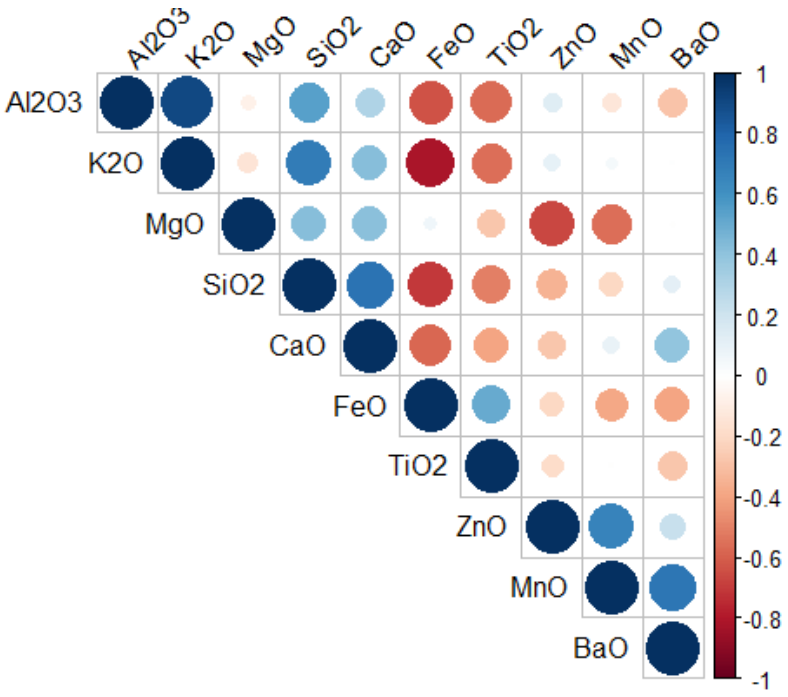


Figure 112 : Matrice de corrélation avec les composés majeurs et mineurs des scories de TNN. Données obtenues par ICP-OES et ICP-MS.

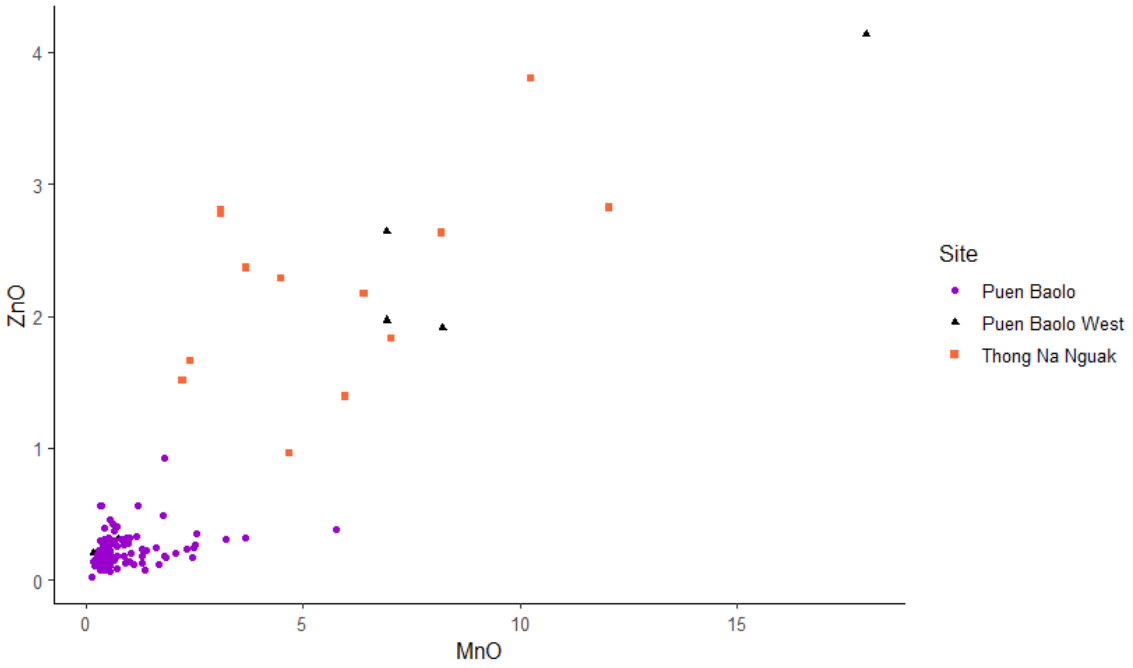


Figure 113 : Comparaison des taux (%mass.) de MnO et ZnO en fonction des sites Puen Baolo, Puen Baolo West et Thong Na Nguak. Données obtenues par ICP-MS et ICP-OES.

En revanche, tout comme dans le cas de Puen Baolo, l'oxyde de calcium se trouve en dessous de 1 %mass., signifiant encore une fois sa faible contribution au système. Cela pourrait être relié à l'utilisation de minerais avec une gangue non calcaire (Figure 111). Concernant le cuivre et le soufre résiduel des scories de Thong Na Nguak, il est en moyenne de Cu (2,5 %mass.) et S (0,1 %mass.) avec des coefficients de variation élevés de 104% et 77%.

Au niveau des éléments traces, tout comme dans le cas de PBL, aucune variation ne semble se matérialiser dans les teneurs en éléments traces de TNN. Les principaux sont le plomb (1000 ppm), le zirconium (300 ppm) et le vanadium (200 ppm). Leurs coefficients de variation sont très élevés (pour la plupart au-dessus de 100%). En revanche, après traitement statistique (PCA et CAH), le résultat de la CAH place la quasi-totalité des scories de TNN dans le même groupe, ainsi que pour quatre scories de PBL WEST. Cela renforce une nouvelle fois l'hypothèse de matières premières différentes. La principale variation semble provenir des teneurs en éléments traces du plomb, plus élevées pour TNN, avec une moyenne de 1000 ppm sur l'ensemble des scories, contre 300 ppm à PBL. Dans le groupe de TNN on retrouve également 11 scories de PBL.

V.3.3. Microstructure

À la suite du traitement des données élémentaires globales obtenues par ICP-OES et ICP-MS (voir la méthodologie Chapitre IV), une sous-sélection de 56 échantillons (43 de PBL et 13 de TNN) a pu être effectuée par un traitement statistique. Cette sélection a pour but de regarder la microstructure et la composition des différentes phases présentes dans les scories par observations au Microscope Optique et au MEB-EDS, suivant la méthodologie décrite au Chapitre IV (voir Tableau 32 et Tableau 33). Des fiches objets reprenant les résultats pour chaque échantillon sont présentées en Annexe 1. La microstructure de la majorité des scories de PBL suggère que les scories étaient fondues durant l'opération. La majorité des phases cristallines observées sont par conséquent néoformées.

Tout comme l'ont indiqué les résultats de compositions globaux, la microstructure des scories de Puen Baolo et Thong Na Nguak est homogène avec la cristallisation d'olivines ferreuses accompagnées d'oxydes de fer dans une matrice vitreuse, ainsi que des inclusions métalliques de différents types. La microstructure des scories étant homogène, très peu de minéraux n'ayant que partiellement, ou non réagi, sont identifiés. Les prochaines parties sont donc organisées par phase identifiée (fayalite, oxyde de fer, verre interstitiel, inclusions métalliques et minéraux n'ayant pas réagi) afin de décrire leur morphologie et leur composition pour les deux sites.

1. Puen Baolo

A. Silicates

La microstructure des scories de Puen Baolo est dominée par une phase composée en moyenne de Fe à 50,5 %mass. et de Si à 14 %mass., qui correspondrait à des olivines ferreuses de type fayalite (Fe_2SiO_4), également identifiées grâce à leur morphologie. La cristallisation d'olivines est observée pour la totalité des scories, avec parfois des cristaux de très petites dimensions. Leur morphologie et taille de cristaux sont donc variables d'un échantillon à l'autre, et au sein même d'un échantillon, ce qui est fréquent pour les scories archéologiques

(A. Manasse et M. Mellini, 2002). Les trois principales morphologies observées pour les olivines sont la forme en polyèdre (Figure 114), squelette (Figure 115) et plume (Figure 114 et Figure 116), d'après la classification faite par Donaldson (1976). D'après l'étude de Faure et al., 2003 ainsi que les expérimentations de Donaldson, le type de cristallisation des olivines permet d'estimer la vitesse de refroidissement liée à leur formation. La morphologie en polyèdre correspond à la vitesse de refroidissement la plus lente, de 0,5°C/h^{-1}, celle en squelette correspondrait à une vitesse de refroidissement de 0,5 à 40°C/h^{-1}, alors que celle en plume suggèrerait un refroidissement rapide de <300°C/h^{-1}. Ces estimations ne sont pas à prendre en compte précisément, car comme déjà mentionné, plusieurs morphologies d'olivines peuvent se retrouver au sein d'une même scorie. Dans certains contextes, la morphologie des cristaux d'olivines a pu être corrélée à un type de scorie (L. Anguilano et al., 2002). La morphologie des olivines a donc tenté d'être corrélée avec les types de scories, afin de voir si une tendance en rapport à la vitesse de refroidissement pouvait être définie, car elle peut matérialiser l'utilisation d'un type de structure de chauffe, creuset versus four. Par exemple, est-ce que les scories plates ont une tendance plus forte aux morphologies en plume liées à un refroidissement rapide ? Il semblerait que ce ne soit pas le cas. Les différentes morphologies d'olivines se retrouvent pour tous les types de scories. Or, définir une tendance dans la vitesse de refroidissement pourrait être intéressant afin de déterminer le mode d'obtention des scories et les conditions dans lesquelles elles ont refroidi : scories de coulée, solidification dans le réacteur, utilisation des creusets versus four, etc.

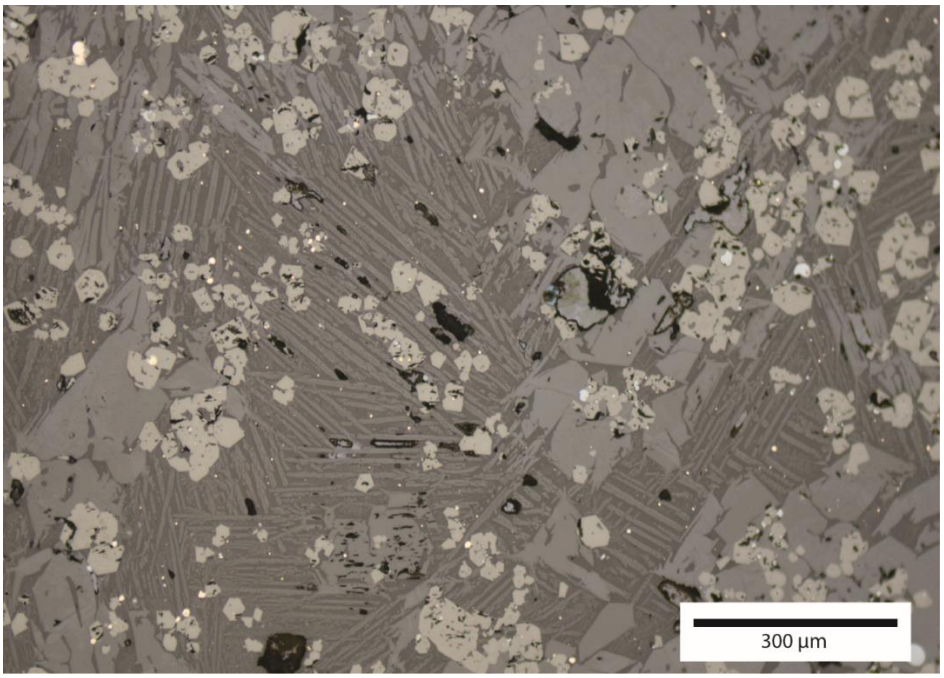


Figure 114 : Micrographie obtenue à grossissement 10 montrant deux types de cristallisation d'olivine, en polyèdre et en plume pour l'échantillon PBL/C16/3503/a.

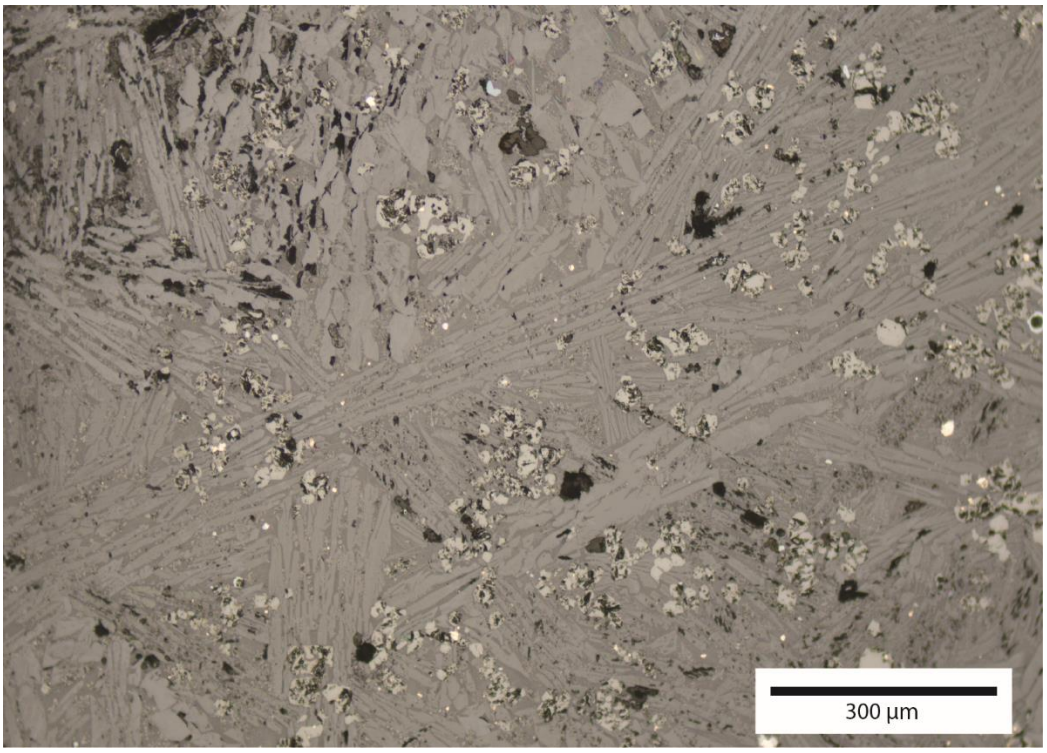


Figure 115 : Micrographie grossissement 10 montrant la cristallisation des olivines en squelette pour l'échantillon PBL/CC14/3/7116/g.

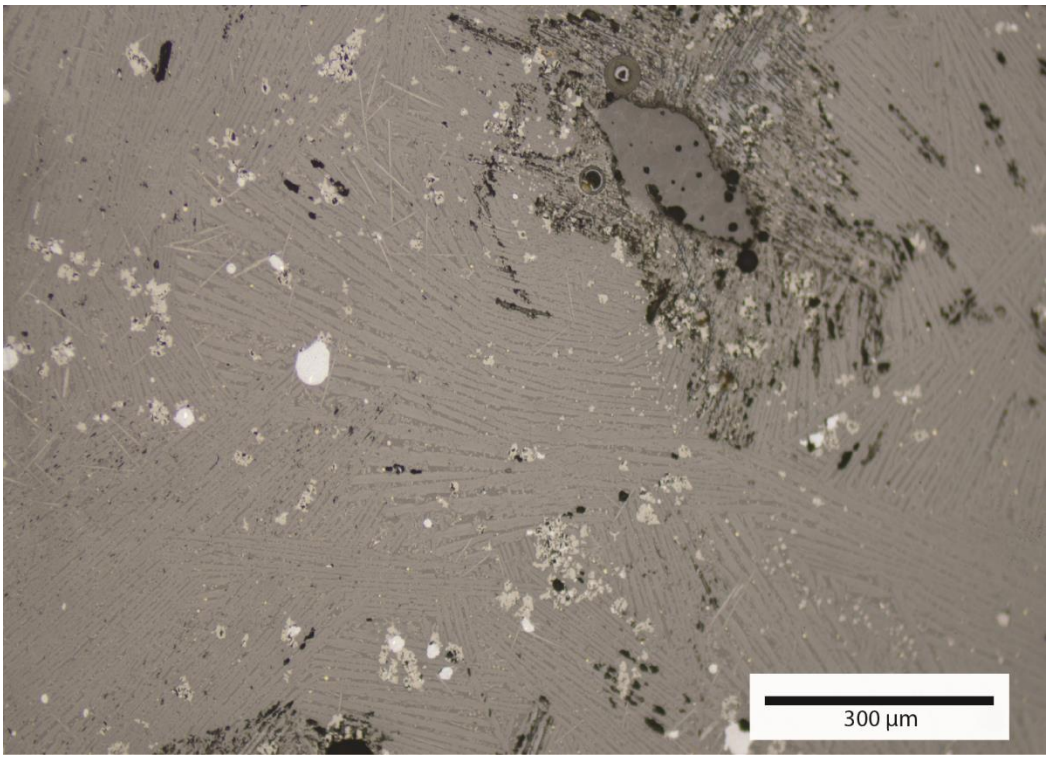


Figure 116 : Micrographie grossissement 10 montrant la cristallisation des olivines en plume pour l'échantillon PBL/AA15/2/2/6803/b.

On trouve également la présence de composés mineurs dans les olivines de PBL, notamment de magnésium qui est présent à quelques % en solution solide, en moyenne sur tous les échantillons, à 0,7 %mass. L'oxyde de magnésium est, dans de rares cas, plus élevés à cœur

de certains cristaux (PBL/C14/1/4/7205/c, PBL/AA15/3/1/6808/b ou PBL/G15/1/3/7304/c). La présence à cœur de Mg se rapprocherait de la présence d'une substitution isomorphe, avec ici un composé de type forstérite (Mg_2SiO_4), donnant des olivines ferromagnésiennes. La présence de magnésium à cœur des cristaux s'observe uniquement pour des cristaux en polyèdre (Addis et al., 2016, p.102-104; Burger et al., 2010). La présence de forstérite indique que les cristaux d'olivines ont grandi dans des conditions de températures variables, et que des températures plus élevées ont pu être localement atteintes.

On retrouve ensuite la présence de manganèse à une moyenne de 1 %mass. et également d'Al à 0,6 %mass. La proportion de ces composés mineurs est variable d'un échantillon à l'autre avec des coefficients de variations élevés, de 105% pour MnO, 174% pour Al_2O_3 avec MgO à 56%.

B. Oxydes de fer

La seconde phase majeure des scories de Puen Baolo se compose de fer en moyenne (sur plusieurs zones d'analyses) à 69 %mass., dont la cristallisation est principalement en polyèdres de tailles variables. Cette phase a donc été associée à un oxyde de fer, la magnétite (Fe_3O_4) de structure spinelle (Figure 117), par sa composition et sa morphologie. La forme en dendrite est également fréquemment rencontrée. Une autre morphologie d'oxyde de fer a pu être observée en minorité dans les échantillons (PBL/A15/3/1/6705/a, PBL/AA15/3/1/6808/b, PBL/B17/2/1/3303/d). Cette phase semble correspondre à de la wüstite (FeO ; Figure 118). Elle se distingue par ses propriétés optiques, son aspect globulaire et son taux de fer plus élevé, en moyenne de 76 %mass. Sa présence implique localement une atmosphère plus réductrice. Pour un échantillon, PBL/C17/1/2/a, la wüstite a plus largement été identifiée. De plus, cette scorie possède le taux de cuivre le plus bas, à l'état de trace (0,02 %mass.). Cette scorie pourrait être issue de la métallurgie du cuivre dont la réduction optimale a produit une scorie avec un taux de cuivre résiduel bas, ou d'un minerai de cuivre pauvre.

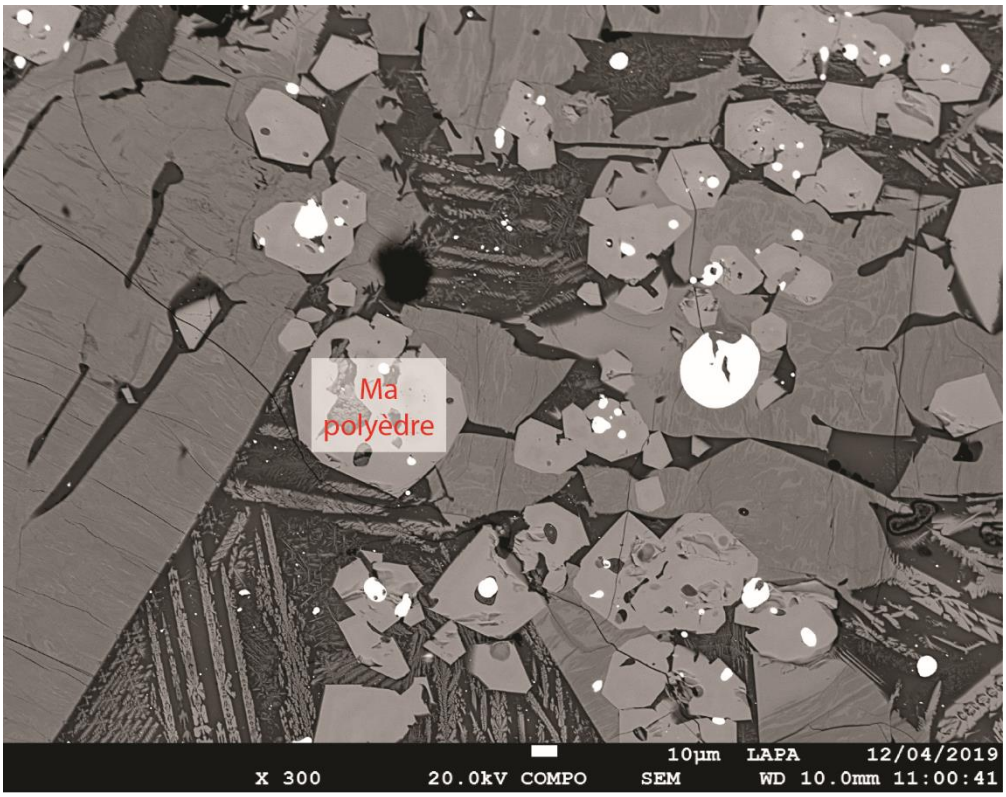


Figure 117 : Image BSE (x300) montrant la présence de magnétite cristallisée en polyèdres dans l'échantillon PBL/C16/3503/a.

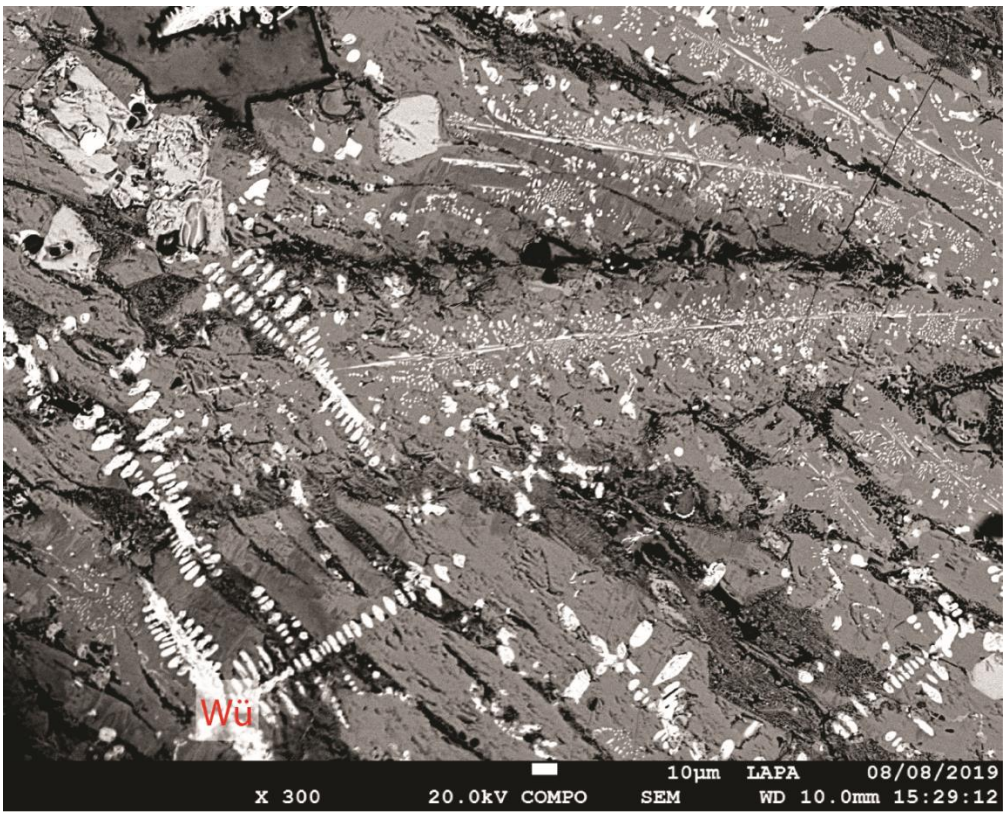


Figure 118 : Images en BSE au MEB-EDS (x300) montrant la présence de wüstite globulaire en dendrites (FeO) pour l'échantillon PBL/B17/2/1/3303/b.

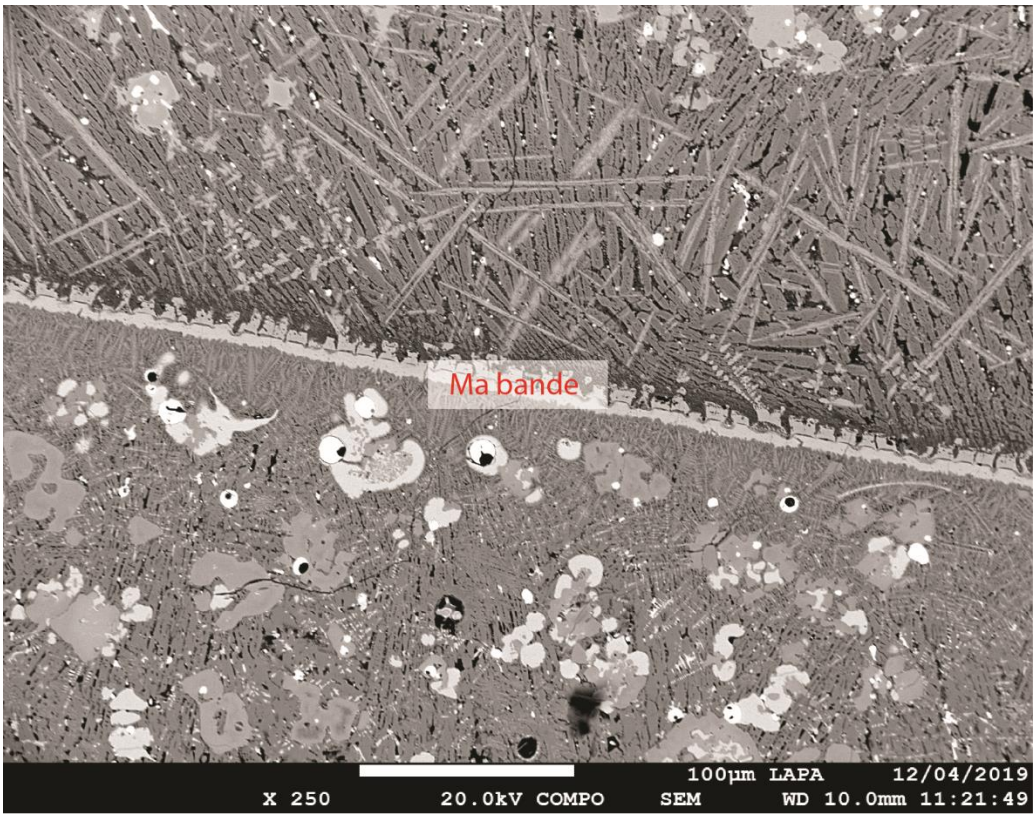


Figure 119 : Image BSE (x300) montrant la présence de magnétite en bandes dans l'échantillon PBL/B14/1/2/7002/b.

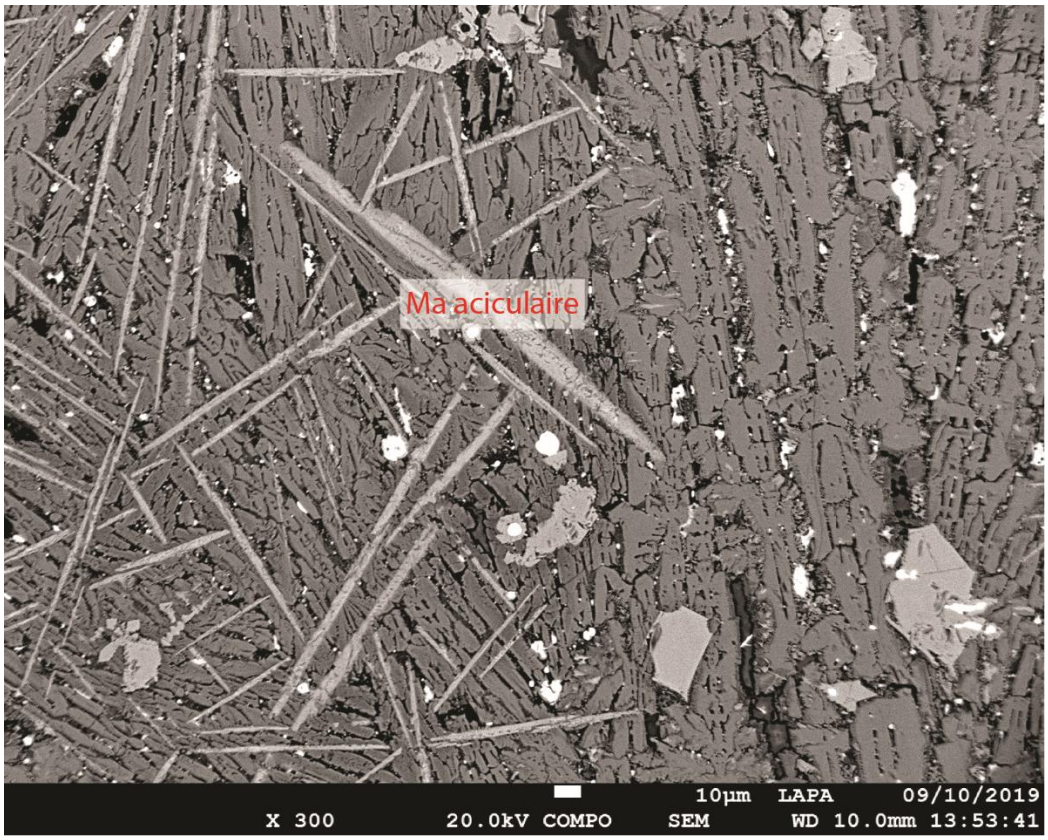


Figure 120 : Image BSE (x300) montrant la présence de magnétite aciculaire dans l'échantillon PBL/E15/2/2/3218/e.

Une autre morphologie d'oxydes de fer, également associés à de la magnétite par sa composition, se distingue fréquemment dans les scories. Il s'agit un agglomérat de magnétite en bande (Figure 119), généralement parallèle à un côté de la scorie. Les bandes de magnétite se retrouvent fréquemment dans les scories archéologiques et sont généralement associées à des scories coulées, car elles apparaitraient par refroidissement rapide au contact d'une surface froide (A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003; M. Georgakopoulou, Y. Bassiakos, et O. Philaniotou, 2011). Enfin, une dernière morphologie d'oxydes de fer se distingue, une forme en aiguille, généralement présente aux bordures de la scorie (Figure 120 et Figure 121), mais on la retrouve également à l'intérieur. Il semblerait que ces cristaux soient également de la magnétite, par leur composition. La magnétite peut avoir cette morphologie lors d'un refroidissement rapide, on la retrouve sous la dénomination de magnétite aciculaire (Okuda et Harada, 1985). L'implication de ces différentes morphologies de cristaux sera discutée au Chapitre VII.

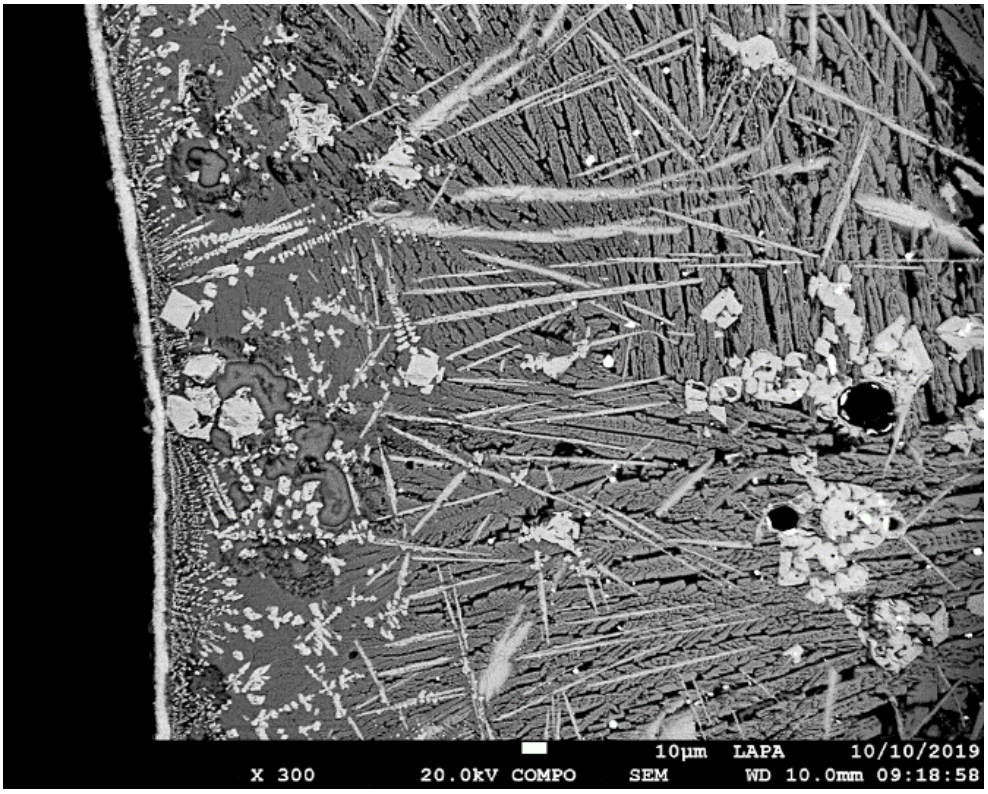


Figure 121 : Image en BSE au MEB-EDS de l'échantillon PBL/C14/2/3/7219/c (x300) montrant la présence d'une bande de magnétite et de magnétite aciculaire en bordure extérieure, signe d'un refroidissement rapide au contact d'une surface froide/et ou de l'air.

On trouve ensuite des composés mineurs dans les oxydes de fer de PBL. Les cristaux de magnétite comportent dans certains cas la présence d'oxyde d'aluminium. Le taux d'alumine moyenné sur plusieurs zones d'analyses pour l'ensemble des scories de PBL est de 4 %mass. Certains échantillons comportent des taux notablement plus élevés pour certaines scories,

comme PBL/G15/2/2/7305/h, PBL/C14/3/7116/c, PBL/C17/1/1/3117/c ou encore PBL/C14/1/4/7205/c avec une moyenne d'Al_2O_3 de 15 %mass., 6 %mass., 6 %mass. et 15 %mass. respectivement. Ces taux élevés d'Al se retrouvent globalement pour tous les oxydes de fer analysés à l'échelle des scories citées, signifiant que sa représentativité est assez homogène à l'échelle de ces échantillons. De plus, ces taux plus élevés montrent que les analyses au MEB-EDS n'ont pas pris en compte la matrice entourant les oxydes de fer et proviennent bien de la composition des cristaux de magnétite. L'identification de taux d'Al plus élevés a été associée ici à la cristallisation de composé de type hercynite ($FeAl_2O_4$), qui comme dans le cas de la forstérite pour les olivines, se forme à une gamme de température plus élevée. Cela signifierait que du moins localement, des températures plus hautes auraient pu être atteintes.

Ensuite, on retrouve pour les composés mineurs la présence de silicium, après moyenne sur tous les échantillons, de 1 %mass. Pour la magnétite aciculaire, le taux en Si est généralement plus élevé, mais cela pourrait également provenir de la matrice environnante qui aurait pu être intégrée dans l'analyse. Et enfin, le troisième composé mineur associé aux oxydes de fer de PBL est le titane, à une moyenne sur tous les échantillons de 0,5 %mass.

Les oxydes de fer se retrouvent parfois en étroite association avec des inclusions de cuivre métallique et de matte. La présence trop importante de magnétite dans les scories, au-delà de 20% en masse, seuil critique fixé par la métallurgie moderne (Burger, 2008; Ducret et Rankin, 2002) rend le mélange trop visqueux, empêchant une bonne coulée et également un risque d'une récupération du cuivre métallique moins efficace. Même si la magnétite n'a pas encore pu être quantifiée ici, ce seuil ne semble pas avoir été franchi dans le cadre des scories de Puen Baolo. Si on regarde le taux de cuivre résiduel global, il se trouve plutôt bas, en moyenne de 2 %mass. après moyenne de l'ensemble des échantillons. De plus, la morphologie principale des scories, plates, indique des scories avec une viscosité adaptée à la coulée (A. Addis et al., 2016).

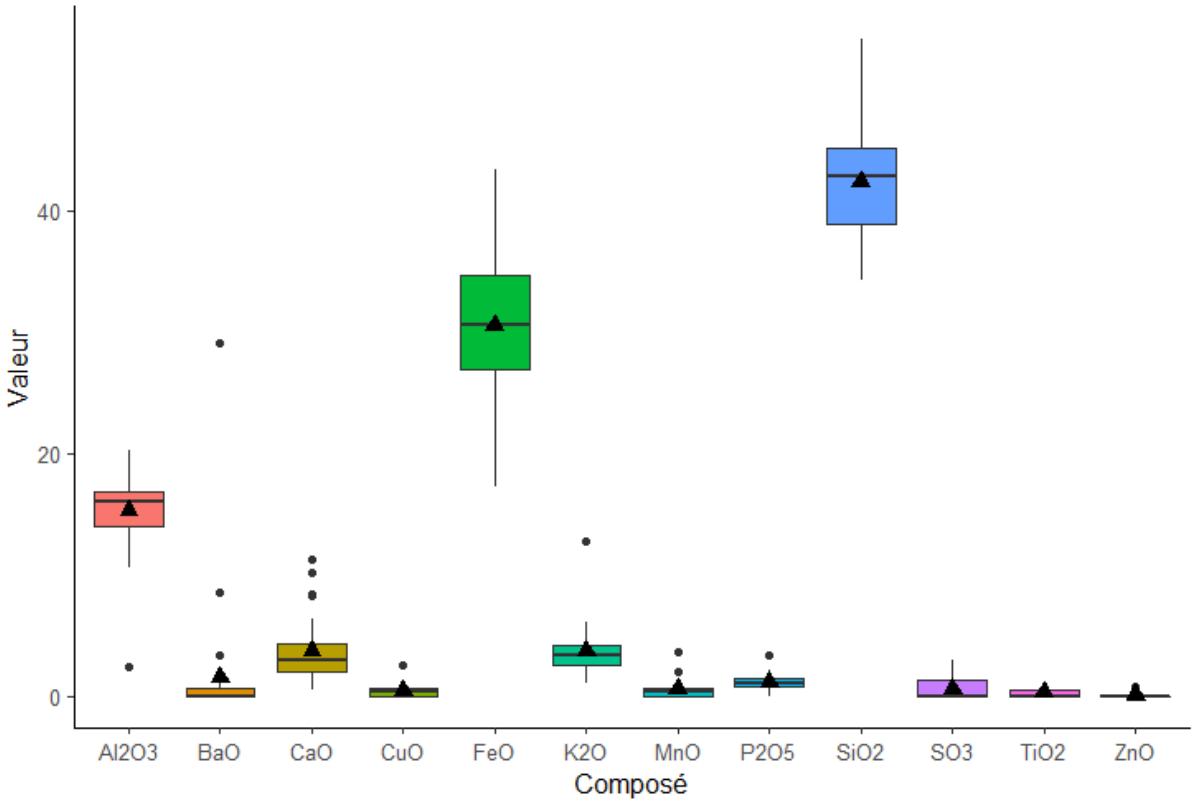


Figure 122 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennées sur plusieurs zones d'analyses de la phase vitreuse pour l'ensemble des scories de PBL (%mass.) au MEB-EDS (n=31). Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé.

Le verre interstitiel situé entre les cristaux de fayalite et de magnétite contient tout le restant des composés qui n'ont pas cristallisé. Il regroupe donc une plus grande proportion des composés mineurs identifiés dans les compositions globales en partie V.3.2. Les composés majeurs du verre sont SiO_2 (42 %mass.), FeO (30,5 %mass.) et Al_2O_3 (15 %mass.). Ensuite, on dénombre des composés mineurs : K_2O (4 %mass.), CaO (4 %mass.), BaO (2 %mass.), P_2O_5 (1 %mass.) et MnO (0,5 %mass., Figure 122). Le taux moyen en baryum détecté provient principalement de quelques échantillons avec un taux plus élevé, à savoir PBL/A15/3/1/6705/a (2 %mass.), PBL/AA15/3/1/6808/b (8,4 %mass.), PBL/C14/1/4/7205/a (29 %mass.), PBL/C14/1/4/7205/b (3 %mass.) et PBL/G15/1/3/7304/c (1 %mass.). Pour les autres échantillons les taux en baryum sont largement inférieurs à 1 %mass., voire même non détectés. Les composés majeurs SiO_2, FeO et Al_2O_3 sont peu variables d'un échantillon à l'autre avec des coefficients de variations de 12, 21 et 22% respectivement. Les composés mineurs ont des coefficients de variations plus élevés, à l'image de ceux observés pour les compositions globales, signifiant que ces composés entrent de manière variable dans le système. Le verre est plus ou moins présent en fonction des échantillons, sa proportion est difficile à estimer.

Échantillon	Type	Olivine	Oxyde de fer	Verre	Inclusion métallique	Sol/céram	Autres	CuO	SO_3	Comment
PBL_A15_3_1_6705_a	massive	Fa (P+S)	Ma (P,A,B), wüstite	Faible	CuS (chalp, cov)	N		1,2	1,43	
PBL_AA15_2_2_6803_b	plate	Fa (F)	Ma (P,A)	Faible	CuS (chalc)	N		0,92	0,71	
PBL_AA15_2_3_6811_b	massive	Fa (F+S)	Ma (P,A)	Médium	CuS (chalc)	N	Quartz	1,03	0,65	
PBL_AA15_3_1_6808_b	grossière	Fa (P+S)	Ma (P), wüstite	Faible	CuS (chalc, cov, chalp)	O	Barite	2,11	1,32	
PBL_AA15_3_1_6808_d	massive	Fa (P+S)	Ma (P,D)	Faible	CuS (chalc, cov, chalp)	O		1,57	1,9	
PBL_AA15_3_1_6808_e	plate	Fa (S)	Ma (P,D,A)	Faible	CuS (cov, chalc), Cu	N	FeO res	1,45	0,64	
PBL_B14_1_1_7001_c	plate	Fa (S)	M (P)	Faible	CuS (cov, chalc)	N		1,24	1,31	
PBL_B14_1_2_7002_b	plate	Fa (S)	Ma (P,D,A,B)	Faible	CuS (cov, chalc, chalp)	N		1,96	2,03	
PBL_B17_1_1_3301_b	massive	Fa (P+S)	Ma (P)	Medium	CuS (cov, chalc, chalp), minerai res	N	FeO res	0,7	1,64	
PBL_B17_2_1_3303_d	plate	Fa (S)	Ma (P), wüstite	Faible (altéré)	CuS (cov, chalc, chalp)	N		0,56	0,79	
PBL_B17_2_1_3303_i	plate	Fa (P+F)	Ma (P)	Médium	CuS (chalc)	N		1,23	0,59	
PBL_B17_3_1_3312_c	grossière	Fa (S+P)	Ma (P)	Médium	CuS (chalc), Cu	N		1,28	0,22	
PBL_C14_1_4_7205_a	grossière	Fa (F)	Ma (P)	Medium	CuS (cov, chalc), Cu	N	Barite/FeO res	1,62	0,99	BaO 5,81
PBL_C14_1_4_7205_c	plate	Fa (F)	Ma (P)	Medium	CuS (chalc), Cu	N	FeO res	2,23	0,62	Al élevé (forsterite)
PBL_C14_2_1_7209_b	massive	Fa (P+S)	Ma (P)	Medium	CuS (chalc, cov), Cu	O		4,33	0,41	
PBL_C14_2_3_7219_a	massive	Fa (P)	Ma (P)	Faible (altéré)	CuS (cov, chalc, chalp)	N		1,72	1,37	
PBL_C14_2_3_7219_c	plate	Fa (S)	Ma (P,A)	Medium	CuS (chalc), Cu	N		1,17	0,5	
PBL_C16_3503_a	grossière	Fa (P+F)	Ma (P)	Medium	CuS (chalc), Cu	O	Barite/ Quartz	3,34	0,65	
PBL_C16_3503_b	plate	Fa (P+S)	Ma (P,A)	Medium	CuS (chalc, cov), minerais, Cu	N		1,38	0,94	
PBL_C16_GENSPIT_3501_a	plate	Fa (S)	Ma (P,A)	Faible	CuS (chalc), Cu	N		1,7	0,64	
PBL_C17_1_1_3117_a	massive	Fa (P+S)	Ma (P,B,A)	Medium	CuS (chalc, cov), Cu, minerai res	N	Quartz	1,81	0,8	
PBL_C17_1_1_3117_b	massive	Fa (S)	Ma (P)	Médium	CuS (chalc), Cu, minerai res	N		2,22	0,5	
PBL_C17_1_1_3117_c	grossière	Fa (P)	Ma (P)	Médium	CuS (chalc, cov, bo), Cu	N	Barite	2,44	2,47	
PBL_C17_1_2_a	grossière	Fa (P)	Wüstite, Ma (A)	Faible	CuS (chalc, cov)	N	Leucite	0,02	0,02	Scorie ferreuse ?
PBL_C17_1_2_d	plate	Fa (P+S)	Ma (P)	Medium	CuS (chalc, cov)	N	FeO res	1,62	0,67	
PBL_C17_2_1_3107_b	massive	Fa (S+P)	Ma (P,A)	Faible	CuS (chalc, cov)	O	Leucite	1,84	0,89	

PBL_C17_2_1_3107_e	grossière	Fa (F)	Ma (P,D)	Majoritaire	Cu	N		6,3	0,12	
PBL_CC14_3_7116_a	plate	Fa (P+S)	Ma (P,B)	Faible	CuS (chalp), minerais res	N	Quartz	0,56	2,03	
PBL_CC14_3_7116_c	massive	Fa (P+S)	Ma (P)	Médium	CuS (chalc, cov), Cu	O	Leucite/FeO res	3,03	0,82	
PBL_CC14_3_7116_g	grossière	Fa (S)	Ma (P)	Faible	CuS (chalc), Cu	N	Quartz/ceram	1,92	0,34	
PBL_D10_1_1_2004	grossière	Fa (S)	Ma (P,B)	Médium	Cu, CuS (chalc)	N				
PBL_D13_3729_1709	grossière	Fa (P+S)	Ma (P)	Faible	CuS (chalc, cov, bo, chalp), Cu, minerai res	O	Leucite/Quartz	3,17	0,81	
PBL_E15_2_2_3218_b	grossière	Fa (F)	Ma (B,D)	Majoritaire	CuS (cov, chalp), minerai res	N	Quartz	2,41	4,62	Forte hétérogénéité
PBL_E15_2_2_3218_c	grossière	Fa (S)	Ma (P)	Médium	Cu, CuS (chalc)	N	Minerai ?	3,09	0,31	
PBL_E15_2_2_3218_e	plate	Fa (P)	Ma (P,D,A)	Faible	CuS (cov, chalc, chalp)	N		0,74	1,88	
PBL_E15_3_1_3277_b	grossière	Fa (F)	Ma (P)	Majoritaire	Cu, CuS (chalc)	N	Quartz	2,63	0,29	
PBL_G15_1_3_7304_c	massive	Fa (P)	Ma (P)	Medium	CuS (chalc, cov)	N	Barite/FeO res	1,54	0,56	
PBL_G15_2_2_7305_b	plate	Fa (S)	Ma (P,A)	Medium	CuS (chalc, cov, chalp)	O	Bartite	0,89	0,73	PbO 8%
PBL_G15_2_2_7305_h	grossière	Fa (P+S)	Ma (P)	Medium	CuS (chalc), Cu	N		1,1	0,55	
PBL_G15_3_1_7309_a	plate	Fa (S)	Ma (P,A)	Altéré	Cu, CuS (chalc)	N		0,97	0,5	
PBL_G15_3_4_7316_7309	plate ?	Fa (S+P)	Ma (P)	Faible	CuS (chalc), Cu	N	Quartz	3,58	0,57	
PBL_S9_2_2_5505_b	grossière	Fa (P)	Ma (P)	Faible	CuS (cov, chalc)	N	Leucite	0,81	0,74	ZnO, MnO
PBL_S9_2_2_5508	grossière	Fa (P+F)	Ma (P)	Médium	CuS (chalc, cov), Cu	N		0,86	0,3	ZnO, MnO

Tableau 32 : Caractéristiques microscopiques des scories de Puen Baolo. Abréviations : Fa= fayalite, Ma=magnétite, CuS=Sulfures de cuivre, Cu= cuivre métallique, P=polyèdre, S=Squelette, F=feather, A=aiguille, B=magnétite en bande, D=dendrite, chalc=chalcocite, cov=covellite, chalp=chalcopyrite.

D. Inclusions métalliques

Les scories de Puen Baolo contiennent différents types d'inclusions métalliques pouvant se distinguer facilement au MO via leurs propriétés optiques et leur composition élémentaire au MEB-EDS. On distingue dans un premier temps des inclusions sphériques, très brillantes au MO. Ces inclusions se composent en majorité de cuivre (moyenne sur plusieurs analyses, 95 %mass.[33]), qui nous permettent de les associer à du cuivre métallique resté piégé dans la scorie (Figure 123 et Figure 124). Ensuite, on observe une seconde phase sphérique de couleur bleue/grise qu'on associe grâce à ces propriétés et leur composition moyenne de cuivre (75 %mass.) et de soufre (19 %mass.), à des sulfures de cuivre secondaires, chalcocite (Cu_2S) et covellite (CuS, Figure 124 et Figure 126). Ces inclusions enveloppent parfois celles de cuivre métallique (Figure 123), surtout dans le cas de la chalcocite.

Enfin, on observe un troisième type d'inclusions, moins fréquent, se présentant sous forme d'agglomérats jaunes au microscope optique, souvent situés dans l'espace entre les cristaux de fayalite et de magnétite. Ce troisième type d'inclusions se compose en moyenne de cuivre (32 %mass.), de soufre (29 %mass.) et de fer (30 %mass.). Ces inclusions sont identifiées comme des sulfures de cuivre complexes (Figure 125 et Figure 126), majoritairement de la chalcopyrite ($CuFe_2S$), parfois à de la bornite (Cu_5FeS_4) qui apparaît de couleur violette/rosée au microscope.

La forme sphérique des inclusions de cuivre métallique et de chalcocite/covellite indique qu'elles sont passées à l'état liquide. Elles sont donc des phases néoformées (P. Ambert et al., 2013). Les inclusions de sulfures de cuivre peuvent donc être dénommées « matte ». Les inclusions de chalcopyrite sont reconnaissables par leur couleur jaune brillante et leur forme non sphérique, souvent de plus petites tailles que les inclusions de sulfures de cuivre secondaires. Les inclusions de chalcopyrite sont identifiées pour 11 scories. Ces inclusions ne semblent pas être entièrement passées en solution et sont donc des reliquats du minerai d'origine, ayant partiellement ou non réagi durant le procédé. Les inclusions de chalcocite/covellite, pourraient, elles, être le produit de la désulfuration de cette chalcopyrite présente originellement. Les inclusions de chalcocite/covellite peuvent se retrouver associées dans les scories à du cuivre métallique (23 échantillons), alors que les inclusions de chalcopyrite ne le sont jamais. En revanche, elles peuvent se retrouver en association avec des sulfures secondaires. Certaines scories (13) ne comportent pas de cuivre métallique, mais seulement des inclusions de sulfures secondaires dans leur matrice. Les taux de soufre globaux énoncés en partie V.3.2 proviennent donc de la présence de ces inclusions sulfurées. Le soufre

[33] Le reste de la composition correspond a de l'oxygène et du fer, lorsqu'il est présent. En effet, certaines inclusions étaient altérées et contenaient des produits de corrosion.

n’est pas détecté dans le cas des autres phases, même pas dans le verre. L’interprétation de ces phases sulfurées par rapport au procédé sera développée au Chapitre VII.

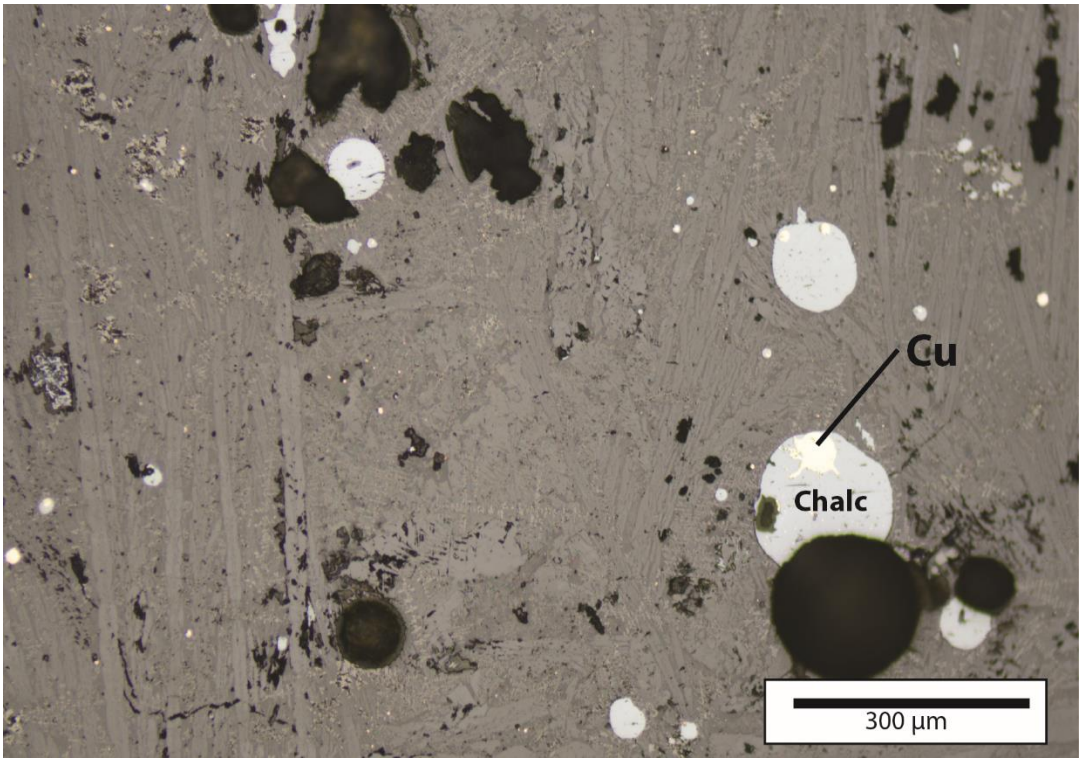


Figure 123 : Micrographie grossissement 10 montrant des inclusions de sulfures de cuivre (Chalc) enveloppant du cuivre métallique (Cu) dans l’échantillon PBL/C17/1/1/3117/b.

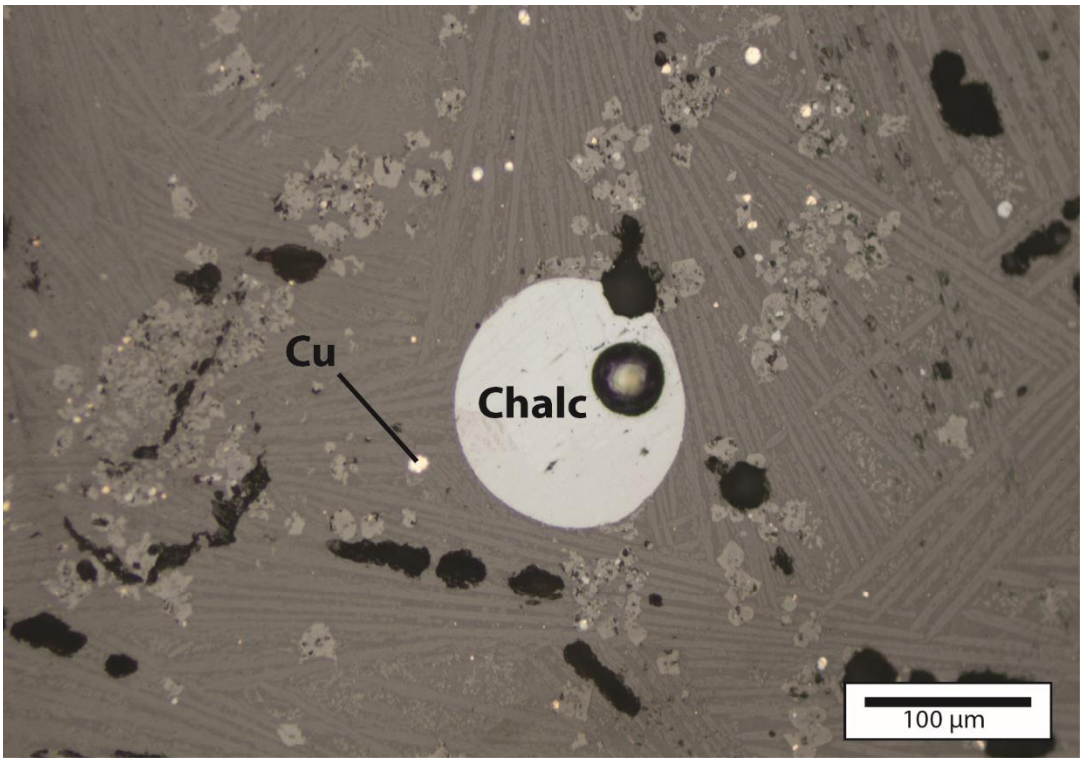


Figure 124 : Micrographie grossissement 20 montrant des inclusions de cuivre métallique (Cu) et de chalcocite (chalc) arrondies dans l'échantillon PBL/C14/1/4/7205/c.

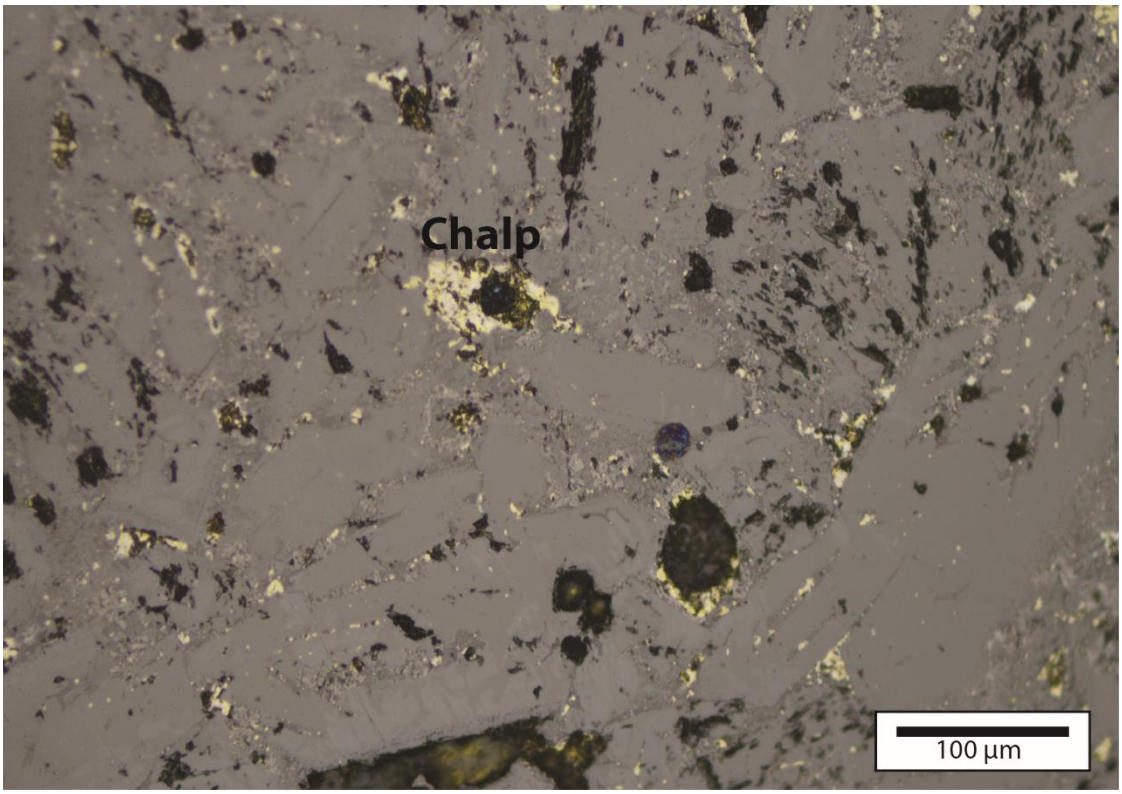


Figure 125 : Micrographie grossissement 20 montrant la présence d'inclusions de sulfures complexes de chalcopyrite (chalp) dans l'échantillon PBL/CC14/3/7116/a.

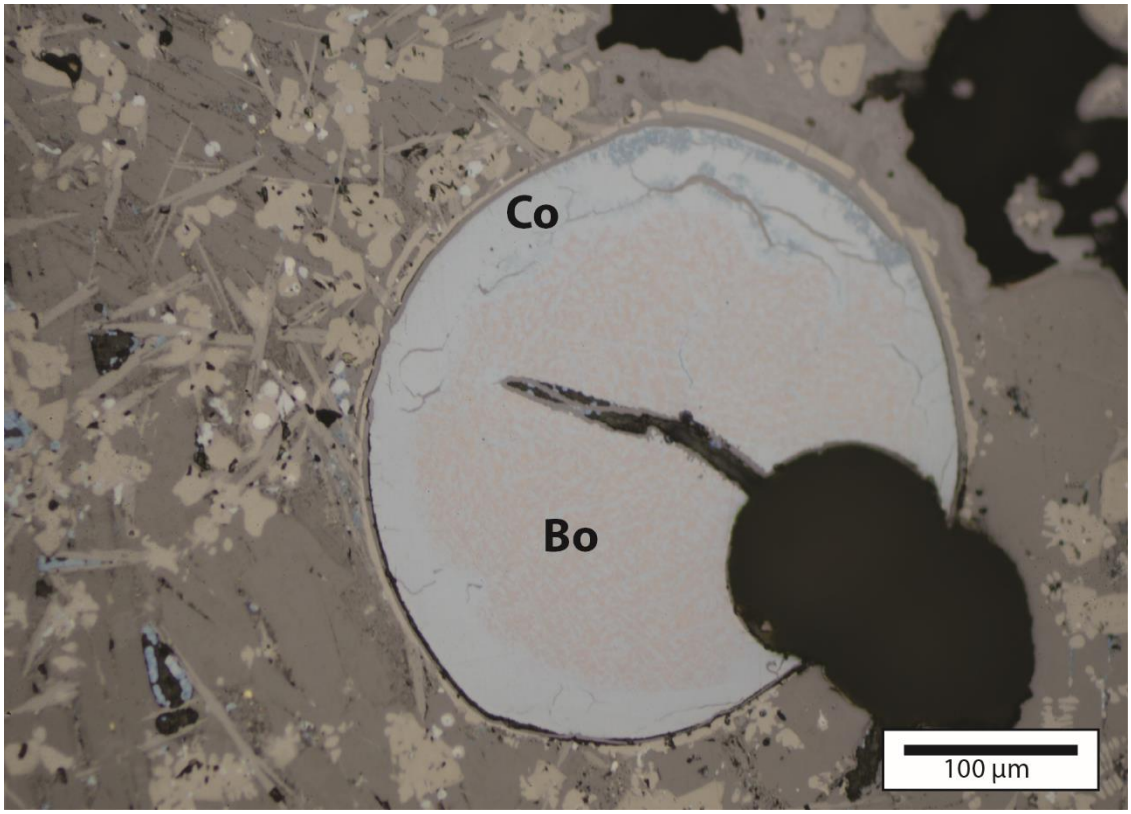


Figure 126 : Micrographie grossissement 20 montrant la présence d'une inclusion sphérique contenant de la covellite (Co), avec à cœur de la bornite (Bo) dans l'échantillon PBL/B14/1/2/7002/b.

Il faut être prudent dans l'interprétation des taux en fer contenus dans ces inclusions, car certains peuvent être liés au processus d'altération des inclusions métalliques. Lorsqu'ils sont trop peu élevés, inférieurs à 5 %mass., ils sont généralement ici associés à ce processus.

Par le biais de l'identification des inclusions métalliques nous avons essayé de construire de potentielles relations entre : natures des inclusions, types de scorie et la stratigraphie (Figure 127). Ces relations peuvent mettre en lumière différents minerais et/ou évolution dans les procédés, ainsi que l'appartenance de certains types de scories à une étape différente de la chaine opératoire (A. Addis et al., 2016). La nature des inclusions métalliques ne semble pas varier avec la stratigraphie. Il semblerait tout de même que les scories provenant du niveau 1, donc le moins profond, aient une tendance à contenir moins de fer que les scories des niveaux 2 et 3. D'après le diagramme d'équilibre du système Cu-Fe-S (W. A. Krivsky et R. Schuhmann, 1957), à 1250°C la composition de la matte est restreinte à un petit domaine situé autour du binaire Cu_2S-FeS (Figure 128), où se situe ici la majorité de la composition des inclusions de matte analysées dans les scories de Vilabouly.

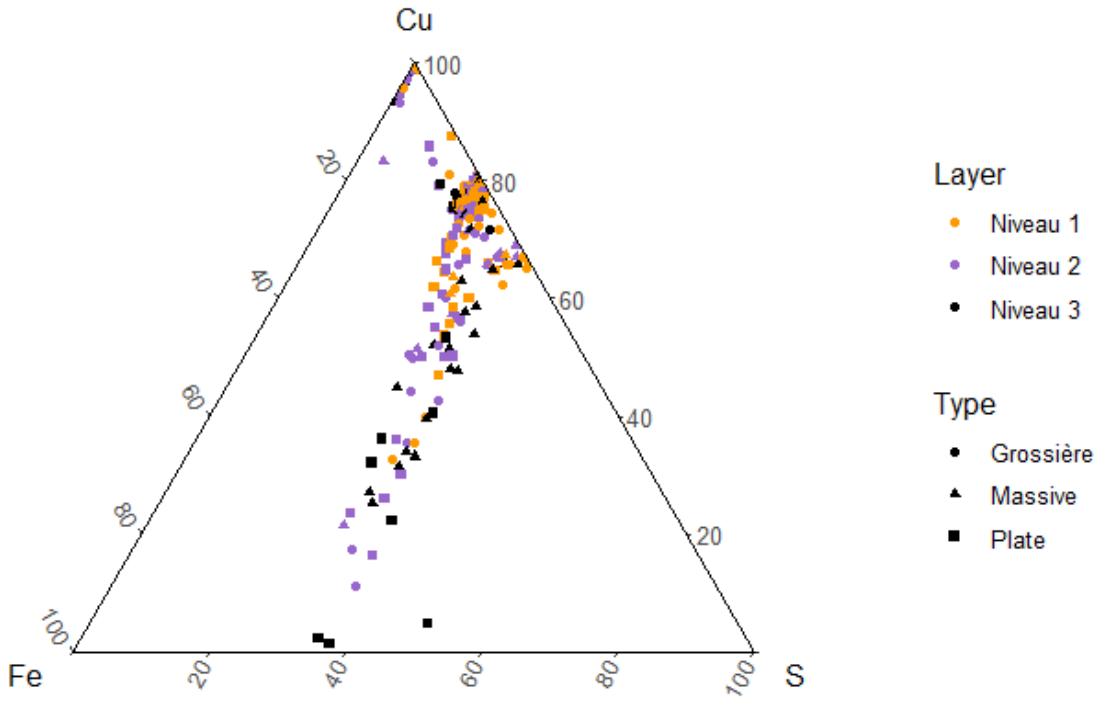


Figure 127 : Compositions obtenues par analyses au MEB-EDS dans les différentes inclusions métalliques des scories de PBL (n=290). Colorées ici en fonction des niveaux archéologiques.

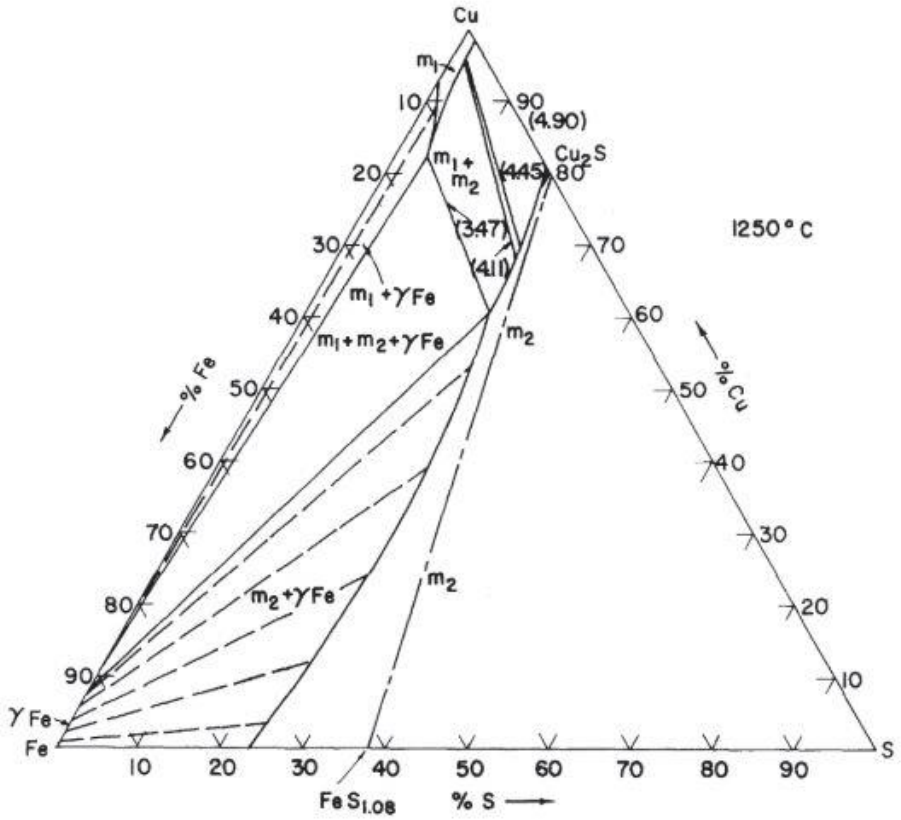


Figure 128 : Diagramme d'équilibre Cu-Fe-S à 1250°C (W. A. Krivsky et R. Schuhmann, 1957, p.982).

E. Autres phases/scories marginales

Pour les scories de PBL, d'autres minéraux/phases mineurs ont été identifiés peu fréquemment, dans certaines scories, en plus des principales phases décrites. Ces phases/minéraux sont minoritaires, car comme déjà mentionné les scories de PBL sont très homogènes. La nature de ces phases peut tout de même être indicative de la charge d'origine.

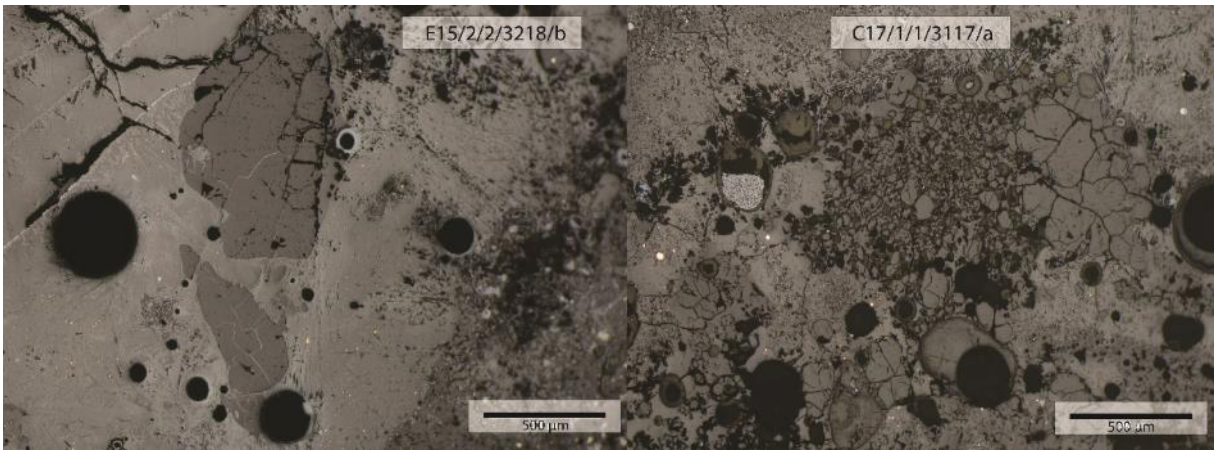


Figure 129 : Micrographies (grossissement 5) illustrant les inclusions résiduelles de quartz non réagis et partiellement réagis dans les scories.

Le premier minéral résiduel identifié dans les scories de PBL se compose de Si à 49 %mass. (moyenne sur tous les échantillons et plusieurs zones d'analyse) qui nous permet de l'associer

à du quartz (SiO_2), car la composition correspond à la stœchiométrie de ce minéral. Il est présent pour neuf échantillons généralement en faible quantité, sous forme d'un grain non réagi ou au sein d'agglomérats ayant partiellement réagi/dissouts dans la matrice (Figure 129).

Les grains de quartz peuvent également se retrouver associés à ce qui apparaît être des fragments de céramiques et/ou sols adhérents à un des côtés de la scorie (Figure 130). Ces résidus sont observés pour les scories grossières, jamais dans le cas des scories plates. Ils se sont probablement retrouvés piégés lors de la solidification de la scorie et proviendraient du contenant. La composition exacte de ces résidus a été difficile à déterminer compte tenu de leur altération, probablement liée à l'enfouissement. Ils se composent en moyenne de SiO_2 (55,5 %mass.), Al_2O_3 (20,5 %mass.) et FeO (17,5 %mass.), pour les éléments majeurs. Si on compare la composition majeure de ces résidus à la composition de la pâte des creusets décrite en partie VI.2, on remarque que les taux en fer sont bien plus élevés dans les résidus. Une raison pouvant être la proche association de ces résidus de faible épaisseur à la scorie qui pourrait venir augmenter le taux en fer lors des analyses. Ces résidus pourraient également provenir du sol qui se sont retrouvés piégés lorsque la scorie a été coulée et solidifiée au sol, qui pourrait expliquer la plus forte part de fer. Ils comportent fréquemment des grains de quartz. Ces résidus de sols/céramiques contiennent en éléments mineurs la présence de K_2O (2,8 %mass.), CuO (1 %mass.), TiO_2 (0,8 %mass.) et MgO (0,7 %mass.).

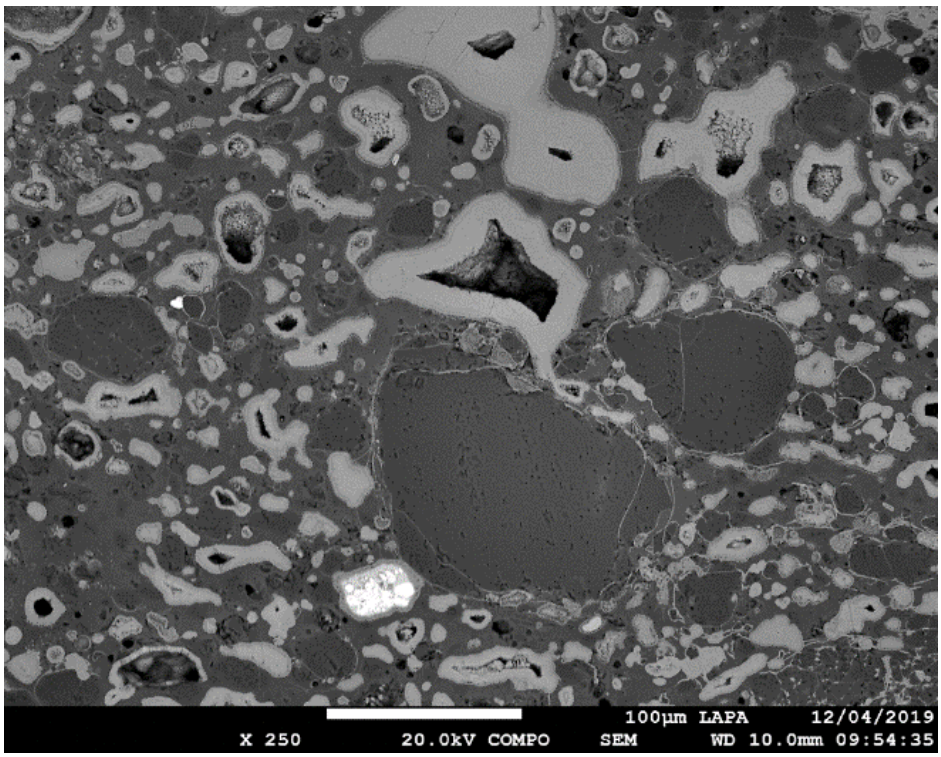


Figure 130 : Image en BSE au MEB-EDS (x250) d'un résidu de sol/céramique à la base de l'échantillon PBL/C16/3503/a.

Ensuite, on identifie la présence d'oxydes de fer ayant partiellement réagi, se présentant la plupart sous forme d'agglomérats de cristaux arrondis, dénotant une réaction partielle du grain d'origine. Pour un échantillon (PBL/B17/1/1/3301/b), on retrouve un oxyde de fer d'une morphologie angulaire (Figure 131) montrant qu'il n'a pas réagi et conserve sa morphologie d'origine avec une taille de 1500 µm en longueur. Il se compose de fer à 73 %mass.

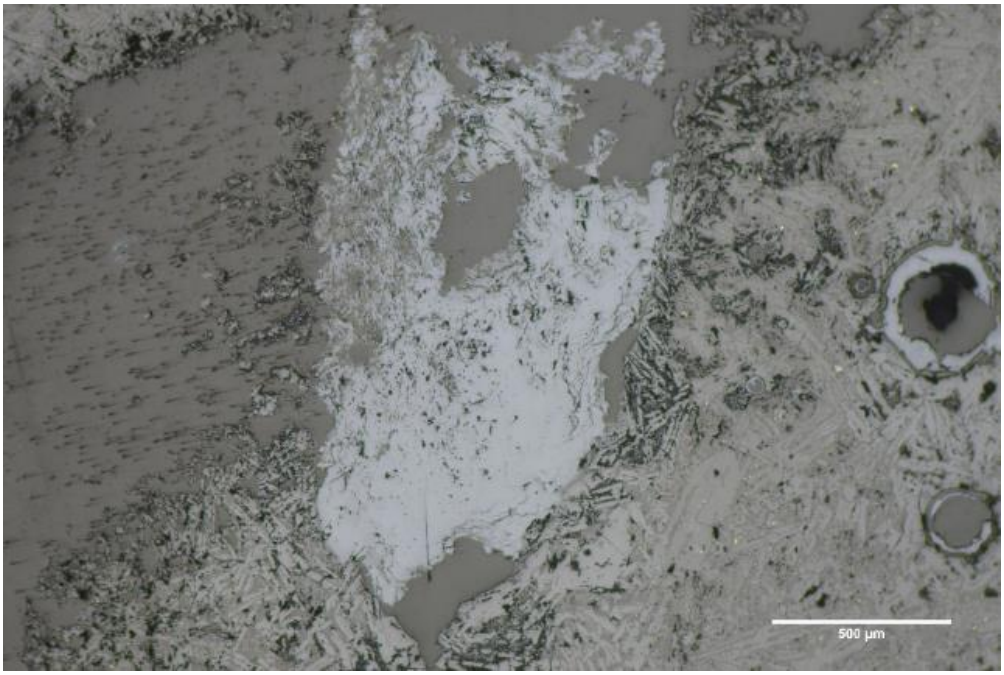


Figure 131 : Oxyde de fer résiduel dans l'échantillon PBL/B17/1/1/3301/b. Image MO (grossissement 5).

On observe un dernier type d'inclusions dans les scories : il s'agit de minerais de cuivre partiellement réduits, qu'on peut identifier grâce à leurs propriétés optiques et leur composition (Figure 132). Ils sont présents pour sept échantillons. Ce qui les distingue des inclusions de matte (qui elles, sont des phases néoformées) est leur morphologie angulaire dénotant que ces inclusions ne sont pas pleinement rentrées à l'état liquide. À cœur de ces minerais résiduels, on identifie principalement le minerai de chalcopyrite par sa couleur jaune et sa composition moyenne de cuivre (30 %mass.), soufre (29 %mass.) et fer (30 %mass.), ce qui correspond à sa stœchiométrie. Il est généralement associé à de la covellite (Figure 132 et Figure 133) qu'on identifie par sa couleur bleue. Des grains de bornite sont également présents en plus faible quantité (Figure 134 et Figure 135).

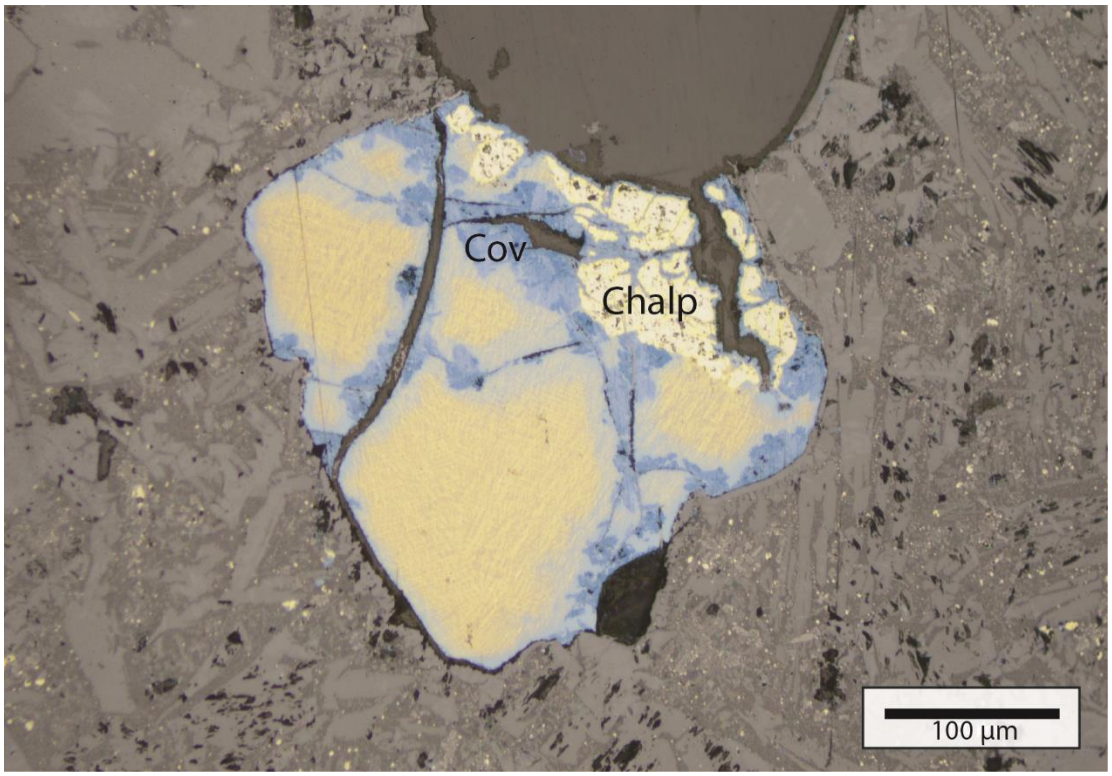


Figure 132 : Micrographie grossissement 20 montrant une inclusion partiellement réagie de chalcopyrite (Chalp), entourée par de la covellite (Cov) pour l'échantillon PBL/B17/1/1/3303/b.

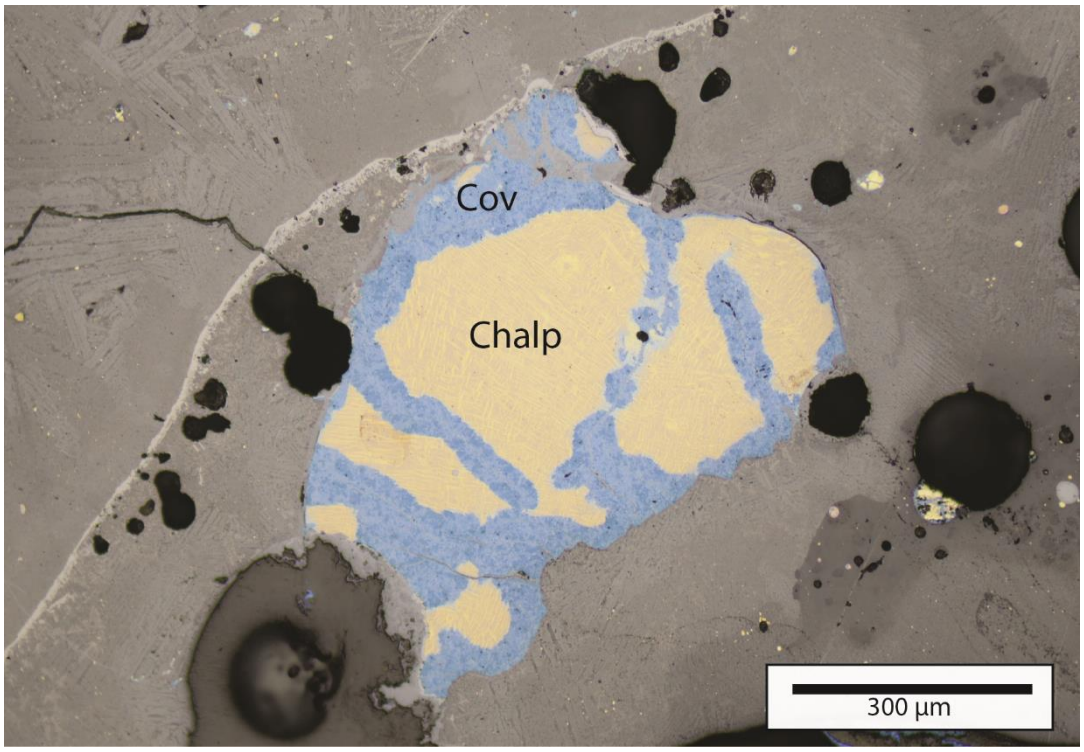


Figure 133 : Micographie grossissement 10 montrant une inclusion partiellement réagie de chalcopyrite (Chalp), entourée par de la covellite (Cov) pour l'échantillon PBL/E12/2/2/3218/b.

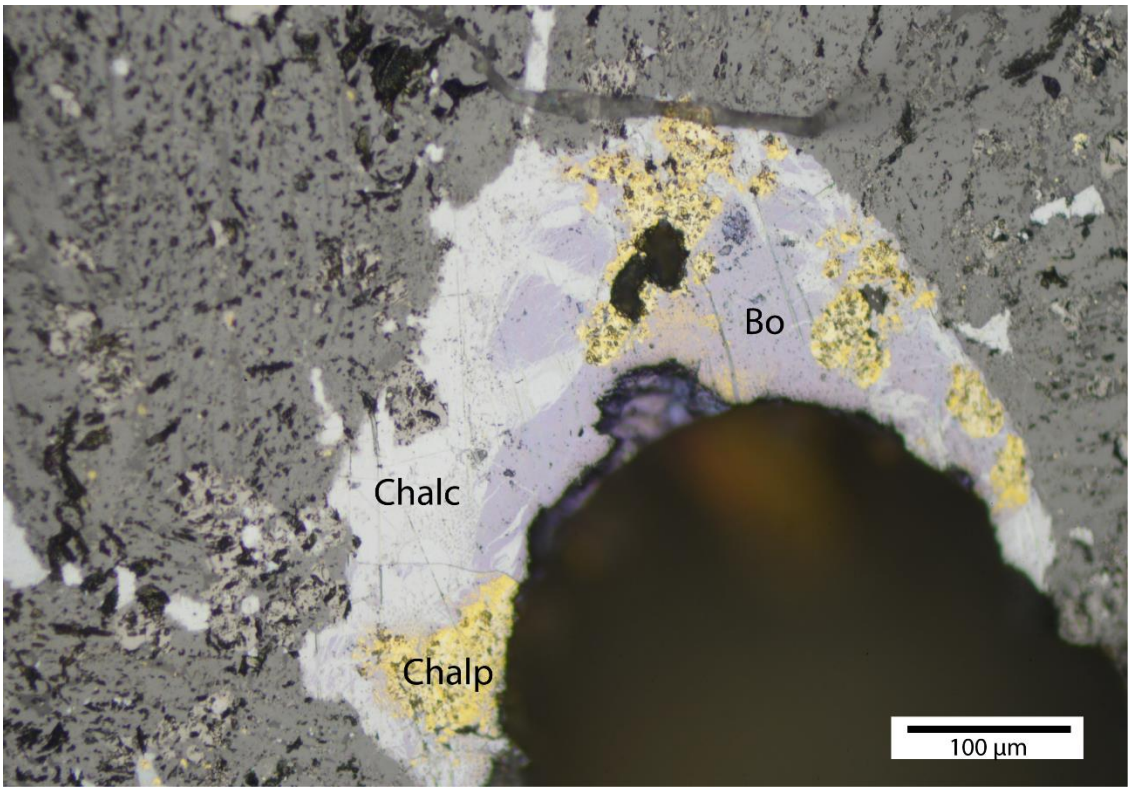


Figure 134 : Micrographie grossissement 20 montrant une inclusion de minerai partiellement réduit composée de chalcopyrite (Chalp), de chalcocite (Chalc) et de bornite (Bo) pour l'échantillon PBL/C17/1/1/3117/a.

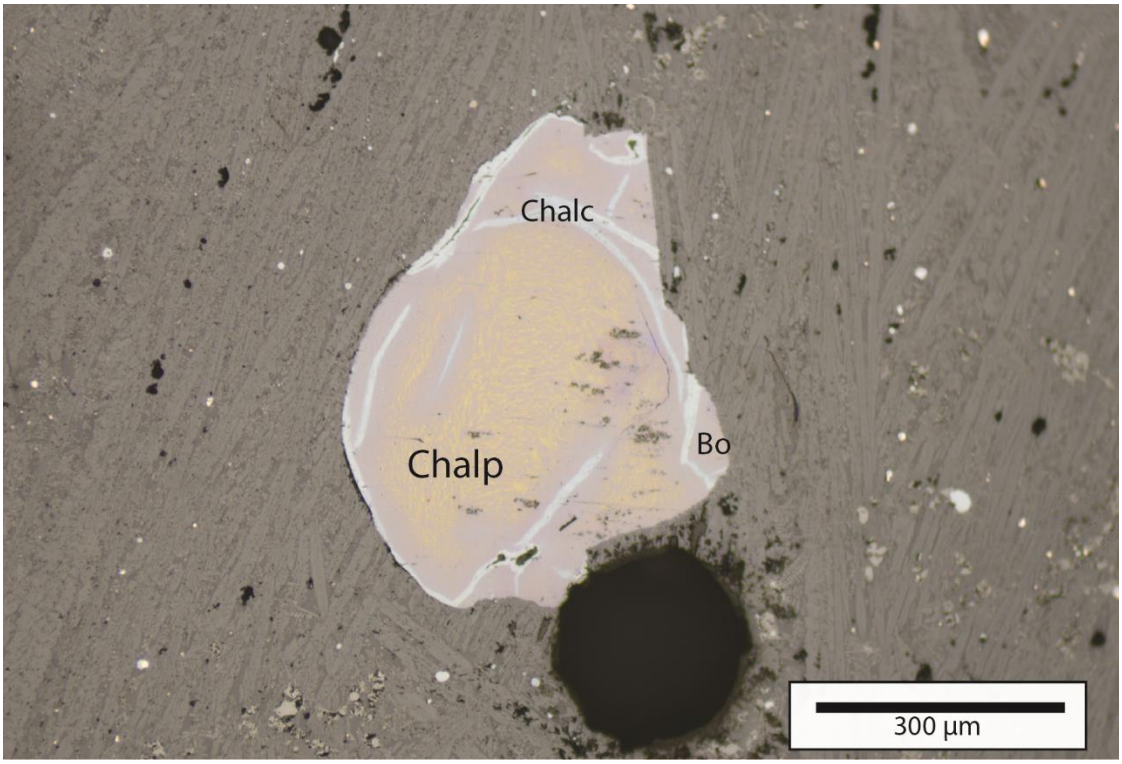


Figure 135 : Micrographie grossissement 10 montrant une inclusion de minerai partiellement réduite de bornite (Bo), chalcopyrite (Chalp) et chalcocite (Chalc) pour l'échantillon PBL/C17/1/1/3117/b.

Ces différents minéraux sont caractéristiques de la charge d'origine. Les grains de quartz et les oxydes de fer proviendraient de la gangue des minerais ou du matériau composant le

réacteur. Il n'est pas non plus à exclure qu'un des deux ait pu être ajouté en tant que fondant, principalement l'oxyde de fer. Les minerais résiduels représentent eux les type(s) de minerai(s) réduits lors du processus. La chalcopyrite est ici le principal minerai résiduel identifié, ainsi que la bornite, mais leur présence est trop faible pour pouvoir argumenter sur un procédé utilisant principalement ces minerais complexes. En tout cas, on peut au moins dire qu'ils étaient présents, en minorité, dans le(s) minerai(s) utilisé(s).

Parce que nous avons des scories homogènes, les minéraux résiduels identifiés sont peu nombreux. Le peu disponible ne permet pas d'identifier une tendance principale dans la charge, par exemple sur l'ajout de tel minéral en tant que fondant ou de tel minerai.

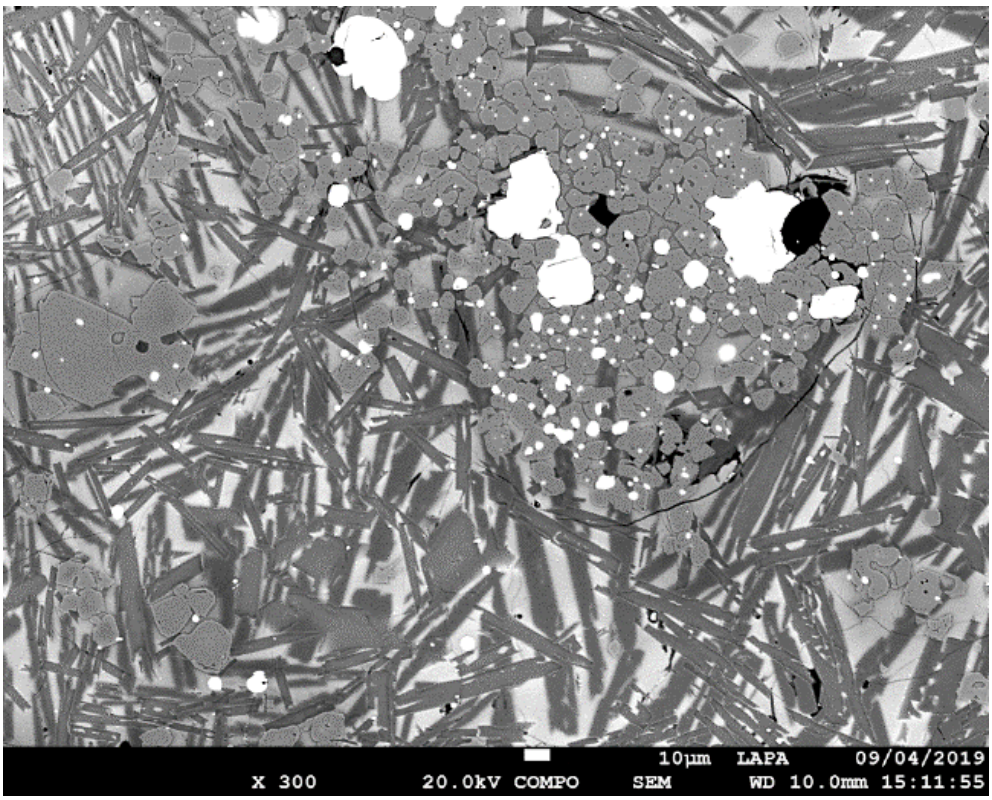


Figure 136 : Image en BSE au MEB-EDS (x300) de l'échantillon PBL/C14/1/4/7205/a qui est riche en oxyde de baryum.

Pour finir, on compte des scories avec une composition en marge de ce qu'on a pu voir jusqu'ici. Il s'agit d'une scorie contenant des taux élevés de baryum ($BaSO_4$; PBL/C14/1/4/7205/a) et des scories contenant une phase supplémentaire avec du potassium (PBL/C17/1/2/a, PBL/CC14/3/7116/c, PBL/D13/3729/1709 et PBL/S9/2/2/5505/b). La scorie avec des taux élevés de baryum (moyenne de 5,8 %mass.) contient de la baryte ($BaSO_4$) qu'on identifie par la composition (Figure 136). Étant le seul échantillon contenant un taux si élevé d'oxyde de baryum, sa présence est donc anecdotique. Elle est probablement issue d'une charge contenant un minerai riche en baryte. On retrouve fréquemment des cristaux de baryte résiduels dans les scories de PBL, très éparses, mais cela confirme donc que les minerais

employés en contenaient une faible proportion. De plus, de faibles taux en oxydes de baryum sont assez fréquemment détectés dans la phase vitreuse des scories. Nous avons vu en partie II.2 que de la baryte secondaire était fréquemment rencontrée dans la géologie de Vilabouly, ce qui expliquerait aisément sa présence dans certaines scories.

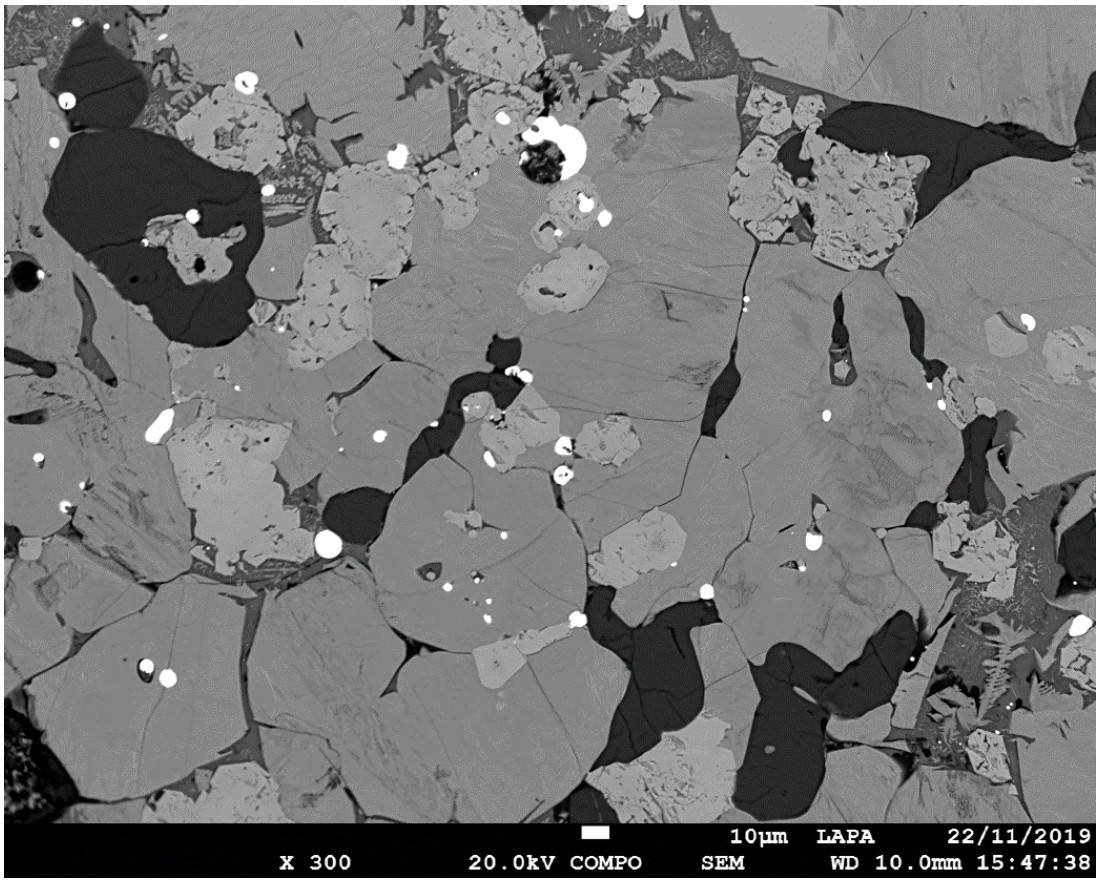


Figure 137: Image en BSE au MEB-EDS (x300) et micrographie (grossissement 20) d'un échantillon (PBL/CC14/3/7116/c) où la leucite ($KAlSi_2O_6$) a été identifiée (phase noire).

En revanche, la phase supplémentaire contenant du potassium est moins anecdotique puisqu'on la retrouve pour quatre échantillons, où elle n'est pas majoritaire, mais tout de même présente en quantité remarquable (Figure 137). Cette phase se caractérise par une forme arrondie de couleur grise/noire et se compose en moyenne de Si (27,5 %mass.), K (15,3 %mass.) et Al (12 %mass.) avec des composés mineurs de Fe (1,8 %mass.) et Ba (0,5 %mass.). Elle a été identifiée comme étant une potentielle phase cristallisée de leucite ($KAlSi_2O_6$), par sa composition et sa morphologie.

2. Thong Na Nguak

A. Silicates

La microstructure des scories de Thong Na Nguak est également dominée par la présence d'olivines ferreuses de type fayalite (Fe_2SiO_4) comme dans le cas de Puen Baolo. Les olivines ferreuses sont identifiées par des taux moyens (sur plusieurs zones d'analyses pour l'ensemble

des scories) de Fe à 44 %mass. et Si à 14 %mass., ainsi que leur morphologie. De plus, ils possèdent des coefficients de variations bas de 11 et 6%. La cristallisation des olivines est observée pour tous les échantillons, excepté un (DF/1-A/138/a). Les morphologies observées sont en squelette (Figure 138 et Figure 139), en plume et en polyèdre (Figure 140), avec des tailles et formes de cristaux variables d'un échantillon à l'autre et au sein d'un même échantillon.

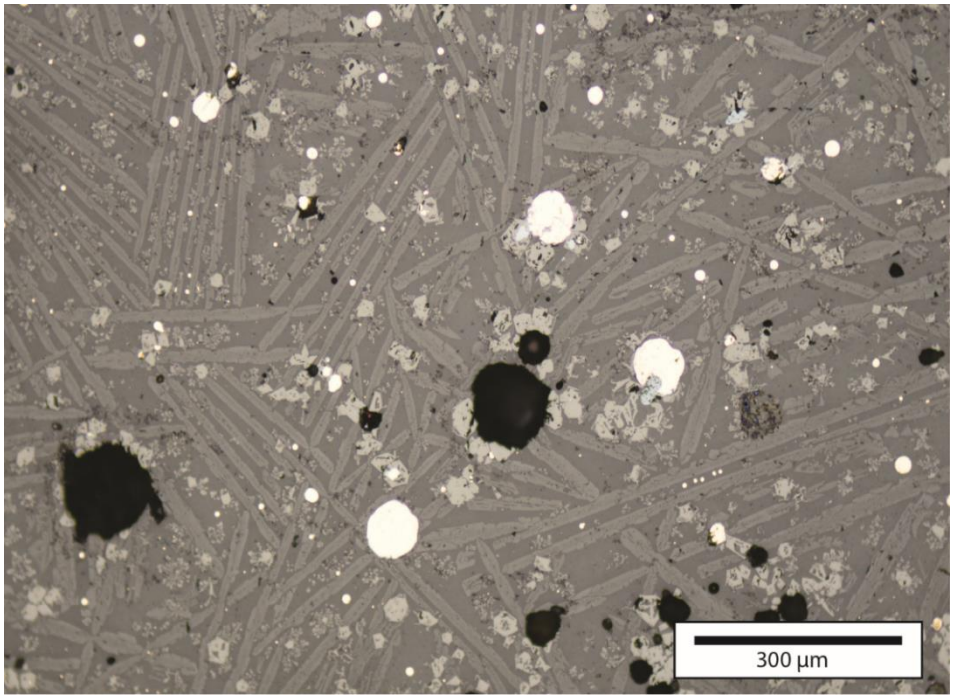


Figure 138 : En haut, à gauche micrographie (grossissement 10) d'une scorie avec des olivines en squelette pour l'échantillon DF/1-A/4/165/b.

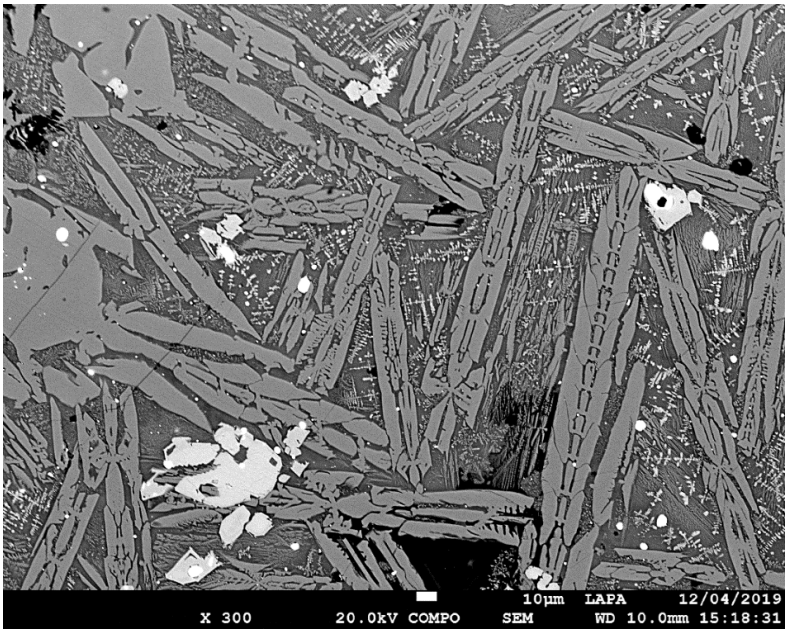


Figure 139 : Image BSE au MEB-EDS montrant la cristallisation des olivines ferreuses en squelette pour l'échantillon DF/A/133.

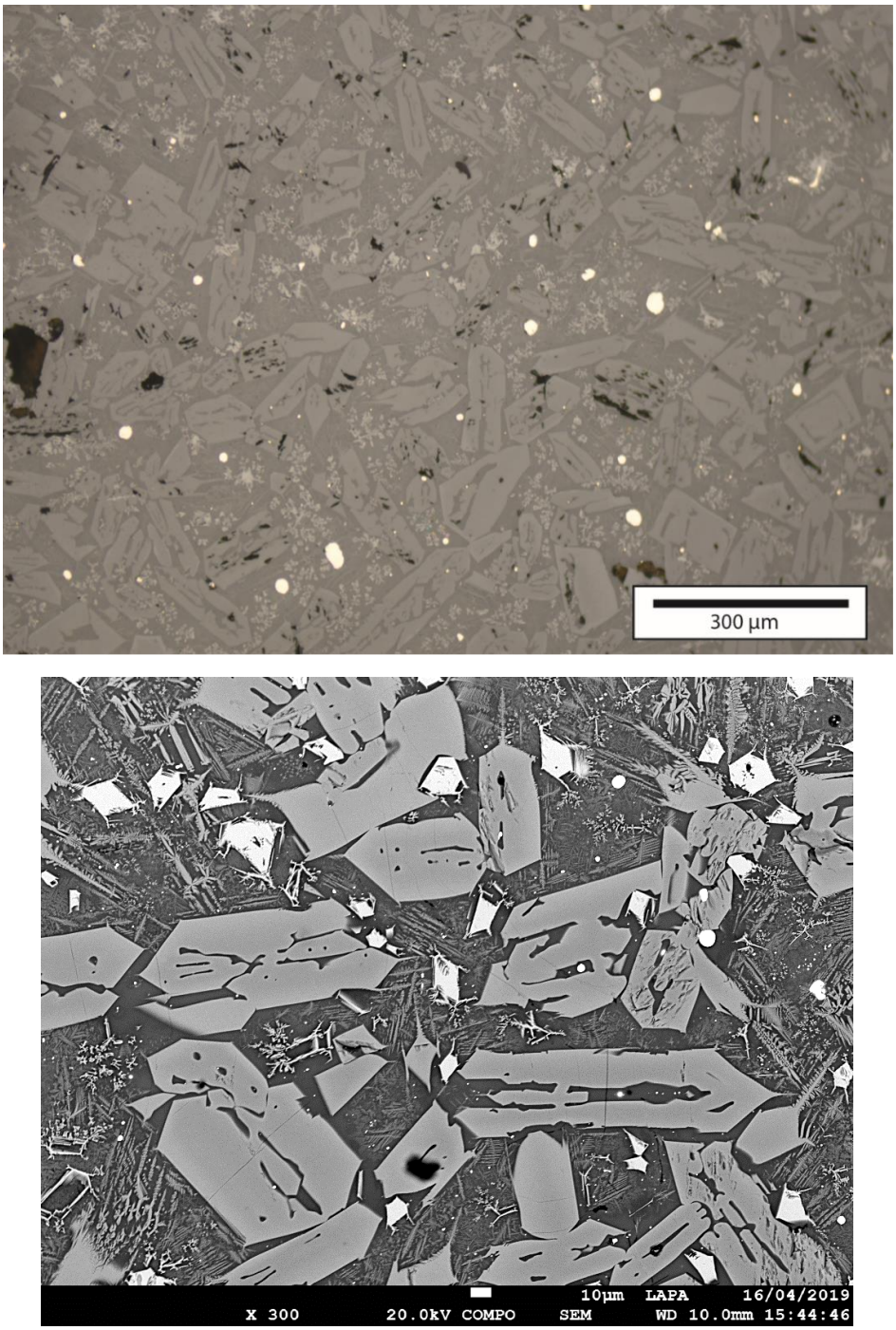


Figure 140 : En haut, micrographie grossissement 20 et en bas image en BSE au MEB-EDS montrant la cristallisation des olivines ferreuses en polyèdre pour l'échantillon DF/1-A/4/165/a.

On trouve ensuite la présence d'éléments mineurs dans les phases d'olivines. En particulier le manganèse en moyenne de 6 %mass., le magnésium à 1 %mass., le zinc à 1 %mass. et l'aluminium à 0,6 %mass. qui sont variables d'un échantillon à l'autre avec des coefficients de variations relativement élevés de 118% pour Mg, 157% pour Al, 72% pour Mn et 61% pour Zn. Les taux en Mg détectés sont plus élevés pour deux échantillons, DF/1-A/165/a et b avec 4 et 3 %mass. Ces deux échantillons possèdent également des taux de Mg globaux plus élevés que

les autres scories de TNN. Ces taux pourraient signifier la présence de composés de type forstérite (Mg_2SiO_4) à cœur des cristaux, comme dans le cas de PBL.

Échantillon	Type	Olivine	Oxyde de fer	Verre	Inclusion métallique	Autres	SO_3	Comment
DF_1_2_2_43	grossière	Fa (P+S)	Ma (P)	Faible	CuS (chalc), Cu	Leucite	0,7	ZnO, MnO
DF_1_A_2_40	grossière	Fa (S+F)	Ma (P,B,A)	Médium	CuS (chalc, cov)		0,72	ZnO, MnO
DF_1_A_4_165_b	grossière	Fa (S+F)	Ma (P)	Medium	Cu, CuS (chalc)	FeO res	0,17	
DF_1_A_4_133	plate	Fa (P+S)	Ma (P)	Medium	Cu, CuS (chalc)	FeO res	0,27	ZnO, MnO
DF_1_A_4_165_a	grossière	Fa (P+S)	Ma (P,D)	Médium	Cu		0,05	
DF_1_A_138_a	grossière	None	Ma (D)	Majoritaire	Cu	Cu-Si-Al	0,05	ZnO, MnO
DF_1_A_138_b	grossière	Fa (S+F)	Ma (P)	Médium	Cu		0,07	ZnO, MnO
DF_1_B_2_42	grossière	Fa (S)	Ma (P,D,B)	Medium	Cu, CuS (chalc)	FeO res	0,1	ZnO, MnO
DF_1_B_3_93_a	plate	Fa (F+S)	Ma (P)	Medium	Cu métal, CuS (chalc)		0,25	ZnO, MnO
DF_1_B_3_93_b	grossière	Fa (S)	Ma (D,P)	Médium	CuS (cov, chalc), Cu	Barite	0,38	ZnO, MnO
DF_1_C_3_8_c	grossière	Fa (F)	Ma (D,P)	Majoritaire	Cu, CuS (chalc)	FeO res	0,36	ZnO, MnO
DF_1_D_3_99	grossière	Fa (S)	Ma (P)	Médium	CuS (chalc, cov)	Barite	0,38	ZnO, MnO
DF_1_E_2_39	plate	Fa (S)	Ma (P)	Altéré	CuS (chalc, cov)		0,19	ZnO, MnO

Tableau 33 : Caractéristiques microscopiques des scories de Thong Na Nguak. Abréviations : Fa= fayalite, Ma=magnétite, CuS=Sulfures de cuivre, Cu= cuivre métallique, P=polyèdre, S=Skeletal, F=feather, A=aiguille, B=magnétite en bande, D=dendrite, chalc=chalcocite, cov=covellite.

B. Oxydes de fer

La seconde phase majeure des scories de Thong Na Nguak est composée de fer à 65 %mass. (moyenne sur plusieurs zones d'analyses pour l'ensemble des échantillons) qu'on associe donc à un oxyde de fer, la magnétite (Fe_3O_4). On retrouve la magnétite sous plusieurs morphologies et tailles de cristaux, principalement en polyèdre (Figure 141), assez fréquemment en dendrite, mais également en bande (Figure 142) et de forme aciculaire (Figure 143). La wüstite n'a été observée pour aucun des échantillons de TNN.

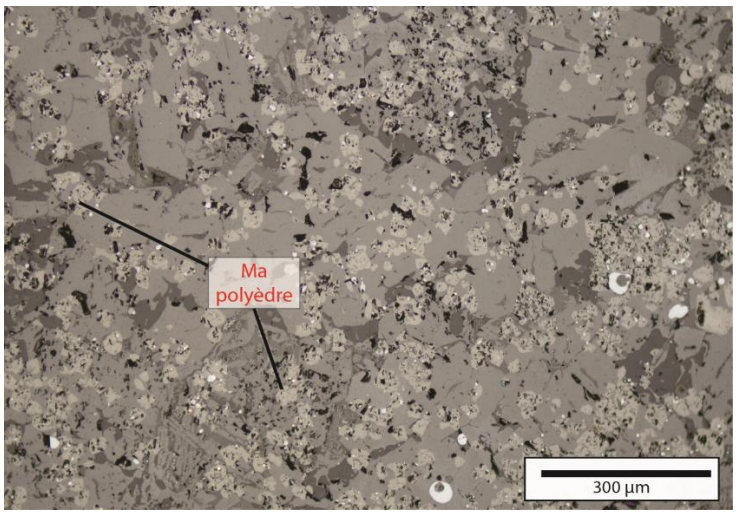


Figure 141 : Micrographie (grossissement 10) avec de la magnétite en polyèdre pour l'échantillon DF/1/2/2/43.

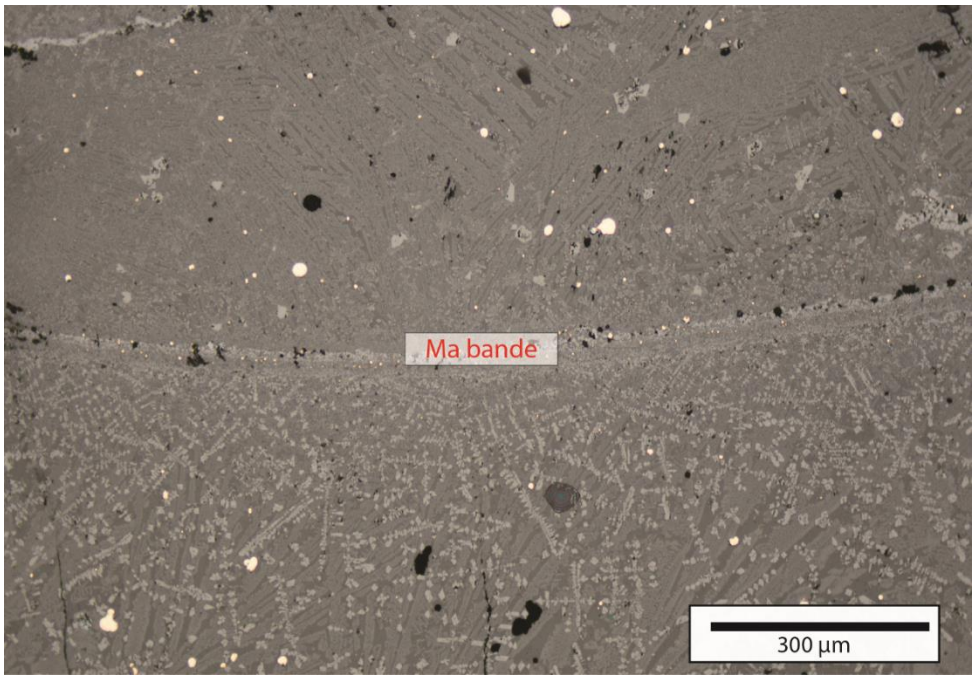


Figure 142 : Micrographie grossissement 10 montrant la présence de magnétite en bande pour l'échantillon DF/1/B/2/42.

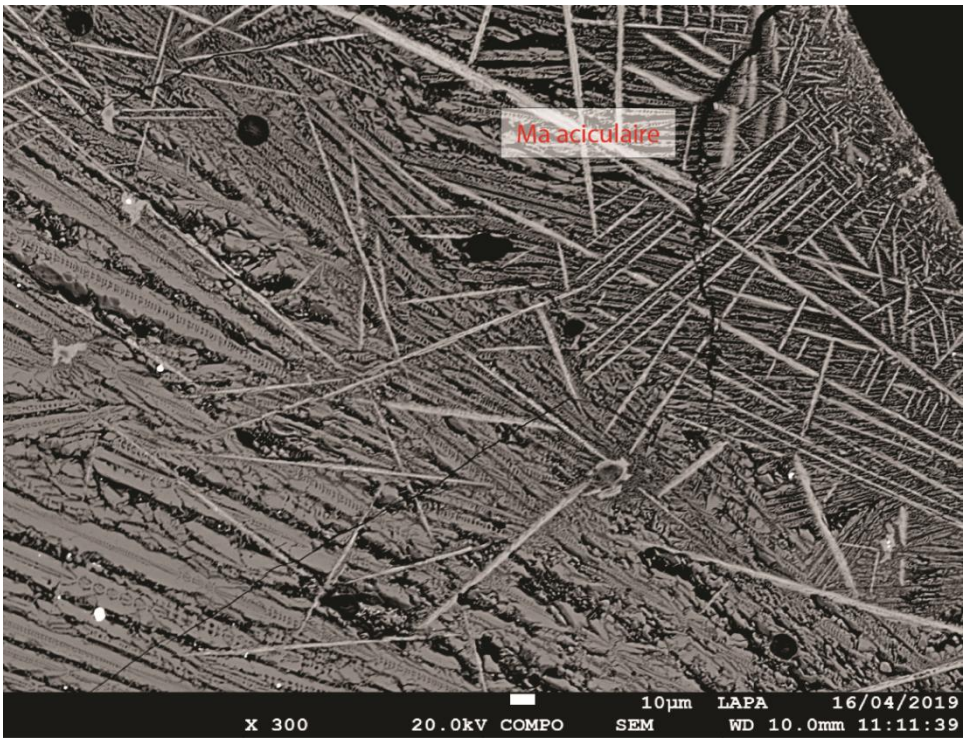


Figure 143 : Image en BSE au MEB-EDS (x300) montrant la présence de magnétite aciculaire sur un bord de la scorie DF/1/A/2/40.

Les oxydes de fer se retrouvent également sous forme d'agglomérats ayant conservés la forme de leur minéral d'origine (Figure 144), parfois incomplètement réagi comme dans le cas de DF/1-C/3/8/c. Ensuite, on retrouve la présence de composés mineurs, avec Al à 5 %mass. en moyenne, Mn à 2 %mass., Si à 1 %mass., Zn à 2 %mass. et Ti à 1 %mass. La présence d'aluminium à cœur de certains cristaux de magnétite s'observe plus largement dans le cas des scories de TNN. En effet, pour 5 échantillons (DF/1-2/2/43, DF/1-A/2/40, DF/1-B/3/93/a, DF/1-B/3/93/b et DF/1-D/3/99), les taux en Al détectés sont supérieurs à 7%mass., et pour les autres échantillons sont tout de même présents entre 2 et 7 %mass. La présence du composé type hercynite ($FeAl_2O_4$) est donc plus fréquente dans le cas des scories de TNN.

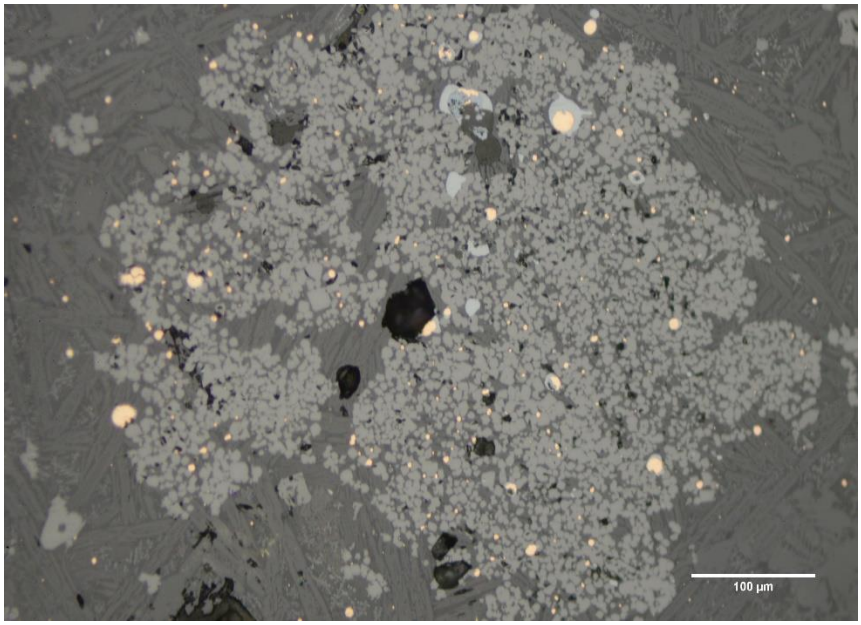


Figure 144 : Micrographie (grossissement 20) illustrant la présence d'oxydes de fer ayant conservés la structure de leur grain d'origine pour l'échantillon DF/1/A/4/133.

C. Verre

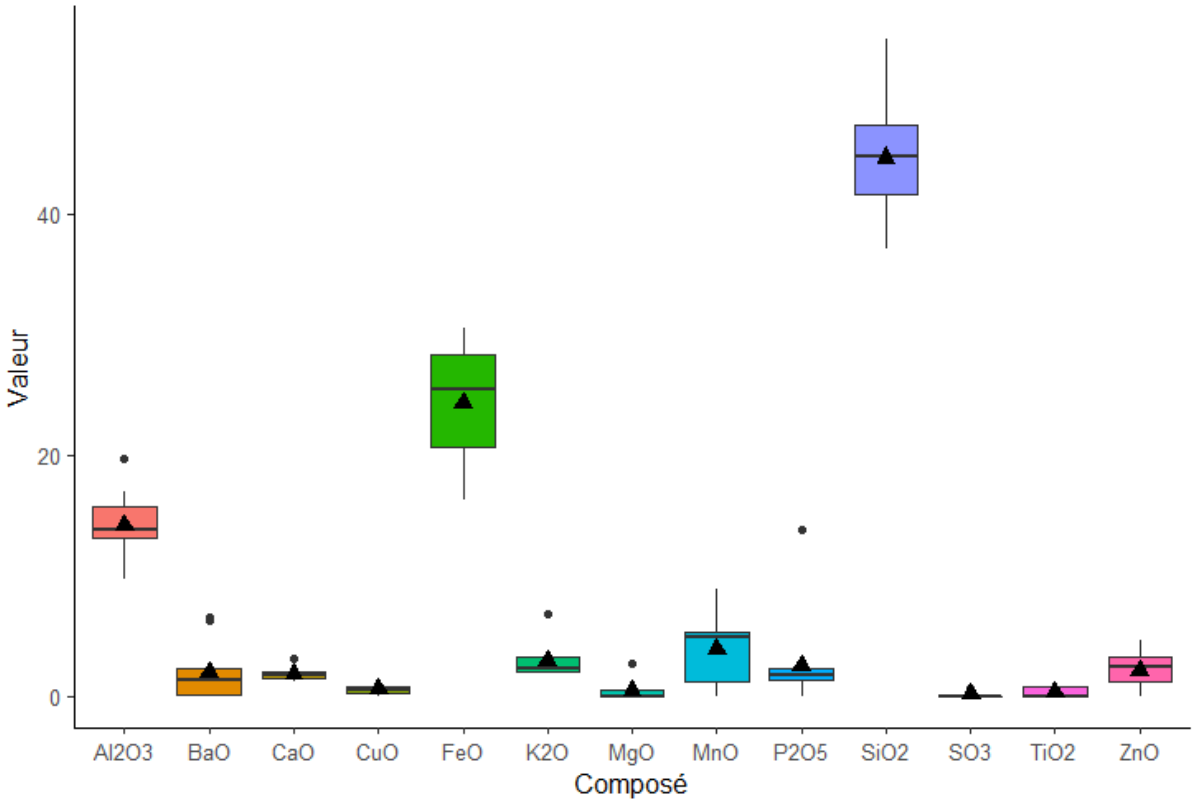


Figure 145 : Diagramme en boite représentant les teneurs moyennées sur plusieurs zones d'analyses de la phase vitreuse pour l'ensemble des scories de TNN (%mass.) au MEB-EDS (n=11). Les triangles noirs représentent les teneurs moyennes pour chaque composé.

Le verre des scories de TNN est composé en majorité de SiO_2 (45 %mass.), FeO (24 %mass.) et Al_2O_3 (14 %mass., Figure 145) qui sont peu variables avec des coefficients de variations de 11, 21 et 21% respectivement. Ensuite, on trouve des composés mineurs MnO (4 %mass.), K_2O (3 %mass.), P_2O_5 (3 %mass.), ZnO (2 wt), BaO (2 %mass.), CaO (2 %mass.) et CuO (0,5 %mass.). Les coefficients de variations observés pour les composés mineurs sont élevés, avec MnO (79%), K_2O (49 %mass.), P_2O_5 (150%), ZnO (69%), BaO (118%), CaO (29%) et CuO (79%). Les coefficients de variations observés pour les composés mineurs sont moins élevés que pour leurs correspondants dans le verre de PBL. Comme dans le cas de la composition globale des scories, ces variations moins élevées pourraient signifier que ces éléments étaient présents de manière plus homogène dans les charges utilisées à TNN.

D. Inclusions métalliques

Les scories de Thong Na Nguak contiennent deux types d'inclusions métalliques, contrairement à celles de Puen Baolo pour lesquelles on a pu en différencier trois. Tout d'abord des inclusions sphériques brillantes au microscope optique et composées en

moyenne de cuivre à 95 %mass.[34]. Ces inclusions sont donc associées à du cuivre métallique. Le deuxième type d'inclusion est également de forme sphérique, de couleur bleue/grise, avec une composition moyenne de cuivre à 77 %mass. et de soufre à 19 wt %. Ces inclusions sont associées à des sulfures de cuivre secondaire, chalcocite et covellite, qu'on peut nommer matte par leur morphologie (Figure 146).

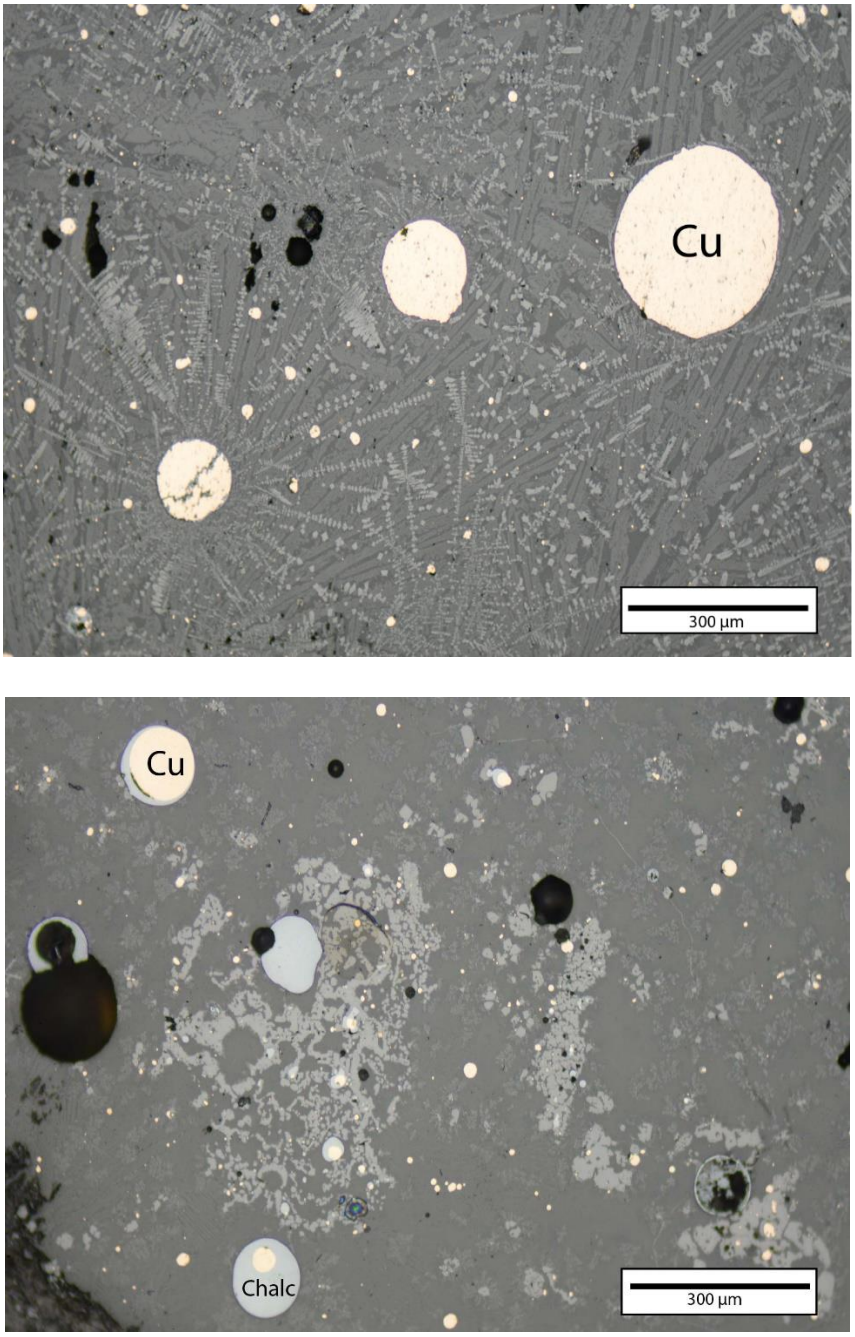


Figure 146 : Micrographies (grossissement 10) illustrant les différents types d'inclusions métalliques rencontrés dans les scories de TNN, en haut, cuivre métallique (Cu) et en bas, la chalcocite (Chalc) et le cuivre métallique (Cu) pour les échantillons DF/1/B/2/42 et DF/1/C/3/8/C respectivement.

[34] Le restant se compose d'oxygène et de fer lorsqu'il est présent. Certaines inclusions analysées avaient des produits de corrosion liés à leur altération.

Ces inclusions de matte, également de forme sphérique, montrent qu'elles ont atteint l'état liquide. Contrairement à PBL, les sulfures de cuivre complexes, type chalcopyrite, ne sont pas identifiés (Figure 147).

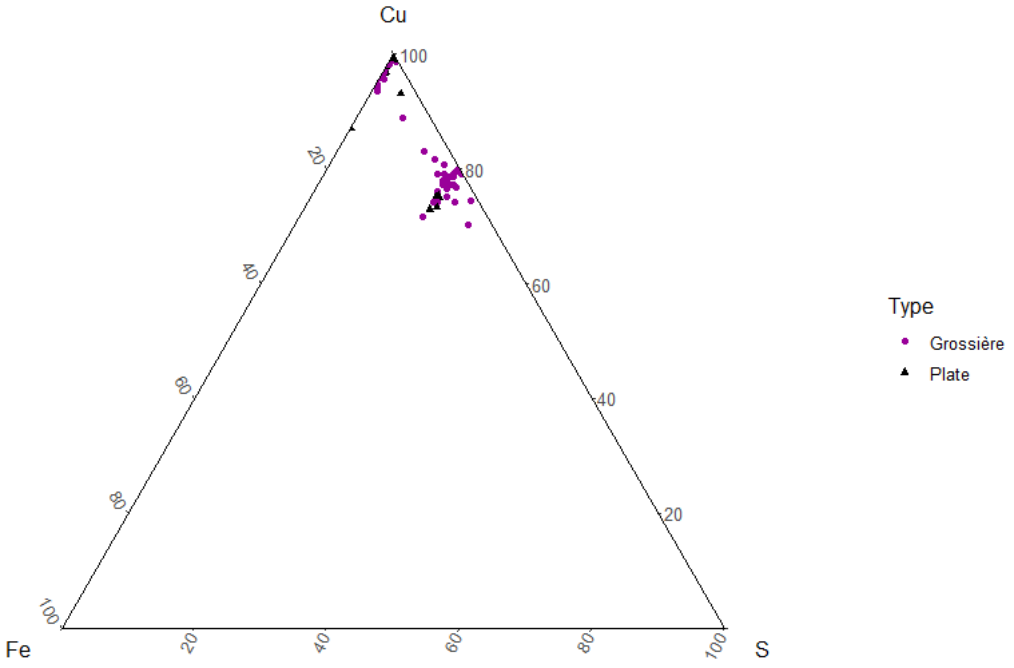


Figure 147 : Compositions (%mass.) obtenues au MEB-EDS des différentes inclusions des scories de Thong Na Nguak (n=73).

E. Autres

Tout comme dans le cas des scories de PBL, on identifie par endroits la présence d'autres composés/minéraux résiduels dans les scories de TNN. Premièrement, des oxydes de fer résiduels, qui comme à PBL se présentent sous la forme d'agrégats arrondis ayant partiellement réagi. Ensuite, on retrouve également des cristaux de baryte ; très éparses. Comme pour PBL, un échantillon contient une phase supplémentaire riche en potassium qu'on peut associer à de la leucite (DF/1/2/2/43). En revanche aucun minerai résiduel n'a pu être identifié dans les scories de TNN.

V.3.4. Comparaison entre les scories macroscopiques et les scories adhérentes aux creusets

Après avoir décrit les différentes caractéristiques des scories de PBL et de TNN, nous allons maintenant pouvoir comparer la composition des scories macroscopiques à celle des scories adhérentes aux creusets, présentées en partie V.2. Il va s'agir de voir si certaines hypothèses, établies à la suite de l'étude des creusets, peuvent se rapprocher des observations faites pour les scories macroscopiques. Notamment, pour définir si elles peuvent appartenir à la même étape de la chaine opératoire, à savoir ici la réduction. Pour cela nous avons comparé la composition globale moyenne, obtenue au MEB-EDS, des scories adhérentes aux creusets et des scories macroscopiques dans un diagramme ternaire SiO_2-FeO-Al_2O_3, étant les composés majeurs pour PBL et TNN.

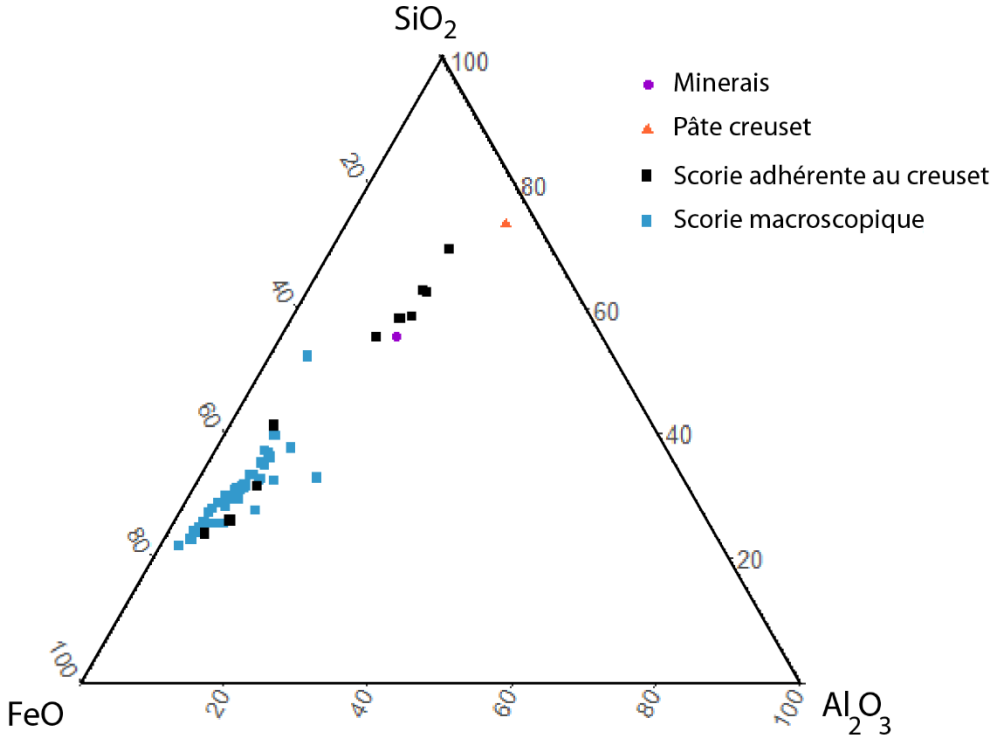


Figure 148 : Comparaison des compositions moyennes en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 des scories macroscopiques (bleu) et des scories adhérentes aux creusets (noir) pour PBL, ainsi que la composition moyenne en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 de la pâte céramique des creusets. Données obtenues par aire d'analyse (x300) au MEB-EDS.

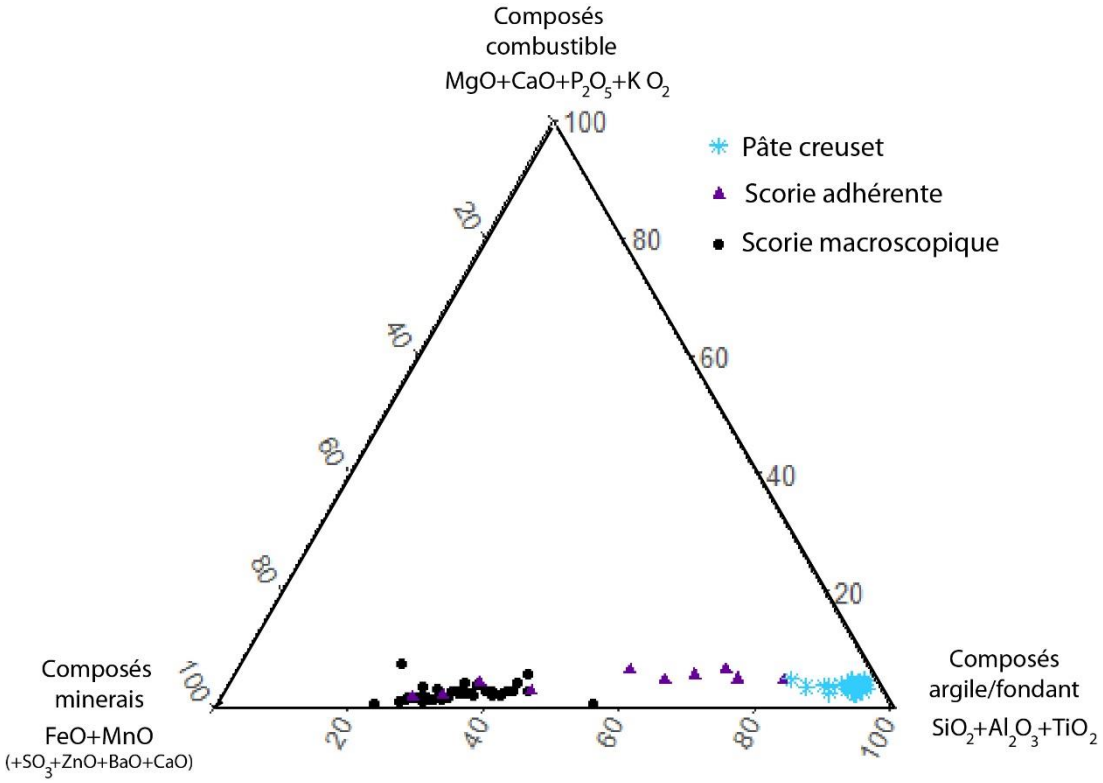


Figure 149 : Diagramme ternaire reprenant les données des scories macroscopiques, de la pâte des creusets et des scories adhérentes aux creusets de PBL afin d'évaluer la potentielle contribution des composés issus des minerais, du combustible ou de l'argile/fondant (données au MEB-EDS, %mass.).

La comparaison des scories macroscopiques et adhérentes aux creusets pour PBL (Figure 148) confirme les observations faites sur les scories adhérentes aux creusets en partie V.2. À savoir qu'on identifie deux types de scories différents : scories vitreuses riches en cuivre et des scories de type fayalite. On voit bien qu'ici un de ces deux types, correspondant aux scories de type fayalite, est comparable à la composition globale des scories macroscopiques. Cette correspondance se retrouve également au niveau de la microstructure, car on identifie globalement les mêmes phases : fayalite, magnétite, phase vitreuse, inclusions de cuivre métallique et sulfures de cuivre (chalcocite et covellite). Cette correspondance pourrait venir conforter l'hypothèse de l'utilisation des creusets durant l'étape de réduction. Le second type de scories (vitreuses, riches en cuivre) appartient vraisemblablement au même procédé, mais implique une variation de charge et/ou de conditions, ainsi qu'une contribution plus forte de la pâte céramique (Figure 149).

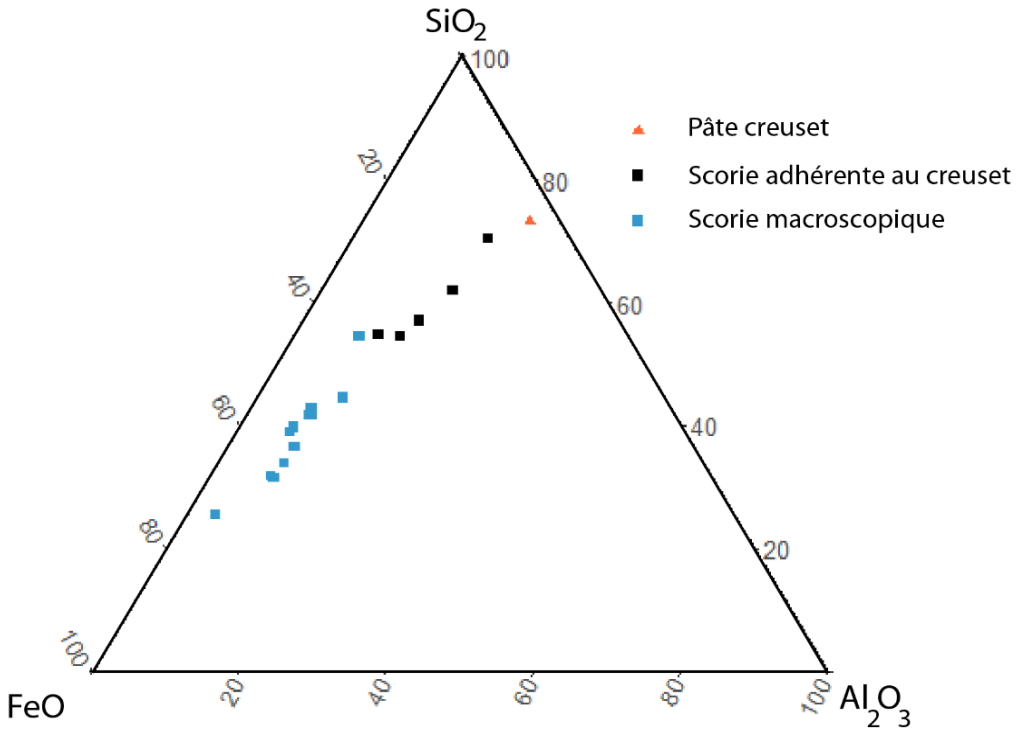


Figure 150 : Comparaison des compositions moyennes en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 des scories macroscopiques (bleu) et des scories adhérentes aux creusets (noir) pour TNN, ainsi que la composition moyenne en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 de la pâte céramique des creusets. Données obtenues par aire d'analyse (x300) au MEB-EDS.

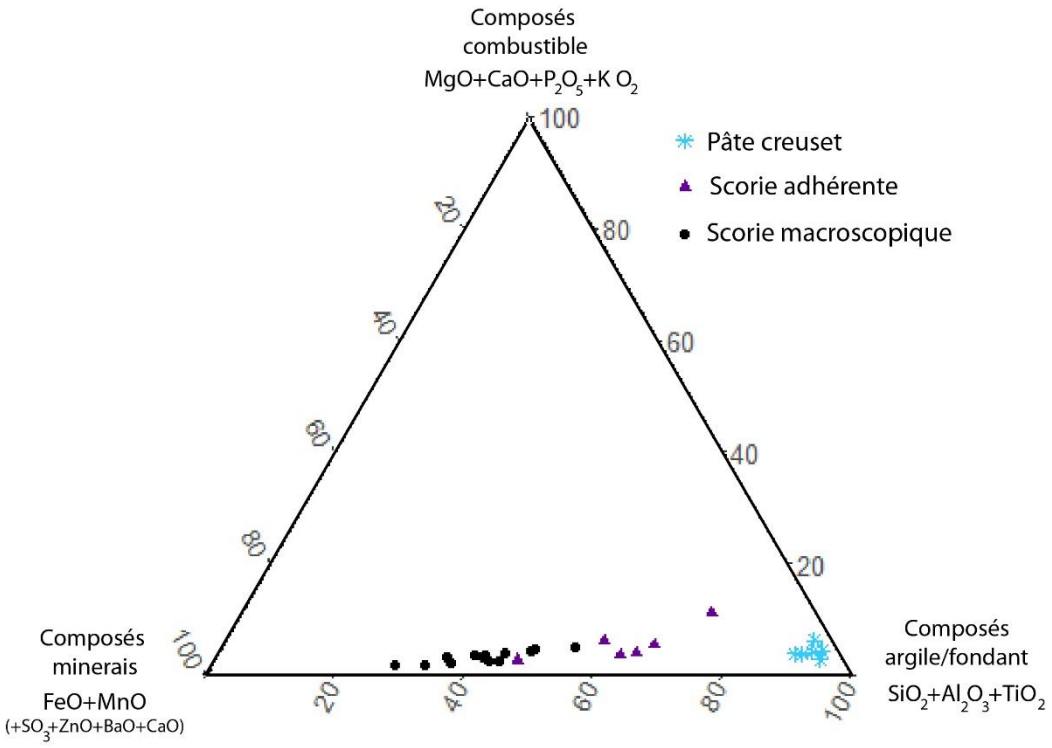


Figure 151 : Diagramme ternaire reprenant les données des scories macroscopiques, de la pâte des creusets et des scories adhérentes aux creusets de TNN afin d'évaluer la potentielle contribution des composés issus des minerais, du combustible ou de l'argile/fondant (données au MEB-EDS, %mass.).

Si on réalise la même démarche pour TNN (Figure 150 et Figure 151), on remarque que cette correspondance n'est pas si marquée. En effet, les scories macroscopiques de TNN peuvent être qualifiées de scories de type fayalitique, alors que les scories adhérentes aux creusets appartiennent au type des scories vitreuses riche en cuivre, comme on avait pu l'identifier en partie V.2. Dans le cas de TNN, il ne peut pas être conclu avec certitude que les creusets rentraient en jeu dans le processus de réduction. Dans le sens où ici il est difficile de rapprocher les scories macroscopiques issues d'une réduction, aux scories adhérentes aux creusets.

En observant les deux diagrammes ternaires, on peut remarquer une corrélation entre les scories indépendantes et les scories adhérentes au creuset, plus particulièrement visibles dans le cas de TNN (Figure 151). Cet alignement pourrait refléter la contribution d'une part de la pâte des creusets à la formation de ces scories. On observe une diminution du taux de silice dans les scories indépendantes et une augmentation du taux d'oxydes de fer par rapport aux scories adhérentes, ainsi qu'un taux d'oxyde d'aluminium plus bas. Les résultats sur les creusets semblent suggérer que l'oxyde de fer provient d'un ajout externe, puisque le taux se trouve plus élevé dans les scories que dans la pâte. En revanche, on peut percevoir une contribution des deux autres composés de la pâte, silice et oxyde d'aluminium, à la formation des scories vitreuses. De plus, nous avons vu que les creusets se trouvaient dégradés par la

chauffe et réagissaient avec la charge. La charge ajoutée au creuset durant l'opération semble donc plus riche en oxyde de fer.

V.3.5. Bilan

L'observation macroscopique des scories du Complexe de Vilabouly a permis de définir trois types : *plate*, *massive* et *grossière*. Cette typologie est plus particulièrement adaptée aux scories de PBL, pour lesquelles on dispose d'un assemblage plus important. La majorité correspond aux scories dites *plates* présentant des caractéristiques homogènes en section. Elles présentent très peu d'inclusions macroscopiques de minéraux ayant partiellement ou non réagi comme cela peut être le cas pour des scories du chalcolithique par exemple (D. Bourgarit, 2007). Certaines scories présentent, sur une de leur face, un faciès dit en peau de lait. Elles sont perçues comme solidifiant rapidement au-dessus d'un autre liquide en fusion (températures de fusion : 1088°C-1148°C). Toutes ces caractéristiques en tête, la majorité des scories de Vilabouly correspond donc au type des *plattenschlacke* dont nous reparlerons en partie VII.3.

Les résultats de composition élémentaire et en microscopie confirment la grande homogénéité des scories de Vilabouly, avec très peu de minéraux ayant partiellement/non réagi. On observe tout de même des fluctuations dans les taux de silice et d'oxydes de fer, pouvant indiquer que ces deux composés étaient présents de façon variable dans la charge. Elles sont composées en majorité de fayalite (Fe_2SiO_4), magnétite (Fe_3O_4) dans une phase vitreuse accompagnée d'inclusions de cuivre métallique et de sulfures de cuivre de différentes natures. La présence majoritaire de cristaux de fayalite et de magnétite associées est représentative de la plupart des scories de réduction anciennes (H. G. Bachmann, 1982; A. Hauptmann, 2007; T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016). Les scories analysées ici peuvent donc être qualifiées de scories de réduction de cuivre. La présence de ces deux phases, fayalite et magnétite, indique des conditions réductrices avec un équilibre entre les oxydes ferreux et ferriques, nécessaires pour la réduction des oxydes de cuivre en cuivre métallique.

La composition de la majorité des scories tombe dans la vallée eutectique de la fayalite, entre les deux points eutectiques optimums à 1088°C et 1148°C (T. Rehren et al., 2007; M. F. Charlton et al., 2010). Cela signifie que la charge et les conditions étaient maîtrisées afin d'obtenir des scories de cette composition. Elles sont connues aujourd'hui pour être optimales dans une bonne séparation du cuivre métallique. Ce qui est confirmé ici par les faibles taux en cuivre résiduel moyen identifiés. De plus, les fluctuations en fer et en silice observées pourraient matérialiser une volonté des anciens métallurgistes d'adapter leur charge, par un

ajout plus ou moins important de gangue, par exemple, ou l'ajout d'un fondant (oxydes de fer).

La présence d'inclusions de cuivre métallique et de matte est fréquente dans les scories archéologiques (A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003; A. Hauptmann, 2007). De plus, la présence de différents types d'inclusions métalliques apporte également un certain nombre de réflexions sur la charge d'origine. En effet, on en identifie trois types : du cuivre métallique, des sulfures de cuivre secondaires (chalcocite et covellite) et des sulfures de cuivre complexes (chalcopyrite et bornite). Les sulfures de cuivre complexes sont plus rarement identifiés et ne sont souvent accompagnés d'aucun autre type d'inclusion. Deux hypothèses peuvent être soulevées par la présence de ces inclusions métalliques :

-La première est la présence d'inclusions de sulfures de cuivre dans le minerai carbonaté/oxydé employé qui se sont retrouvées piégées dans la scorie en l'absence d'un procédé adapté à leur élimination (Z. Stos-Gale, 1989) ;

-La seconde serait l'introduction plus large de minerais sulfurés dans la charge de réduction.

Les scories issues d'une production avec minerais sulfurés et les scories issues d'un procédé avec des carbonates contenant de faibles taux de sulfures peuvent produire des scories de nature similaire, comme cela peut se retrouver largement dans la littérature (A. Addis et al., 2016; T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016; D. Larreina-García, 2017, p.95). Il est alors difficile de trancher sur l'une ou l'autre des hypothèses en l'absence d'autres données. Nous verrons dans la prochaine partie (V.4) que d'autres éléments viennent s'ajouter à cette réflexion. Les minerais retrouvés en contexte ne contiennent pas ces inclusions de sulfures de cuivre et correspondent majoritairement à de la malachite. Bien que nous ayons vu qu'ils ne sont peut-être pas représentatifs de la totalité des minerais employés sur le site.

Les résultats ne montrent pas de différences ni entre les types de scories préalablement établis ni en fonction de la stratigraphie, montrant qu'ils sont probablement issus du même procédé, sans variation visible. De ce fait, les données ne semblent pas indiquer la présence de plusieurs étapes au sein du procédé. Le procédé en une étape réductrice, dessiné par les résultats des scories, ne va pas dans le sens d'un procédé de réduction traitant de larges parts de minerais de cuivre sulfurés. Comme défini en partie III.1, la réduction de minerais sulfurés implique un procédé en plusieurs étapes. En revanche, un mélange de minerais carbonates/oxydes et de sulfures peut lui se faire en une seule étape réductrice, il n'est donc pas à écarter pour la reconstitution de Vilabouly. Nous verrons qu'il est renforcé par la suite.

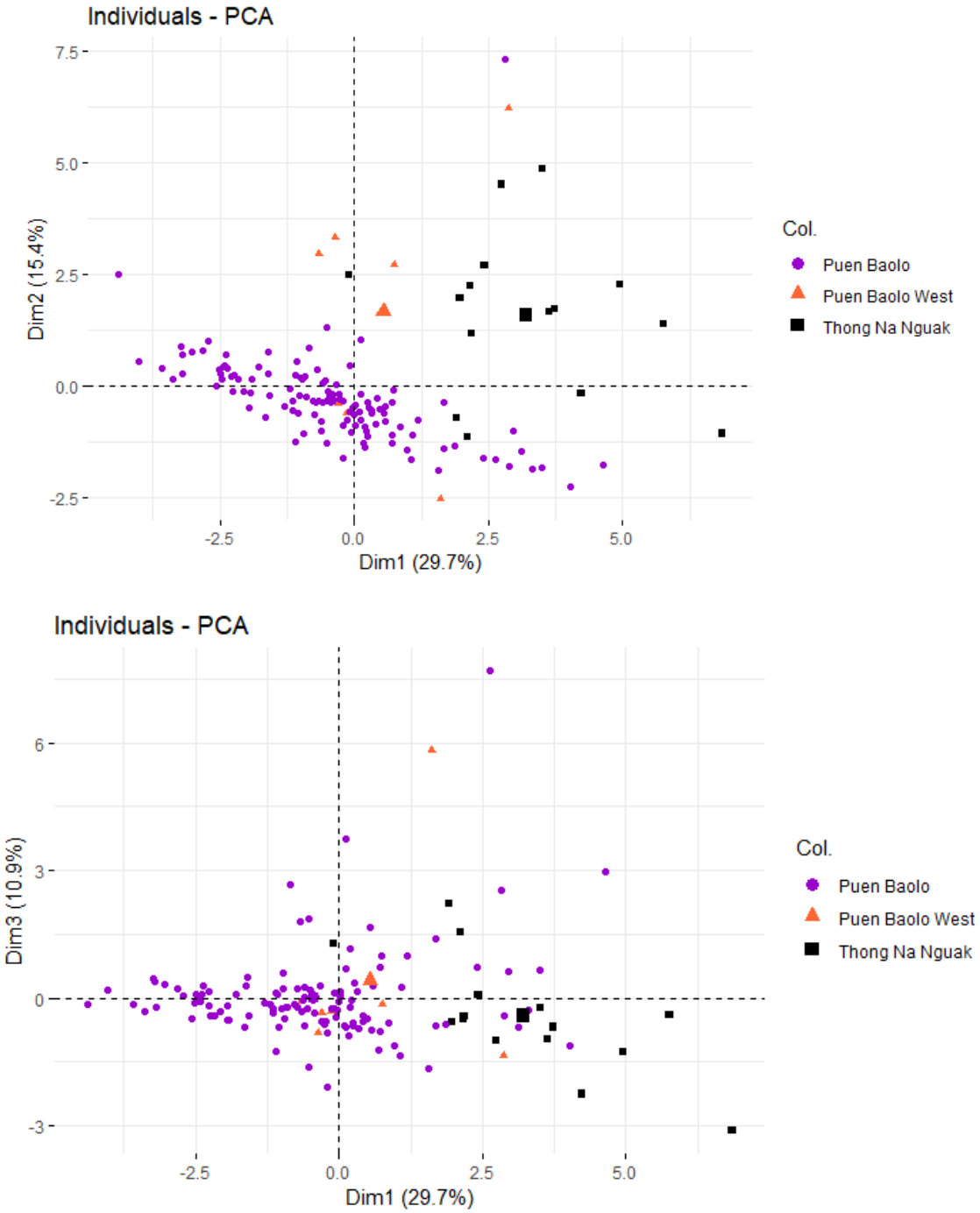


Figure 152 : Analyse par composante principale présentant les résultats des données des scories de Puen Baolo, Puen Baolo West et Thong Na Nguak pour les composantes 1 à 3 (n=132).

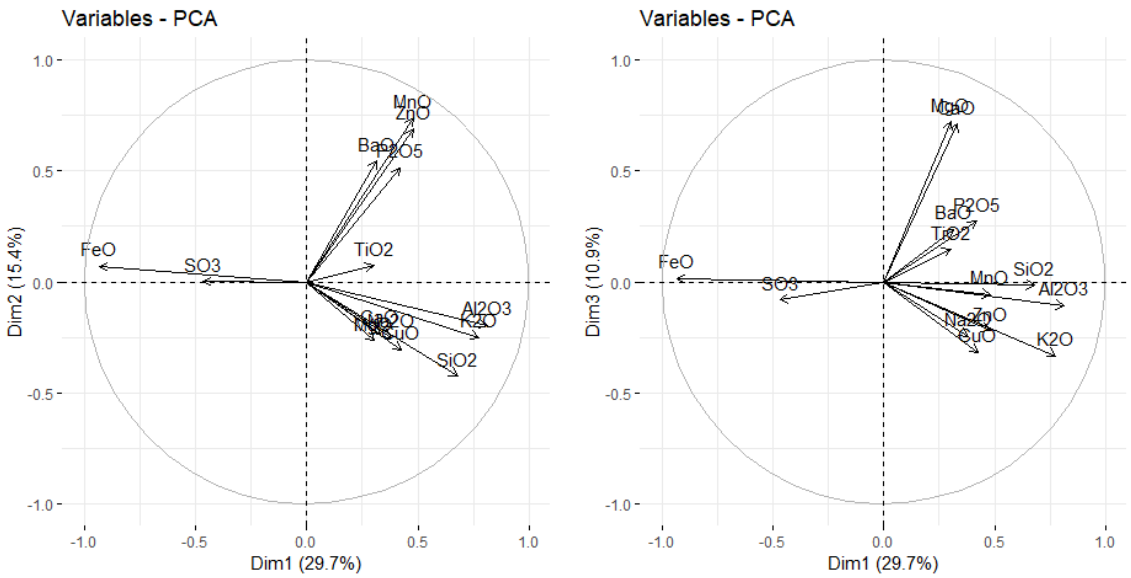


Figure 153 : À gauche, cercle de corrélation entre variables colorées par rapport au cos2 correspondant aux composantes principales 1 et 2. À droite, cercle de corrélation entre variables colorées par rapport au cos2 correspondant aux composantes principales 1 et 3.

Les scories de PBL et TNN ont apporté certaines différences également. Les résultats de l'ACP différencient les scories de Puen Baolo et Thong Na Nguak, notamment par les taux en oxydes de manganèse, de silicium et de zinc qui sont plus élevés pour les scories de TNN (Figure 152 et Figure 153). Les sulfures de cuivre primaire (chalcopyrite et bornite) sont également absents des scories de TNN. Ces deux observations pourraient matérialiser une variation dans les matières premières employées entre les deux sites, principalement les minerais, qui dans le cas de TNN semblent plus riches en manganèse et en zinc. Ces différences seront plus largement évoquées au Chapitre VII. De plus, les résultats de l'ACP confirment que les principales variations des scories de Puen Baolo sont induites par les fluctuations entre SiO_2 et FeO, venant ainsi renforcer la nature variable de ces composés dans la charge.

V.4. Produits intermédiaires multicouches : matte, scorie et cuivre métallique

Au sein du corpus de Vilabouly on peut définir un dernier type comprenant sept échantillons, notés SEALIP/LA/PBL/42, SEALIP/LA/PBL/48 à 52 et PBL/BB14/3/3/7113. Ce type n'a pas été aisé à classer, car il appartient à un ensemble de produits intermédiaires, entre les scories et les produits finis, contenant donc du cuivre métallique macroscopique. En effet, ce type concerne des artéfacts qui possèdent une forme de lingot conique/hémisphérique de diamètre entre 40 et 65 mm et d'épaisseur entre 8 et 17 mm (Figure 154 et Tableau 34). Leur masse est variable entre 32 et 129 g, dépendant du type de constituant. Ce type est très probablement issu d'une coulée et a conservé la forme du contenant/dépression dans lequel il a solidifié. Nous avons eu l'occasion de pouvoir sectionner dans leur épaisseur six de ces lingots, alors que le dernier (SEALIP/LA/PBL/42) fait seulement l'objet d'un prélèvement. Ces lingots peuvent être placés en différentes catégories (Figure 154 et Figure 155) :

-Certains sont composés d'un bouton de cuivre dans la partie basse, surmonté par une couche de scorie (SEALIP/LA/PBL/50) ;

-Certains seulement d'une couche de scorie (SEALIP/LA/PBL/49 et PBL/BB14/3/3/7113) ;

- D'autres sont composés d'un bouton de cuivre métallique, surmonté par une couche de matte (SEALIP/LA/PBL/48 et 52) ;

-Un lingot possède les trois couches (SEALIP/LA/PBL/51).

L'échantillon SEALIP/PBL/42 qui a seulement été prélevé, se compose de matte, mais il n'est pas impossible que du cuivre métallique soit également présent dans la partie basse du lingot, restée sur site dans les réserves de Vilabouly.

Certains de ces lingots (SEALIP/LA/PBL/49, 50 et 51) proviennent d'un contexte sûr et qu'on sait peu perturbé, dans l'unité C15 de Puen Baolo, un des contextes funéraires les mieux préservés. Au total, 15 lingots de ce type ont pu être identifiés à Puen Baolo. À l'œil nu, ils semblent être principalement composés d'une couche de scorie surmontant un bouton de cuivre, mais la présence de matte n'est pas à exclure. Ces 15 lingots ont un diamètre standard entre 40 et 50 mm, comme les exemples prélevés ici.

Échantillon	Unité	Niveau	Couche (Arb.)	Contexte	feature	Catalogue	Masse (g)	Diamètre (cm)	Epaisseur (cm)
SEALIP/LA/PBL/42	F15	2	3	5416	11	5401	129	6,5	
SEALIP/LA/PBL/48	B17	2	1	3303		3302	65	4,5	1,7
SEALIP/LA/PBL/49	C15	3	1	2423	1	2926 j	32	4,3	0,8
SEALIP/LA/PBL/50	C15	3	1	2423	1	2926 e	46	4,5	1,6
SEALIP/LA/PBL/51	C15	3	1	2423	1	2926 f	34	4,6	1,7
SEALIP/LA/PBL/52	E4	2	2	5006		5005	84	4	1,5
PBL/BB14/3/3/7113	BB14	3	3	7113		7108	23	3,5	1

Tableau 34 : Caractéristiques des lingots coniques avec plusieurs couches.


SEALIP/LA/PBL/52
SEALIP/LA/PBL/48
SEALIP/LA/PBL/51
SEALIP/LA/PBL/50



Figure 154 : Les lingots avec couches multiples de cuivre métallique, matte et/ou scorie. Échelle = 5 cm.

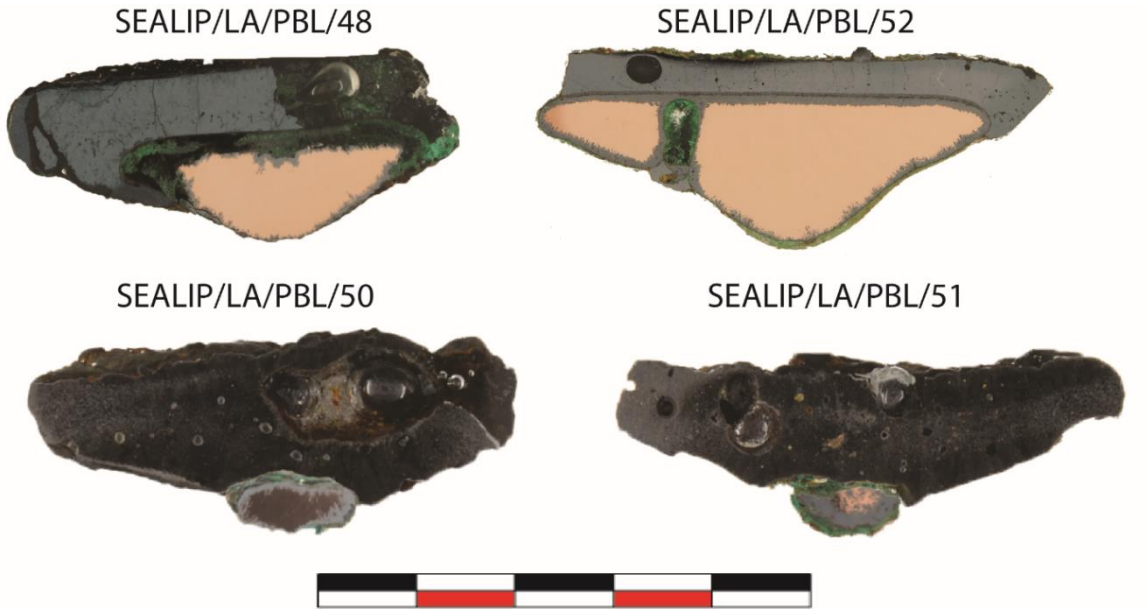


Figure 155 : Sections polies des lingots multicouches SEALIP/LA/PBL/48 et 52 composés d'une couche de matte et de cuivre métallique, des lingots SEALIP/LA/PBL/50 et 51 composés d'une couche de scorie et de cuivre métallique.

À cette liste, on peut également ajouter, deux échantillons de scorie de Puen Baolo (PBL/C17/1/1/3117/b et PBL/B17/1/1/3301/b) qui, si on suit les caractéristiques ici mentionnées, correspondent à ce corpus (Figure 156). En effet, ces scories sont fragmentaires, mais possèdent un de leur côté courbé, tout comme les exemples de lingots présentés ici. De plus, si on reconstitue leur diamètre, il correspond également.



Figure 156: Les deux fragments de scories PBL/B17/1/1/3301/b (gauche) et PBL/C17/1/1/3317/b (droite). Échelle = 5 cm.

En parlant ici de *matte*, il s'agit d'une autre acceptation que dans le cas des scories, où le terme *matte* était utilisé pour désigner uniquement une inclusion métallique microscopique de sulfure de cuivre dans la scorie. Dans ce cas présent, la matte est une couche macroscopique indépendante, présente en même proportion, voire en excès par rapport au cuivre métallique. L'identification de cette couche de matte a donc une tout autre implication pour la nature du procédé de réduction en jeu à Vilabouly.

En effet, la matte est un composé intermédiaire de cuivre, de soufre et parfois de fer en différentes proportions. La matte est produite lorsque des sulfures de cuivre sont présents dans la charge de réduction. Des mattes massives comme celles-ci sont très rarement retrouvées dans les contextes archéologiques, compte tenu de leur intérêt à être réemployées.

V.4.1. Composition globale

Cette partie regroupe des résultats obtenus par analyses au MEB-EDS des phases de matte, de scories et de cuivre métallique séparément, ainsi que des observations au Microscope Optique. Une fiche reprenant les résultats pour chaque échantillon est disponible en Annexe 1.

1. La couche de scorie (PBL/49, 50, 51 ; BB14/3/3/7113)

La couche de scorie est donc présente pour quatre échantillons. L'épaisseur des couches est de 10 mm pour SEALIP/LA/PBL/50, 7 mm pour SEALIP/LA/PBL/51, 7 mm pour SEALIP/LA/PBL/49 et 8 mm pour PBL/BB14/3/3/7113. La scorie se compose en majorité de fer (59 %mass. FeO), de silice (28 %mass. SiO_2) et d'alumine (5,5 %mass. Al_2O_3, Tableau 35). Les trois mêmes oxydes principaux identifiés pour les scories macroscopiques de Puen Baolo et Thong Na Nguak.

Ensuite, on trouve la présence de composés mineurs CaO (2 %mass.), CuO (2 %mass.), MnO (1,5 %mass.), K_2O (0,7 %mass.) et MgO (0,5 %mass.).

L'échantillon PBL/B14/3/3/7113 semble se différencier des autres par sa composition, d'une part par son taux de CaO légèrement plus élevé, 4 %mass. contre 1 %mass. pour les autres. Et d'autre part par le taux en MnO non détecté, alors qu'il est en moyenne de 2 %mass. pour les autres échantillons.

Si on regarde les taux en cuivre et en soufre résiduels, ils sont dans la moyenne de ce qu'on a pu également observer pour les scories de Puen Baolo et Thong Na Nguak. À savoir une moyenne de cuivre résiduel basse, autour de 2 %mass. et un taux en soufre non détecté (par EDS).

Échantillon	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO	CuO
SEALIP/LA/PBL/50	0,7	6	30	0,5	1	1	0,7	2	55	2
SEALIP/LA/PBL/51	0,7	5,5	28	0,5	1	1	0,6	2	58	2
BB14/3/3/7113		5	27			4			63	0,9
SEALIP/LA/PBL/49	0,7	6	27	0,6	0,9	1	0,7	2	59	1,5
Moyenne	0,5	5,5	28	0,4	0,7	2	0,5	1,5	59	2

Tableau 35 : Données élémentaires de la couche de scorie. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.).

2. La couche de matte (PBL/42, 48, 51, 52)

La matte est également présente pour quatre échantillons. Dans le cas de deux échantillons, SEALIP/LA/PBL/48 et 52, on la discerne aisément en section comme couche à part entière surmontant le cuivre métallique. Alors que pour les échantillons SEALIP/LA/PBL/42 et 51 on ne dispose seulement que d'un fragment. L'épaisseur de la couche de matte pour SEALIP/LA/PBL/48 et 52 est de 7 et 4 mm respectivement. Dans le cas des quatre échantillons, la matte est de couleur noire brillante et d'aspect compact à l'œil nu. Les mattes se composent en moyenne de Cu à 71,5 %mass. et de S à 21,5 %mass. avec Fe à 0,9 %mass. (Tableau 36).

Échantillon	O	Si	S	Fe	Cu	Al	Total
SEALIP/LA/PBL/48	3		22	1	74		100
SEALIP/LA/PBL/51	3		23,5	1	72		100
SEALIP/LA/PBL/52	8	1	17	1	71	0,6	100
SEALIP/LA/PBL/42	8		23		69		100
Moyenne	5,5	0,4	21,5	1	71,5	1	100

Tableau 36 : Composition élémentaire globale de la couche de matte. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.).

3. Le bouton de cuivre métallique (PBL/48, 50, 51 et 52)

Un bouton de cuivre métallique est identifié pour quatre échantillons, SEALIP/LA/PBL/48, 50, 51et 52 dans la partie basse des lingots en dessous de la couche de matte ou de scorie. Il pourrait également être présent pour le lingot dont provient l'échantillon SEALIP/LA/PBL/42, mais dont le petit fragment rend difficile la vérification. Dans tous les cas, excepté

SEALIP/LA/PBL/52, le volume du cuivre métallique est inférieur à celui de la matte/scorie produite. Pour SEALIP/LA/PBL/52, le bouton de cuivre fait 40 mm de long et 10 mm dans sa partie la plus épaisse. Dans le cas des autres échantillons ce bouton de cuivre mesure : 17 mm de long et 7 d'épaisseur pour SEALIP/LA/PBL/48, 8 mm de long et 5 mm d'épaisseur pour SEALIP/LA/PBL/51, 10 mm de long et 4 d'épaisseur pour SEALIP/LA/PBL/50.

Le cuivre métallique se compose en moyenne de Cu à 97 %mass. et de S à 1 %mass. (Tableau 37). Le fer se trouve à un taux de 1 %mass. pour un échantillon, SEALIP/LA/PBL/51 pour lequel on détecte également la présence mineure d'arsenic à 0,6 %mass.

Echantillon	O	Si	S	Fe	Cu	As	Total
SEALIP/LA/PBL/48	2		1,5		96,5		100
SEALIP/LA/PBL/51	0,7			1	97,5	0,6	100
SEALIP/LA/PBL/52	0,9		1		98		100
SEALIP/LA/PBL/50	0,8	0,4	1		98		100
Moyenne	1		1		97		100

Tableau 37 : Composition élémentaire de la couche de cuivre métallique. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.).

V.4.2. Microstructure

1. La couche de scorie (PBL/49, 50, 51 ; BB14/3/3/7113)

La couche de scorie se compose en majorité d'un mélange d'olivine ferreuse (Fe_2SiO_4) et de magnétite (Fe_3O_4) dans une phase vitreuse. Qu'on identifie grâce à leur morphologie et leur composition comme dans le cas des scories macroscopiques de Puen Baolo et Thong Na Nguak. La fayalite se compose en moyenne de 47 %mass. de fer et 15,5 %mass. de silicium, avec des taux mineurs d'aluminium (1 %mass.), manganèse (1 %mass.), magnésium (0,6 %mass.), calcium (0,5 %mass.) et potassium (0,4 %mass.). La morphologie des cristaux de fayalite est à dominante de cristaux en squelette et en plume indiquant une vitesse de refroidissement assez rapide (Figure 157).

La magnétite est identifiée par sa composition en fer de 72 %mass. et en oxygène de 25 %mass. avec comme composés mineurs de l'aluminium (2 %mass.), du titane (0,8 %mass.), du manganèse (0,7 %mass.) et du silicium (0,4 %mass.). Elle est cristallisée principalement sous la forme de polyèdre.

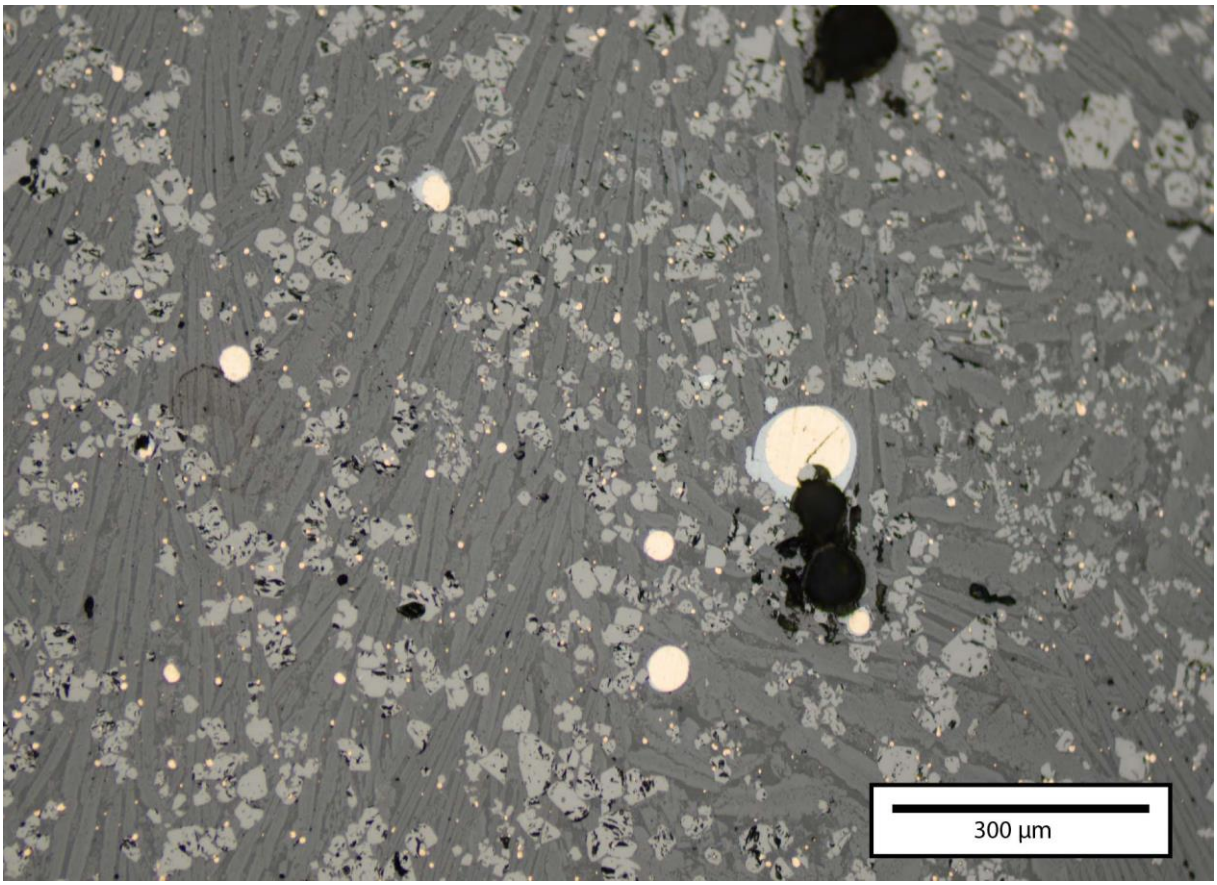


Figure 157 : Micrographie (grossissement 10) de la couche de scorie de l'échantillon SEALIP/LA/PBL/51.

Ensuite on retrouve la présence d'inclusions métalliques : cuivre métallique et inclusions de sulfures de cuivre, identifiées comme de la chalcocite et de la covellite. Aucun sulfure de cuivre complexe, chalcopyrite et bornite, n'a été identifié.

2. La couche de matte (PBL/42, 48, 51, 52)

Deux phases différentes peuvent être identifiées dans la microstructure des mattes, bleue claire/blanche en microscopie optique (notée matte 1) et bleue plus foncée (notée matte 2) se présentant toutes deux sous forme pavimenteuse (Figure 158). Lorsque la température décroit, la matte subit souvent une démixtion en plusieurs phases alors qu'elle est homogène à l'état liquide (E. Burger, 2008; E. Burger et al., 2011). On voit dans la composition globale obtenue pour la matte 2 (Tableau 38), une augmentation du taux de soufre (29 %mass.) et une diminution du taux de cuivre (70 %mass.) d'environ 5 %mass. par rapport à la matte 1 (S 23 %mass. et Cu 76 %mass.). Pour l'échantillon SEALIP/LA/PBL/52, ces deux phases sont également présentes, mais de manière moins prononcée, rendant difficile la quantification au MEB-EDS.

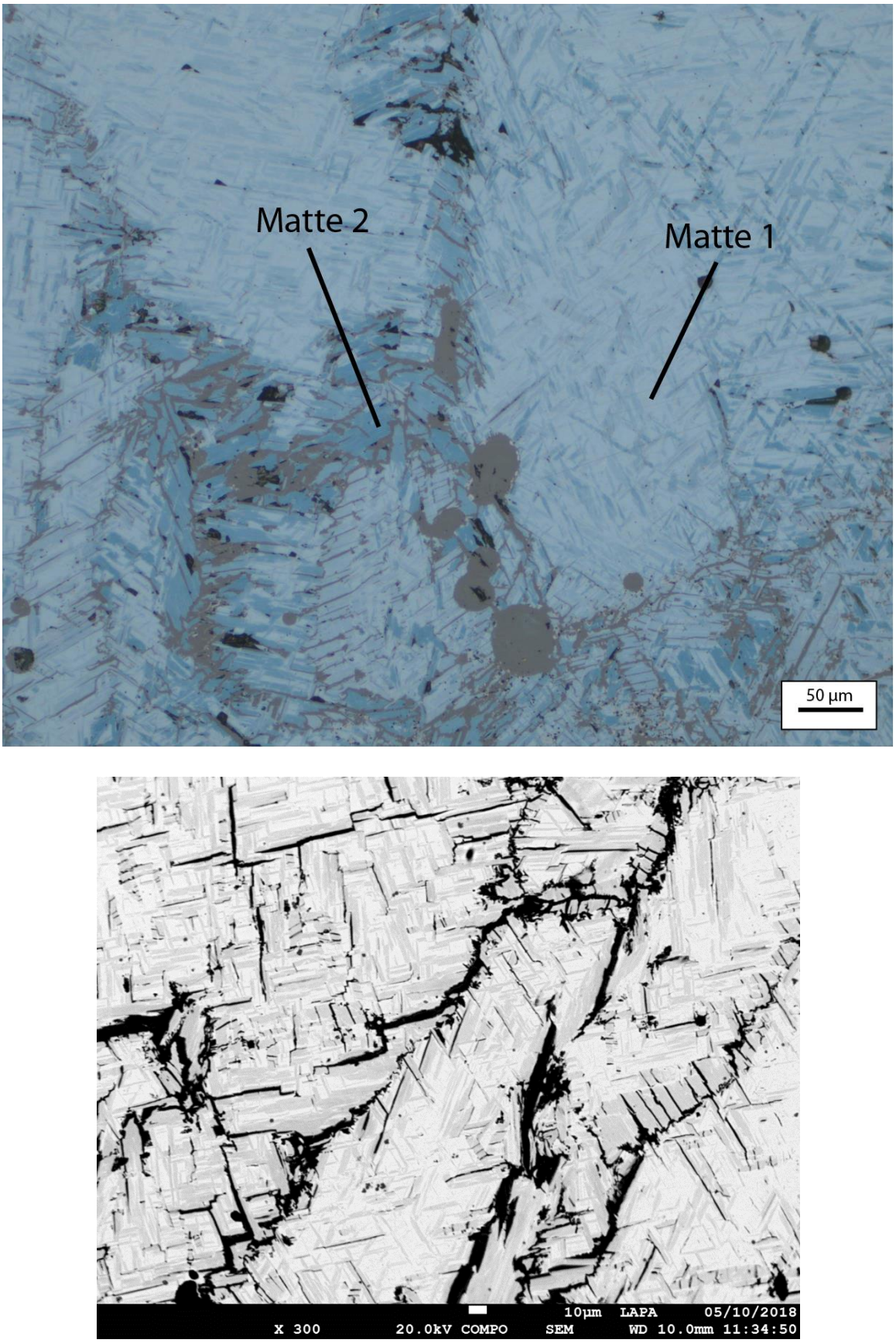


Figure 158 : En haut, image MO de la couche de matte pour l'échantillon SEALIP/LA/PBL/51 et en bas, image en BSE au MEB-EDS de la couche de matte de l'échantillon SEALIP/LA/PBL/48.

	O	S	Fe	Cu	Tota
Matte 1			Fe	C	Total
SEALIP/LA/PBL/42	0,6	24		75	100
SEALIP/LA/PBL/48	0,6	22		77	100
SEALIP/LA/PBL/51	0,6	22		77	100
Matte 2					
SEALIP/LA/PBL/42	0,7	29		70	100
SEALIP/LA/PBL/48	0,6	28		71	100
SEALIP/LA/PBL/51	1	29	0,8	69	100

Tableau 38 : Composition élémentaire des deux types de matte. Données obtenues au MEB-EDS (%mass.).

3. Le bouton de cuivre métallique (PBL/48, 50, 51 et 52)

Le cuivre métallique possède la même microstructure d'un échantillon à l'autre. Il renferme des inclusions de sulfures de cuivre souvent de forme arrondie (Figure 159). Le taux de soufre global de 1 %mass. provient donc de la présence de ces inclusions de sulfures. Des analyses ciblées dans ces inclusions montrent qu'elles sont composées en moyenne de Cu à 79 %mass., de S à 19,5 %mass. ainsi que de fer à 0,4 %mass. On identifie également un deuxième type d'inclusion grâce à l'observation au MEB-EDS en mode BSE. Il s'agit d'inclusion de couleur blanche. On les retrouve pour les quatre échantillons de cuivre métallique. Elles se composent de cuivre en moyenne à 33,5 %mass., de plomb à 29,5 %mass., de bismuth à 31 %mass. ainsi que de soufre à 4 %mass. On retrouve également la présence d'antimoine pour SEALIP/LA/PBL/50 à 3 %mass. Leur composition est relativement similaire d'un échantillon à l'autre. Ce type d'inclusion est un composé résiduel de la charge d'origine, probablement associé aux minerais de cuivre employés, n'ayant pas été éliminé et se retrouvant piégé dans le métal après la réduction. Les inclusions de sulfures de cuivre proviennent d'une incomplète séparation par gravité du cuivre métallique et de la matte. Nous verrons que les mêmes types d'inclusions sont observés par la suite pour le corpus d'objets finis de différentes typologies (voir partie V.5). Si on analyse la matrice métallique, en excluant les inclusions, celle-ci est composée de cuivre avec parfois un taux de fer mineur autour de 1 %mass. en solution solide.

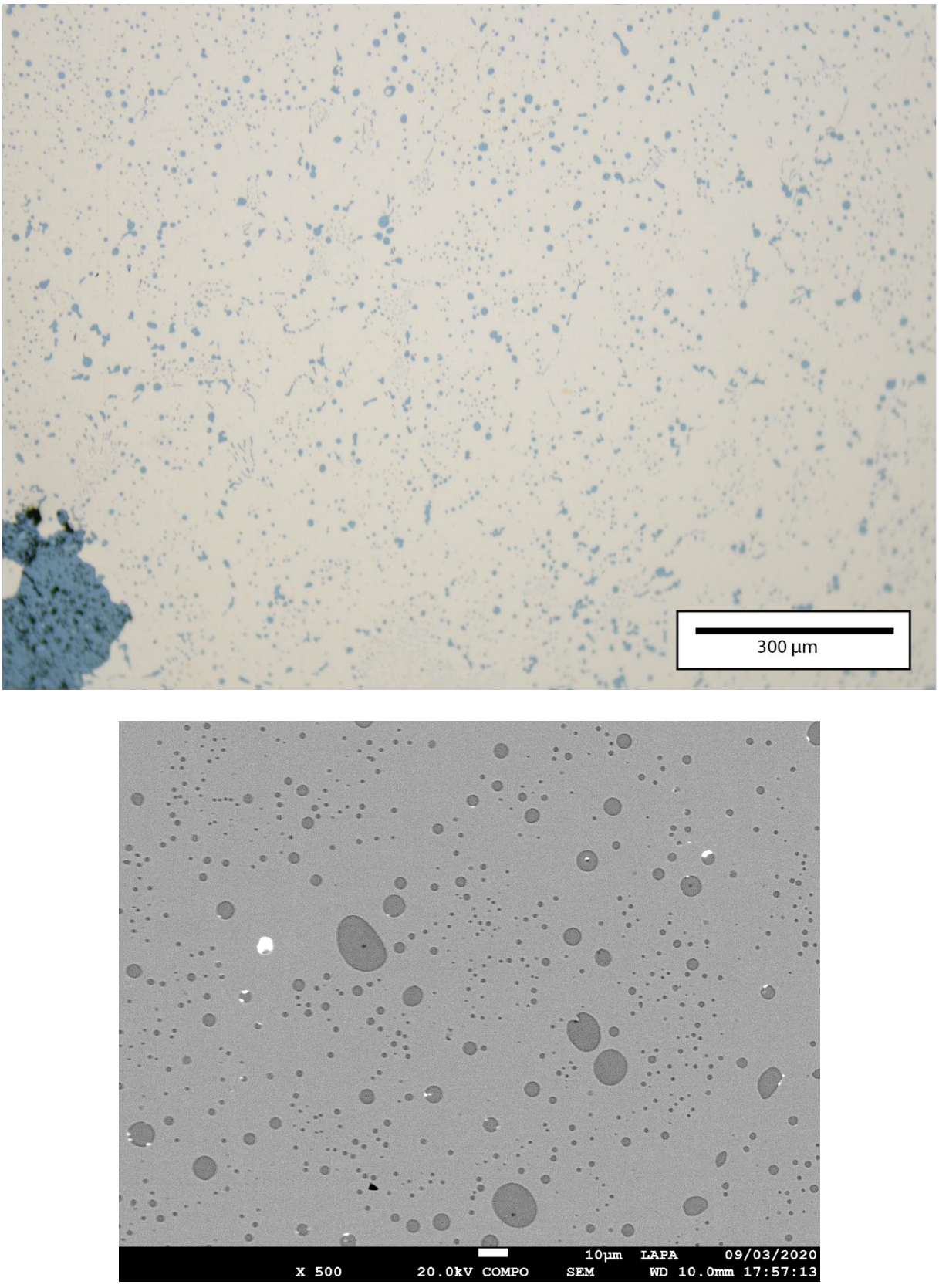


Figure 159 : En haut, image MO (grossissement 10) et en bas en BSE au MEB du cuivre métallique de l'échantillon SEALIP/LA/PBL/52.

V.4.3. Comparaison avec les scories macroscopiques

Sur le même modèle que la démarche effectuée en partie V.3.5, les caractéristiques des scories composants les lingots ont été comparées à celles des scories indépendantes du corpus, afin de déterminer si elles auraient pu rentrer en jeu lors du même procédé, voir de la même étape. Les scories indépendantes et les scories des lingots possèdent les mêmes composés majeurs, ce qui nous permet de les regarder dans un ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 (Figure 160).

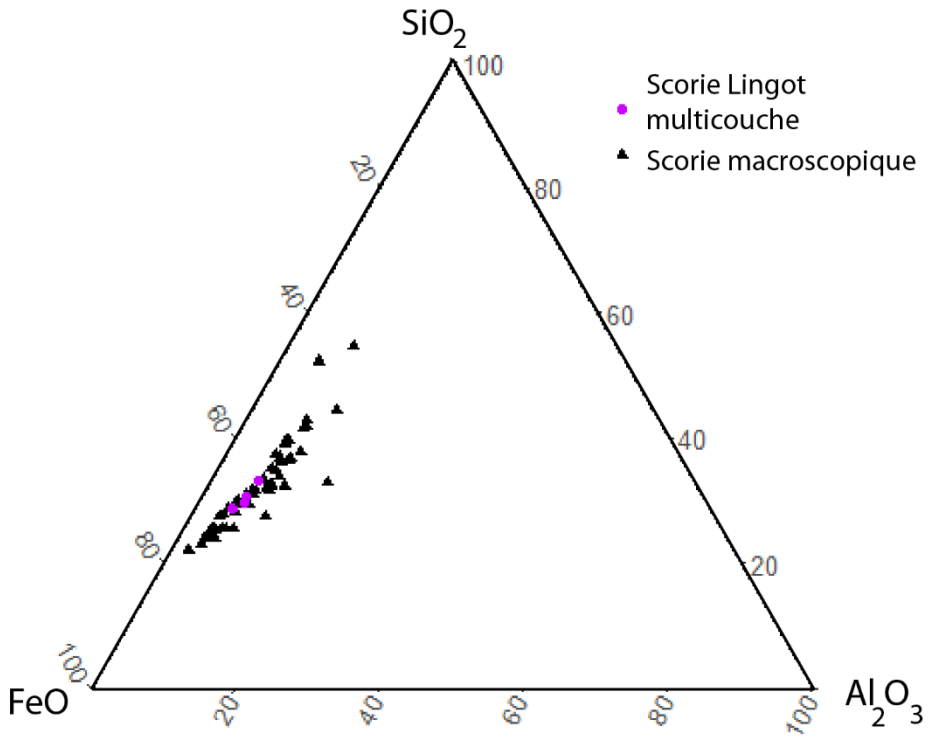


Figure 160 : Comparaison des compositions moyennes en FeO, SiO_2 et Al_2O_3 des scories indépendantes et des scories « lingot ». Données obtenues par aire d'analyse (x300) au MEB-EDS.

On remarque que la composition de la couche de scorie adhérente aux lingots, de type fayalitique, est comparable à celle de la majorité des scories indépendantes. De même pour la microstructure, également similaire, avec une majorité de cristaux de fayalite et de magnétite dans une phase vitreuse, accompagnés de différents types d'inclusions métalliques : cuivre métallique et sulfures de cuivre (chalcocite et covellite). Les sulfures de cuivre complexes, chalcopyrite et bornite, n'ont pas été observés pour les scories des lingots multicouches. Ces observations pourraient donc signifier que ces différents produits proviennent non seulement du même procédé, mais également de la même étape. Cela confirme la nature de produits directs de la réduction de ces lingots.

V.4.4. Bilan

Les produits intermédiaires (« lingots multicouches ») identifiés ici avec plusieurs couches superposées démontrent une bonne séparation des différentes phases. En effet, le taux de cuivre présent dans les scories est faible (1,6 %mass. en moyenne) et les couches de matte ne contiennent pas d'inclusions de cuivre métallique piégé en veine, montrant que la séparation par gravité est aboutie.

La couche de scorie possède la même microstructure et la même composition que pour les scories macroscopiques du corpus. Ce sont des scories de type fayalitique en majorité composées de cristaux de fayalite et de magnétite dans une phase vitreuse accompagnée d'inclusions métalliques de différents types : cuivre métallique et sulfures de cuivre secondaire (chalcocite et covellite). Les sulfures de cuivre primaire (chalcopyrite et bornite) ne sont ici pas identifiés. On peut donc attribuer toutes les caractéristiques décrites pour les scories indépendantes aux scories des lingots multicouches. On peut également dire qu'elles appartiennent visiblement au même procédé, et auraient pu avoir été obtenues durant la même étape.

En ce sens, ces lingots multicouches pourraient être perçus comme des produits directement issus de l'étape de réduction. Ils auraient très certainement été obtenus par coulée du mélange dans un autre contenant, directement après la réduction, avec une température excédant le liquidus afin de permettre cette nette séparation des phases. Cette observation vient également ici renforcer l'utilisation des creusets comme vaisselles de réaction en leur nature de contenants portables.

Le fait que les lingots ne soient pas tous composés des mêmes phases et qu'ils semblent alterner cuivre métallique, scorie et matte pourrait renforcer l'hypothèse du mélange de minerais variable évoqué à la suite des résultats sur les scories. La présence des sulfures de cuivre dans la charge était peut-être variable. Cela pouvait mener, ou non, à la production d'une couche macroscopique de matte, parfois seulement de scorie, ainsi qu'une proportion de cuivre métallique variable. La présence des sulfures de cuivre dans la charge apparaîtrait alors comme non maîtrisée ou non intentionnelle. De plus, le fait que ces lingots avec matte aient été rejetés comme tels sans réutilisation pourrait signifier la non-connaissance des métallurgistes de l'intérêt de la matte à être réemployée. Il faut tout de même noter que la plupart de ces lingots ont été découverts en contexte funéraire. Bien plus qu'être des rejets, ces produits pourraient alors être perçus comme des offrandes de valeurs (cuivre ou matte) qu'on enterre avec les morts.

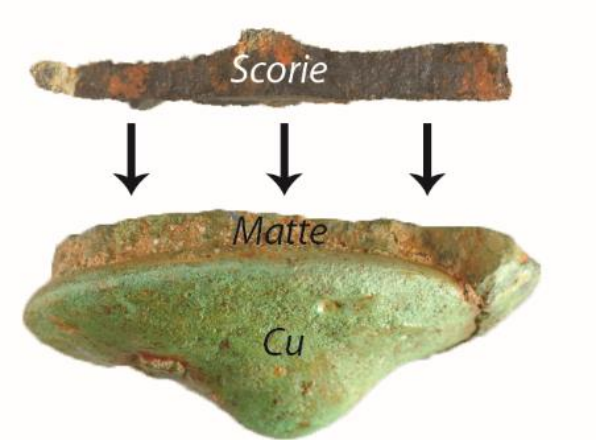


Figure 161 : Figure illustrant la potentielle association des scories plates et des lingots.

On peut tout de même se demander quelles sont les différences entre les scories plates, massives, grossières et celles des lingots présentés ici. Elles semblent avoir la même composition, mais ne semblent pas avoir été obtenues via le même geste technique : serait-il possible que les scories plates/massives aient un jour surmonté un de ces lingots ? Puis une fois solidifié, avoir été retirées (Figure 161). La majorité des scories plates et massives du corpus ont une de leur face plane, cela pourrait conforter cette hypothèse. De plus, les scories plates sont perçues dans la littérature comme solidifiant au-dessus d'un autre liquide en fusion, ce qui pourrait être ici le cas de la matte ou du cuivre. Les scories plates et massives ne seraient alors pas issues de coulées isolées, mais d'une coulée associée au cuivre métallique (et la matte lorsqu'elle est présente). Les scories grossières apparaîtraient alors comme des scories pour lesquelles les bonnes conditions n'ont pas été atteintes pour être coulées de la même manière.

L'identification de cette matte pourrait alors signifier que du moins épisodiquement, des sulfures de cuivre se sont retrouvés intégrés dans la charge de réduction. Tout comme les questions soulevées par les inclusions de sulfures de cuivre dans les scories, la présence de cette couche de matte vient renforcer la réflexion : en quelle proportion les sulfures de cuivre étaient-ils employés à Vilabouly ? Était-ce épisodique et/ou accidentel ou avons-nous un procédé de réduction avec matte ? Quel(s) type(s) de sulfures de cuivre auraient pu être employés ? Était-ce intentionnel ou sommes-nous fasse à une production avec un mélange de minerais ? L'hypothèse du mélange de minerais avait déjà été soulevée par H. Cawte dans un rapport préliminaire et semble ici se renforcer (H. Cawte, 2009). Cette partie ainsi que la partie VI sur les reconstitutions expérimentales ont pour but de fournir des éléments de réponse.

V.5. Objets finis en cuivre et alliages cuivreux

Enfin, comme décrit dans le chapitre II, le site de Vilabouly a également livré un certain nombre d'objets en cuivre et alliages cuivreux avec différentes typologies qui vont permettre d'appréhender le type d'objets finis produits sur le site. Au total, 76 objets en métal ont pu être répertoriés, dont 60 ont pu être prélevés suivant la méthodologie décrite au chapitre V. Le corpus regroupe 45 échantillons de Puen Baolo, 2 de Thong Na Nguak et 13 provenant du musée de Vilabouly. Les résultats pour chaque échantillon sont présentés en Annexe 1.

V.5.1. Typologie

La sélection des échantillons a été faite pour être la plus représentative possible de tous les types d'objets recensés à Vilabouly, ainsi que de leur proportion (Figure 162). La sélection du corpus et les caractéristiques des différents objets sélectionnés sont présentées en partie II.3.

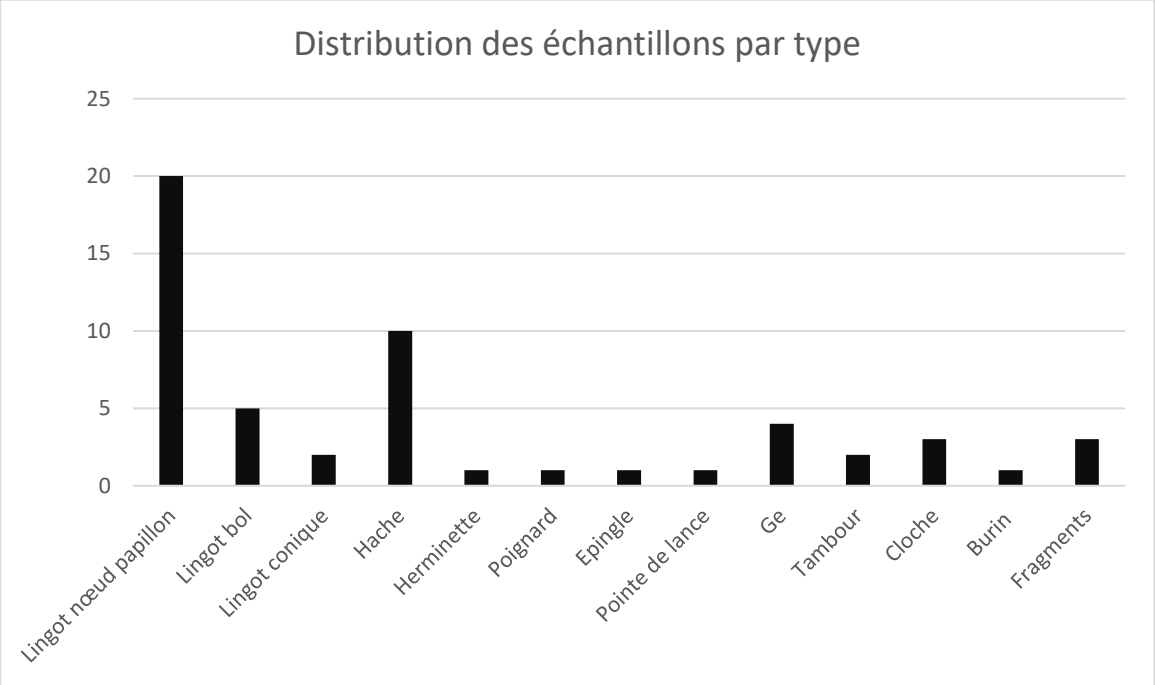


Figure 162 : Distribution des échantillons prélevés en fonction des types d'objets.

Le corpus a pu être séparé en deux grandes entités : des objets qu'on peut considérer comme des lingots et des objets finis. La catégorie des lingots compte trois types : des lingots dits nœud papillon, des lingots dits bol et des lingots coniques présents pour *Thong Na Nguak*, définis sur la forme (voir Chapitre II pour la sélection). Les lingots nœud papillon sont majoritaires avec 27 répertoriés en contexte pour *Puen Baolo,* dont 20 échantillonnés. Ils représentent également le type d'objet métallique le plus identifié à Vilabouly avec les lingots coniques. Pour le corpus des lingots coniques, nous ne prendrons ici que deux échantillons de *Thong Na Nguak,* car nous avons pu voir que les lingots de *Puen Baolo* (lingots multicouches) pouvaient être placés dans une catégorie à part (voir partie précédente), car certains se composent de scorie, de matte et/ou de cuivre métallique. Les lingots de *Thong Na Nguak* se

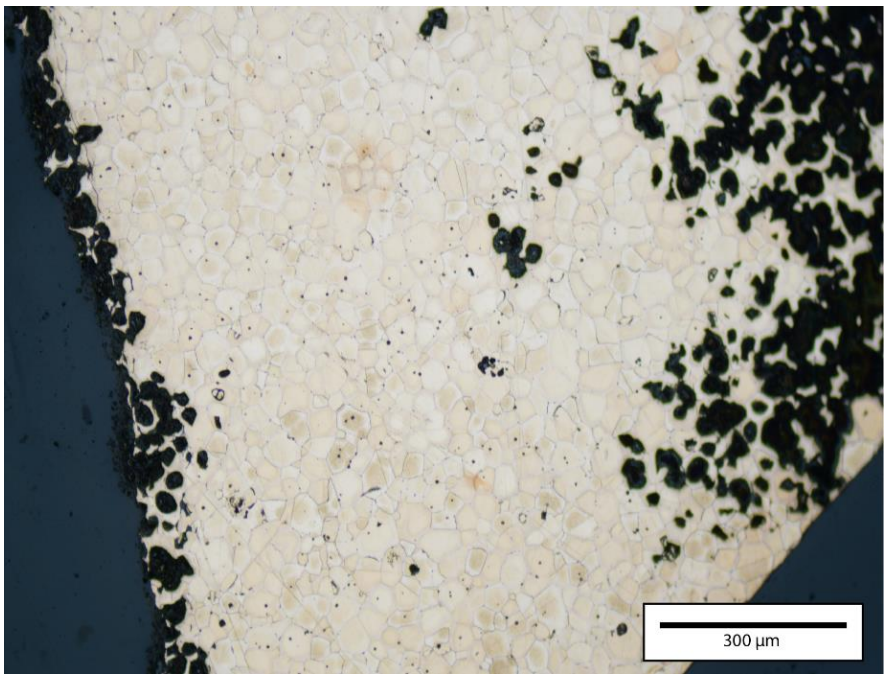
différencient, car ils se composent entièrement de cuivre et proviennent d'une zone archéologique différente de *Puen Baolo*.

Le groupe des objets finis compte également différentes typologies : haches (10 échantillons), pointe de lance (un échantillon), burin (un échantillon), épingle (un échantillon), herminette (un échantillon), un couteau (un échantillon), des *ge* (quatre échantillons), des cloches (quatre échantillons) et des tambours (deux échantillons).

V.5.2. Microstructure et composition

1. Les objets en cuivre

Les objets en cuivre correspondent aux trois types de lingots (Figure 163). Les lingots nœuds papillon possèdent une microstructure comportant des grains équiaxes en majorité (Figure 164). Certains lingots nœuds papillon ont des dendrites (PBL/16, PBL/33, PBL/34 et PBL/36), tout comme les lingots coniques et bols (Figure 164). Ils sont donc associés à des bruts de fonderie, composés de cuivre entre 95 et 99 %mass. (Tableau 39). La présence de grains équiaxes pour les lingots nœud papillon serait due à un refroidissement lent, ou à l'utilisation de certains types de moules qui peuvent aboutir à ce type de structure pour les objets en cuivre (J. Vernet, *pers.comm.*).



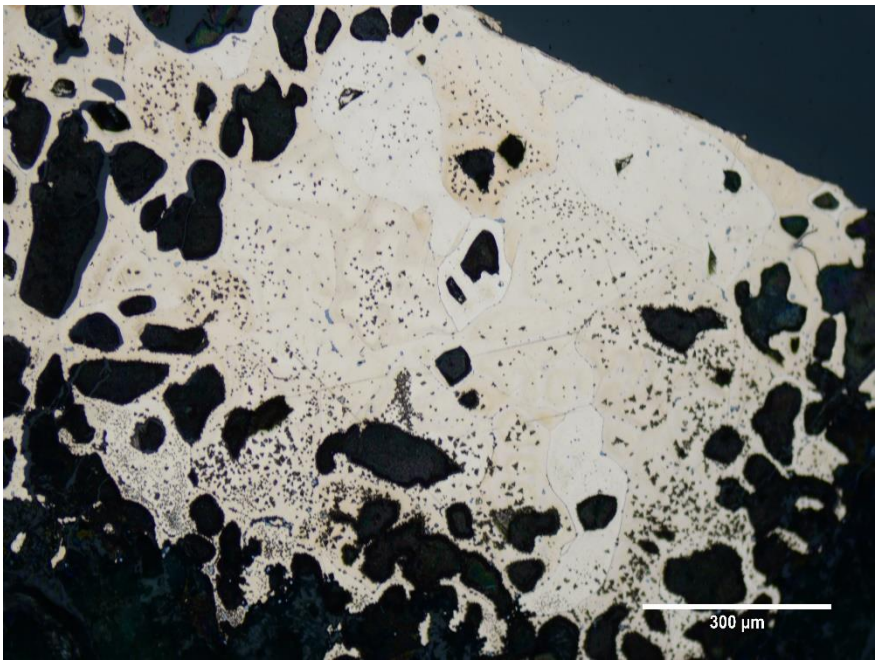


Figure 163 : En haut, image MO (grossissement 10) du lingot nœud papillon PBL/20 avec une structure de brut de fonderie en grains équiaxes. En bas, image MO (grossissement 20) du lingot nœud papillon PBL/16 pour lequel on discerne des dendrites.

A. Les lingots contenant du soufre

Les lingots coniques de *Thong Na Nguak* (TNN/3 et 4) et les lingots bols (VC/4 à 8) contiennent un taux de soufre supérieur (entre 1 et 2 %mass.) à celui des lingots nœud papillon pour lesquels le soufre n'est pas détecté. Les inclusions de sulfures de cuivre sont également plus abondantes pour ces deux types de lingots (Figure 164). Pour TNN/4 on peut même identifier la présence de l'eutectique Cu-Cu_2S (Figure 165).

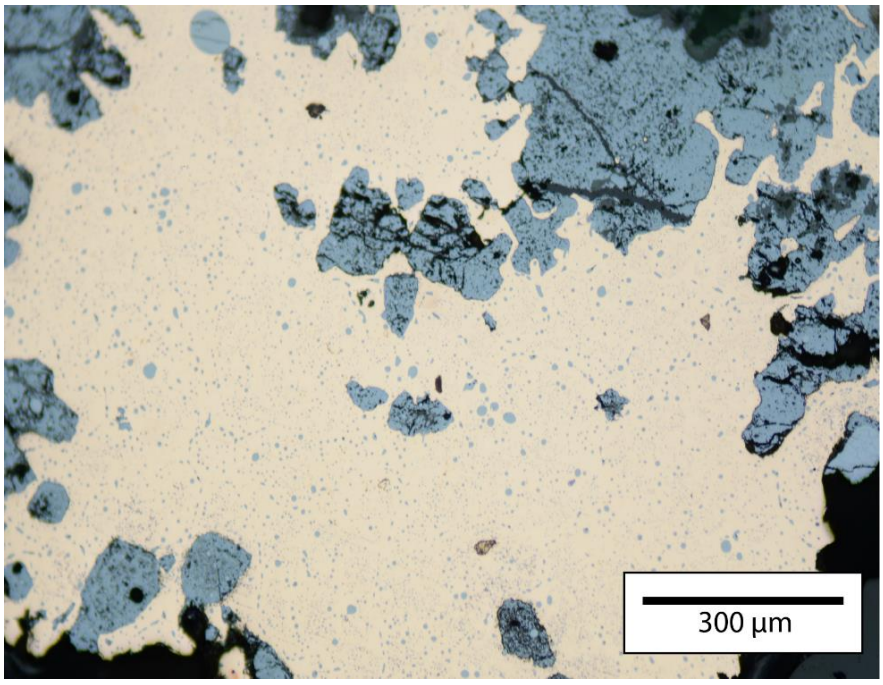


Figure 164 : Image MO (grossissement 10) de l'échantillon VC/8, un lingot bol avec une structure de brut de fonderie et d'abondantes inclusions de sulfures de cuivre.

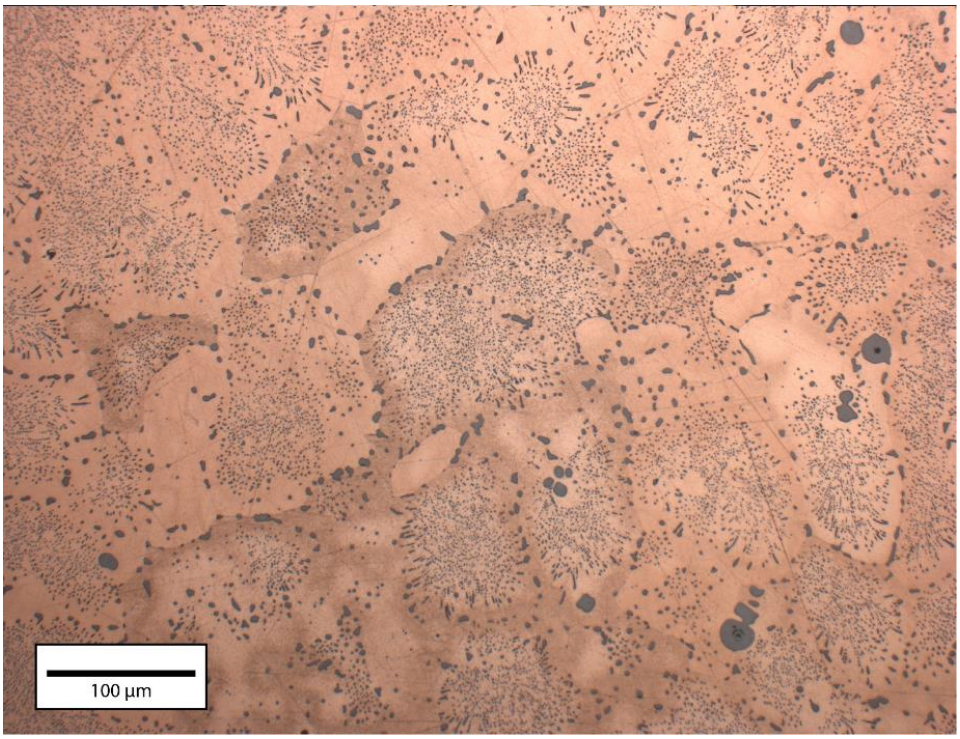


Figure 165 : Image MO (grossissement 20) après attaque du lingot conique TNN/4 avec une structure de brut de fonderie et l'eutectique Cu-Cu_2S.

B. L'eutectique Cu-Cu_2O

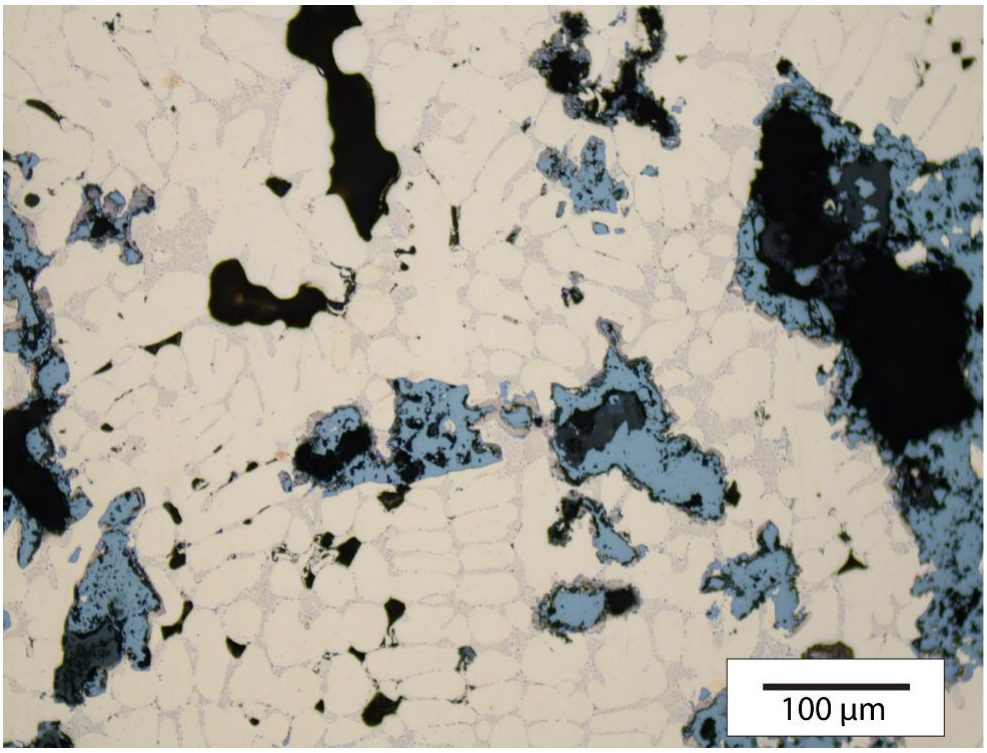


Figure 166 : Image MO (grossissement 20) de l'échantillon PBL/10 brut de fonderie pour lequel on identifie l'eutectique Cu-Cu_2O.

Un autre eutectique a pu être observé pour l'échantillon PBL/10, un lingot nœud papillon. Il s'agit de l'eutectique Cu-Cu_2O (Figure 166). L'oxygène est soluble dans le cuivre liquide ce qui peut provoquer la précipitation de cet eutectique (G. F. Vander Voort, 2004; K. Chen et al.,

2009; A. Hauptmann et al., 2015). Cet eutectique peut rendre le métal plus cassant et réduire sa malléabilité.

C. Les lingots contenant du fer

Six échantillons de lingots nœud papillon possèdent un taux de fer jusqu'à 3 %mass. (obtenu par analyse au MEB-EDS en évitant les produits de corrosion, PBL/11, PBL/13, PBL/14, PBL/19, PBL/20 et PBL/21). PBL/11 est encore différent, en apparence et en masse également. Il peut se rapprocher davantage d'un objet ferreux. En effet, il possède 2,5 %mass. de fer dans sa matrice de cuivre, mais on peut distinguer dans sa microstructure la présence de goethite (α-FeOOH), un oxyhydroxyde de fer (Figure 167). La présence de goethite a pu être confirmée par analyse en µ-spectroscopie Raman avec ses pics caractéristiques à 299, 387 et 685 cm^{-1}. La forme sphéroïdale de la goethite est comparable à celle identifiée par Cooke et Aschenbrenner, (1975) et serait le produit de l'altération d'une phase α-Fe, formé après le refroidissement d'un cuivre contenant des quantités élevées en fer.

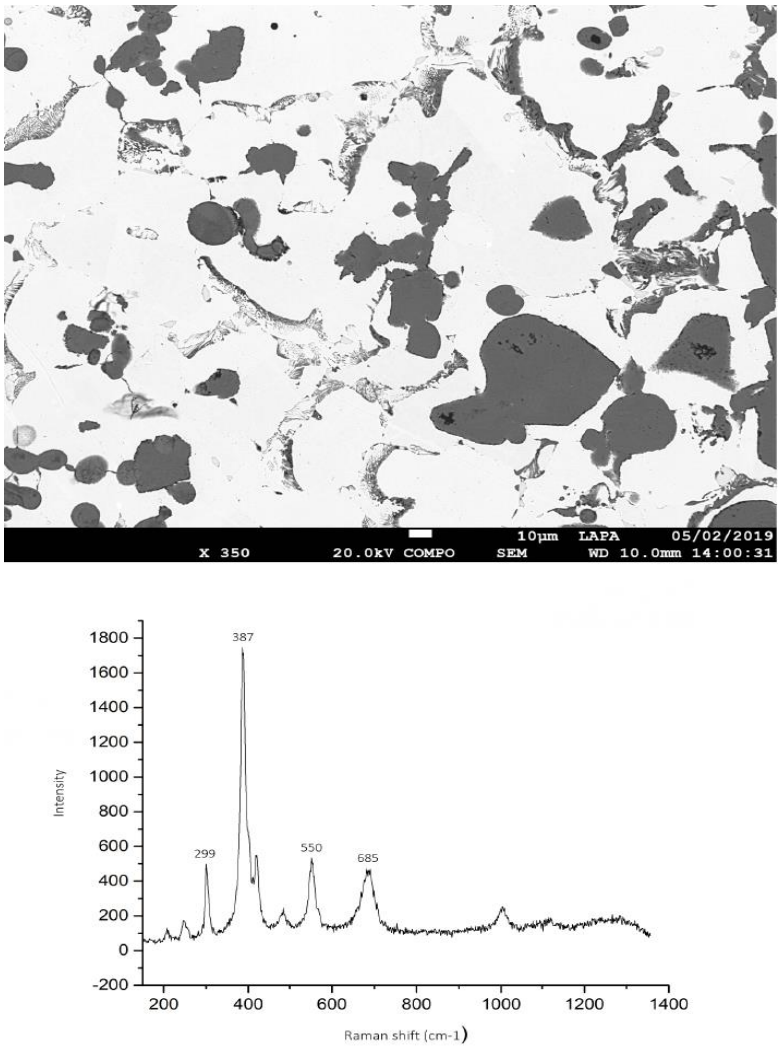


Figure 167 : En haut, image BSE au MEB EDS (grossissement 350) montrant la présence de goethite (phase gris foncé) dans l'échantillon PBL/11. En bas, spectre Raman associé confirmant la présence de goethite.

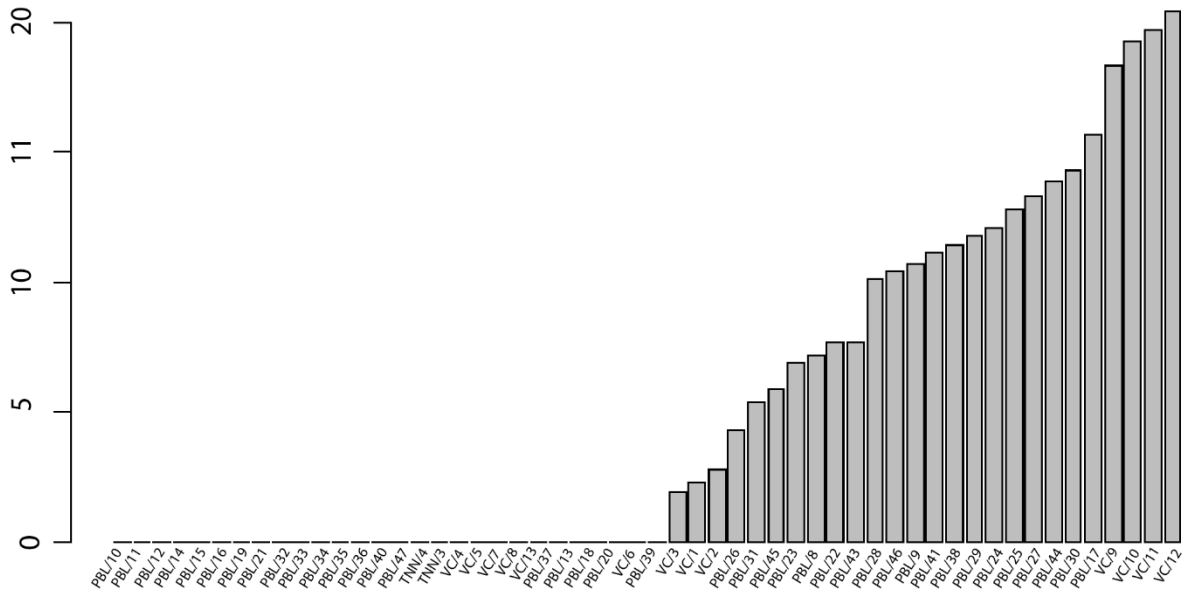


Figure 168 : Distribution des teneurs en étain (%mass.) en fonction des échantillons.

2. Les objets en bronze

Les objets en bronze sont donc composés d'un alliage de cuivre et d'étain en proportion variable (Figure 168 et Tableau 39), avec des taux d'étain de 2 à 19 %mass. Les échantillons composés de bronze sont (Figure 169) : les quatre *ge* (VC/1, VC/2, VC/3 et PBL/8), les haches (PBL/26, PL/31, PBL/45, PBL/22, PBL/9, PBL/38, PBL/29, PBL/24, PBL/25, PBL/44 et PBL/30), la pointe de lance (PBL/31), l'épingle (PBL/23), l'herminette (PBL/28), le couteau (PBL/46), le burin (PBL/17) et trois fragments (PBL/43, PBL/41 et PBL/27). En revanche, il faut noter la présence d'une corrosion intergranulaire qui peut venir fausser les mesures, notamment sur le taux d'étain qui s'en trouve enrichi par rapport à sa teneur originelle. Pour tenter de pallier ce problème, les analyses au MEB-EDS ont été réalisées en évitant le plus possible les zones corrodées. Généralement, la composition de l'alliage de départ doit se situer quelque part entre le taux d'étain des produits de corrosion, qui en sont enrichis, et les autres zones de l'échantillon. Ces échantillons de bronze possèdent des microstructures différentes que nous allons maintenant décrire.

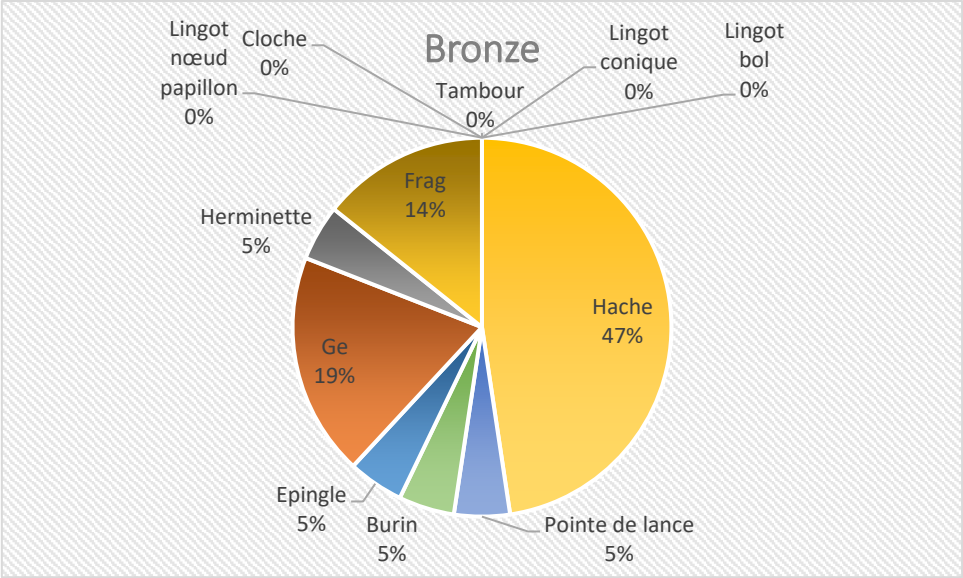


Figure 169 : Diagramme montrant la distribution des objets en bronze par rapport à la typologie.

A. Les bruts de fonderie

Certains des bronzes du corpus possèdent une microstructure de brut de fonderie identifiée par la présence de dendrites (Figure 170). Ces échantillons n'ont donc pas subi de traitement postérieur à l'étape de fonderie. Ce groupe compte une hache (PBL/26), l'épingle (PBL/23) et les trois échantillons de *ge* provenant du musée de Vilabouly (VC/1, VC/2 et VC/3).

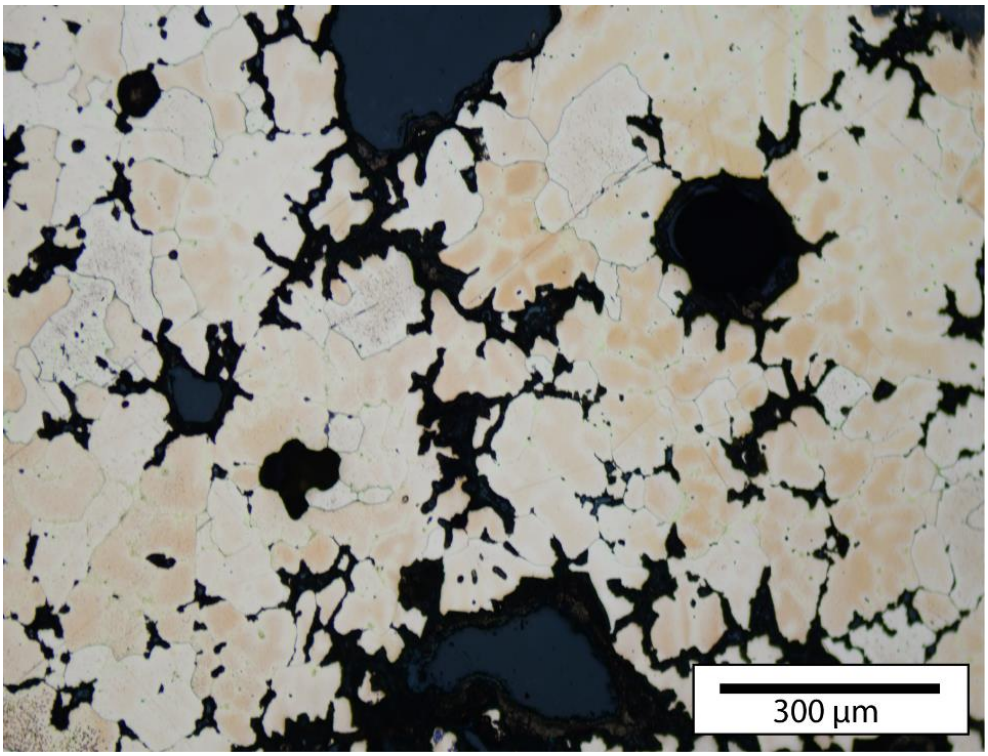


Figure 170 : Image MO de l'échantillon VC/1 qui est un brut de fonderie.

B. Les échantillons martelés

Pour PBL/9 et PBL/22 on observe toujours la présence des dendrites, accompagnées de macles mécaniques, signes que les objets ont été seulement martelés après l'étape de fonderie (Figure 171).

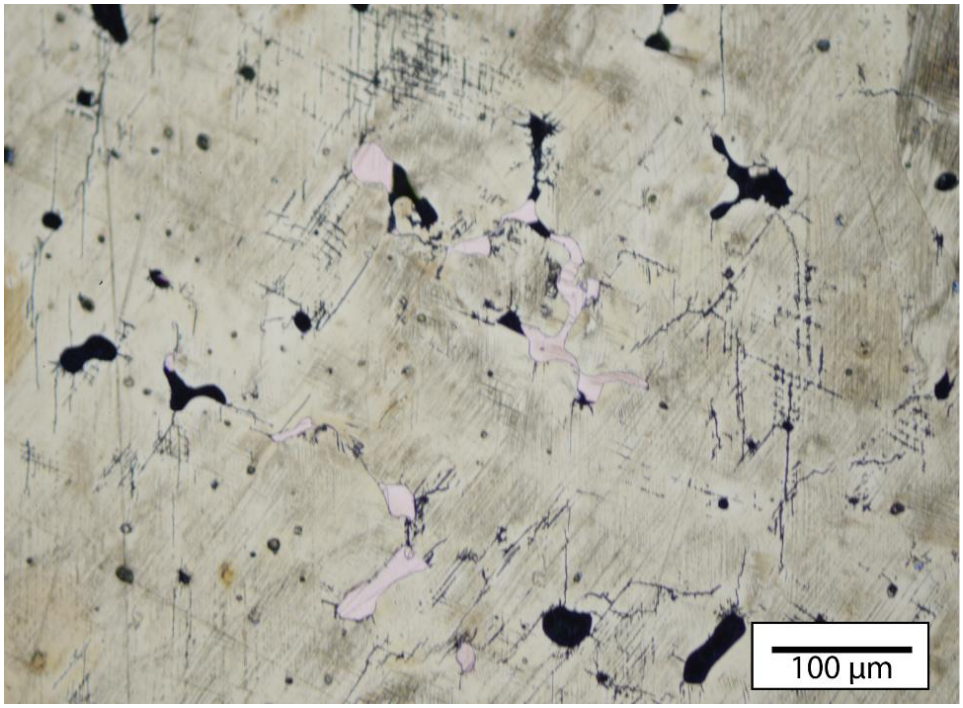


Figure 171 : Image MO (grossissement 20) après attaque de l'échantillon de hache PBL/22 qui a été martelé.

C. Les échantillons recuits et martelés

Sept échantillons de hache (PBL/24, PBL/25, PBL/29, PBL/30, PBL/38, PBL/44 et PBL/45), la pointe de lance (PBL/31), l'herminette (PBL/28), le burin (PBL/17) et un *ge* (PBL/8) ont été martelés et recuits. Cette structure est visible au travers des macles thermiques et mécaniques dans des grains homogénéisés. Pour certains, l'homogénéité n'est que partielle (Figure 172). L'observation de la microstructure ne permet pas de déterminer si la déformation plastique a eu à lieu à froid, puis était suivie d'un recuit, ou si la déformation a été faite à chaud, car les deux procédés mènent à des microstructures similaires.

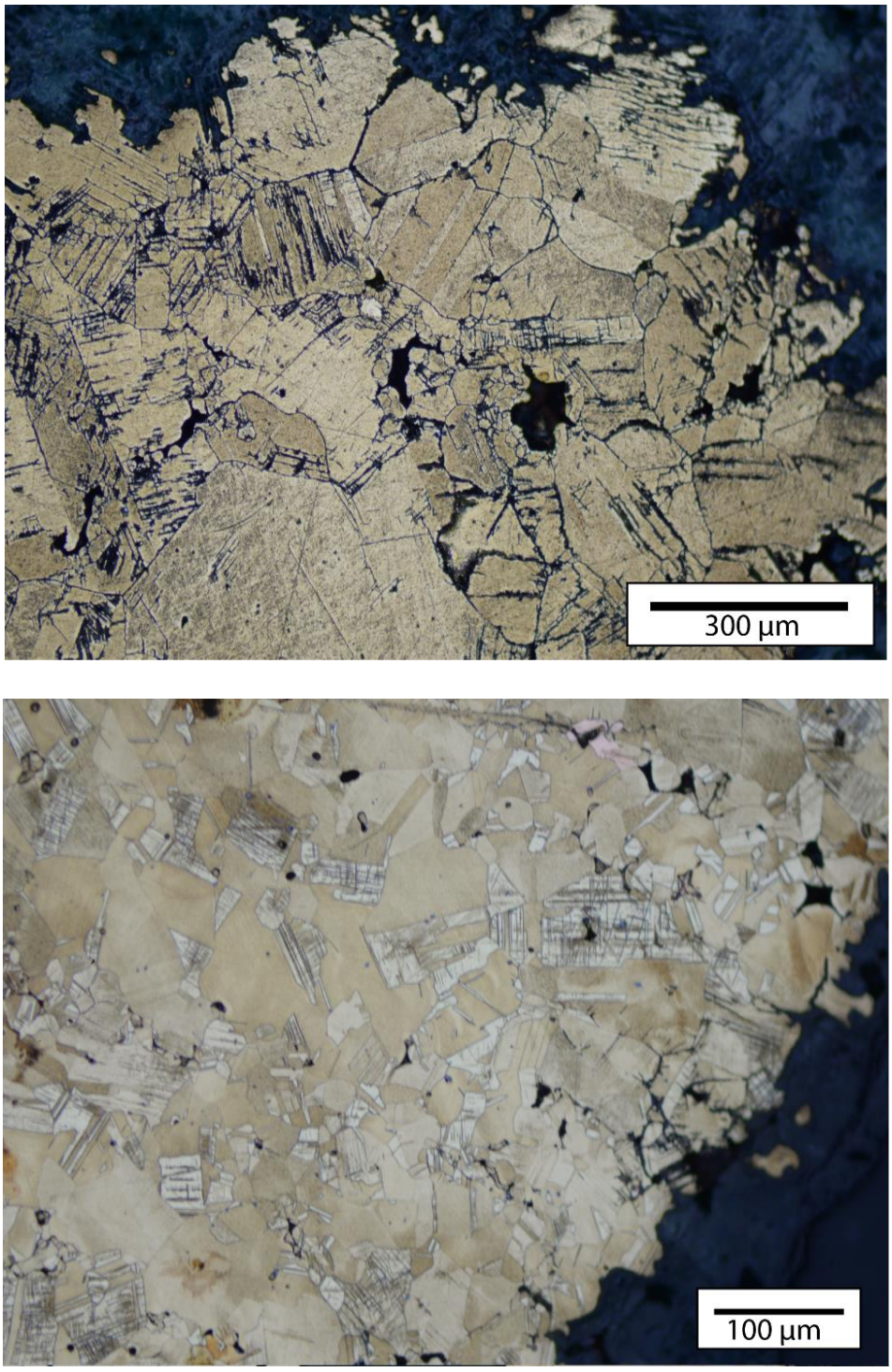


Figure 172 : Deux exemples d'objets martelés et recuits : en haut, image MO (grossissement 10) après attaque de l'échantillon de hache PBL/38 et en bas image MO (grossissement 20) après attaque de l'échantillon de ge *PBL/8.*

Échantillon	Objet	O	Sn	Bi	Pb	As	Zn	Cu	Fe	Al	S	Cl	P	Si	Alliage	Analyses
SEALIP/LA/PBL/10	Lingot nœud papillon	2,0						97,5							Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/11	Lingot nœud papillon	0,5						97,0	2,5						Cuivre (Fe)	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/12	Lingot nœud papillon			0,1	0,2	0,2		98,5	0,9						Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/14	Lingot nœud papillon	1,0						96,0	2,5						Cuivre(Fe)	MEB-EDS

SEALIP/LA/PBL/15	Lingot nœud papillon	2,0					98,0					Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/16	Lingot nœud papillon						99,5	0,5				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/19	Lingot nœud papillon	1,0					96,5	2,5				Cuivre(Fe)	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/21	Lingot nœud papillon	1,0					96,5	2,5				Cuivre(Fe)	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/32	Lingot nœud papillon			0,1			99,3	0,5				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/33	Lingot nœud papillon			0,1	0,1		99,4	0,2				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/34	Lingot nœud papillon				0,1		99,0	0,5				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/35	Lingot nœud papillon	12,0					88,0					Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/36	Lingot nœud papillon						99,5	0,2				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/40	Lingot nœud papillon				0,1		99,6	0,2				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/47	Lingot nœud papillon						99,6	0,2				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/TNN/4	Lingot conique	0,5				0,5	98,0			1,0		Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/TNN/3	Lingot conique	0,5					98,0			1,5		Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/4	Lingot bol	2,0					95,5			1,5	1,0	Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/5	Lingot bol	3,0					93,0			2,0	2,0	Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/7	Lingot bol	1,0					97,0			1,5		Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/8	Lingot bol	2,0					97,0			1,5		Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/13	Tambour	37,0					45,0	1,5	5,0			10,0 -	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/37	Lingot nœud papillon	12,0					87,0					Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/13	Lingot nœud papillon	1,0					95,5	3,5				Cuivre(Fe)	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/18	Lingot nœud papillon			0,1	0,1		98,9	0,8				Cuivre	XRF
SEALIP/LA/PBL/20	Lingot nœud papillon	1,0					97,0	2,5				Cuivre(Fe)	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/6	Lingot bol	5,0					94,0			1,0		Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/39	Lingot nœud papillon	9,5					91,0					Cuivre	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/3	Ge	4,0	2,0				94,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/1	Ge		4,0	0			96,0					Bronze	XRF
SEALIP/LA/VC/2	Ge		6,0				94,0					Bronze	XRF
SEALIP/LA/PBL/26	Hache		7,2		0,1		92,3	0,1				Bronze	XRF
SEALIP/LA/PBL/31	Pointe de lance		10,1		0,1		89,7					Bronze	XRF
SEALIP/LA/PBL/45	Hache		10,4	0,1	0,1		87,9	0,1			1,3	Bronze	XRF
SEALIP/LA/PBL/23	Epingle	1,0	8,0				91,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/8	Ge		11,1				86,0			1,4	1,4	Bronze	XRF
SEALIP/LA/PBL/22	Hache		12,1		0,1		87,1	0,2				Bronze	XRF
SEALIP/LA/PBL/43	Frag	3,0	13,0				84,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/28	Herminette	5,0	11.5				83,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/46	Couteau	0,6	5,5				94,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/9	Hache	3,5	12,0				84,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/41	Frag		13,9		0,1		85,9					Bronze	XRF
SEALIP/LA/PBL/38	Hache	2,5	11,0				86,5					Bronze	MEB-EDS

SEALIP/LA/PBL/29	Hache	6,0	18,0			74,5			0,6		Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/24	Hache	1,5	14,0			84,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/25	Hache	8,0	20,5			71,0				0,5	Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/27	Rod frag	10,0	20,0			69,0		0,7			Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/44	Hache	6,0	13,0			80,0	0,5				bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/30	Hache	4,0	16,0			80,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/PBL/17	Burin	9,0	19,0			71,0					Bronze	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/9	Cloche	6,0	2,0	3,5		88,0					Bronze au plomb	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/10	Cloche	4,0	7,0	7,0	0,8	80,0			0,8		Bronze au plomb	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/11	Cloche	13,0	3,0	5,0	0,5	79,0			0,5		Bronze au plomb	MEB-EDS
SEALIP/LA/VC/12	Tambour		8,0	20,5		70,5	0,4	0,8			Bronze au plomb	XRF

Tableau 39 : Composition élémentaire des échantillons de métal. Données en %mass. obtenues au MEB-EDS (limite de détection = 0,5 %mass.) et en XRF (Limite de détection = 500 ppm, excepté pour les éléments légers Si, Al, P et S). Les blancs dans le tableau représentent des éléments non détectés ou en dessous de la limite de détection.

3. Les bronzes au plomb

Deux types d'objets ont été identifiés comme des bronzes au plomb (Figure 173), alliage ternaire Cu-Sn-Pb : un tambour (VC/12) et les cloches (VC/9, 10 et 11). Le tambour est un brut de fonderie contenant de l'étain à hauteur de 7,7 %mass. et 20,6 %mass. de plomb présent en tant qu'inclusions non miscibles (Figure 175 et Figure 174). On identifie également dans la microstructure du tambour la présence de la phase α + δ. Les cloches sont également des bruts de fonderie avec 4 à 12,7 %mass. d'étain et 2,3 à 6,9 %mass. de plomb. Un échantillon de cloche (VC/11) et un de tambour (VC/13) ont un état de corrosion très avancé. Pour VC/11, l'alliage ternaire pouvait encore être distingué, alors que pour VC/13 il a été impossible de s'en approcher, car l'échantillon ne semble contenir aucune zone exploitable.

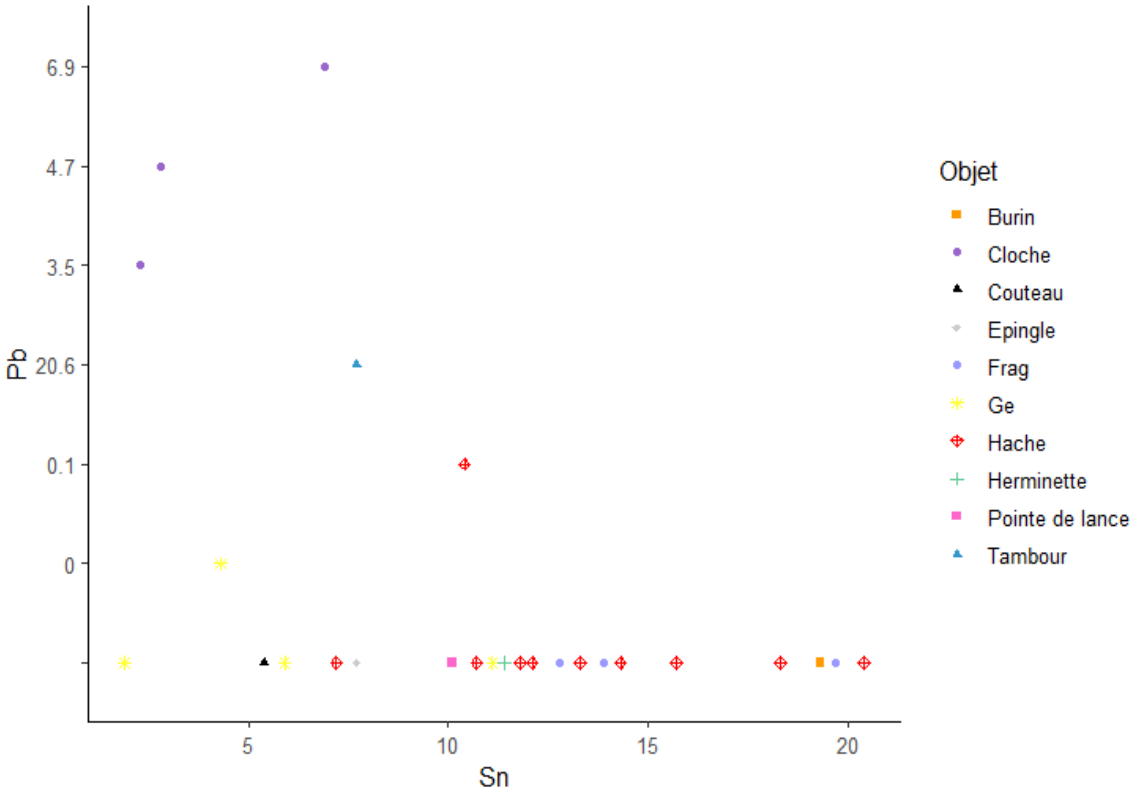


Figure 173 : Diagramme binaire avec les teneurs en plomb et en étain en fonction de la typologie des objets. Données en %mass. au MEB-EDS.

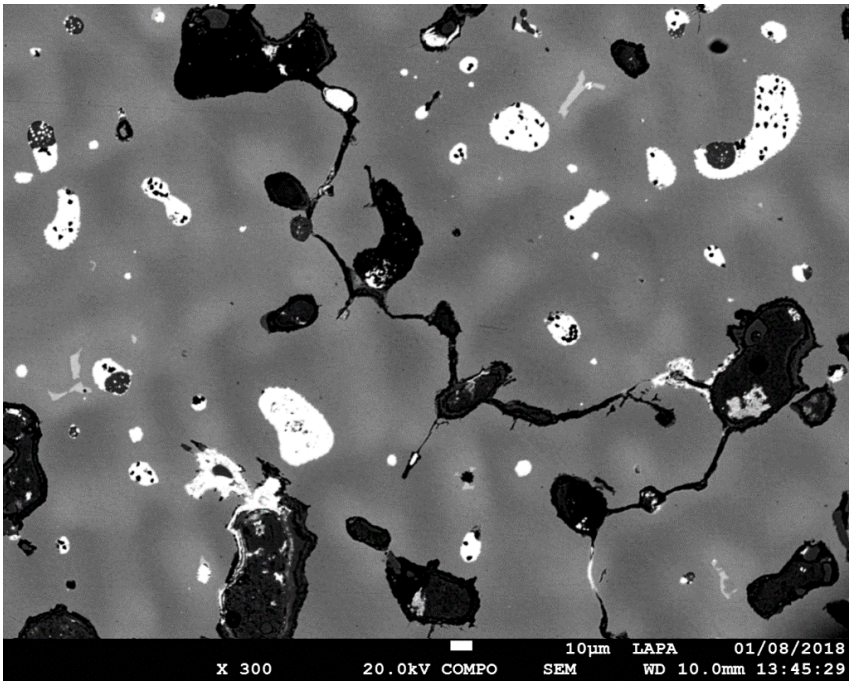


Figure 174 : Image BSE au MEB (grossissement 300) de l'échantillon VC/10 montrant la présence des nodules de plomb (phase blanche).

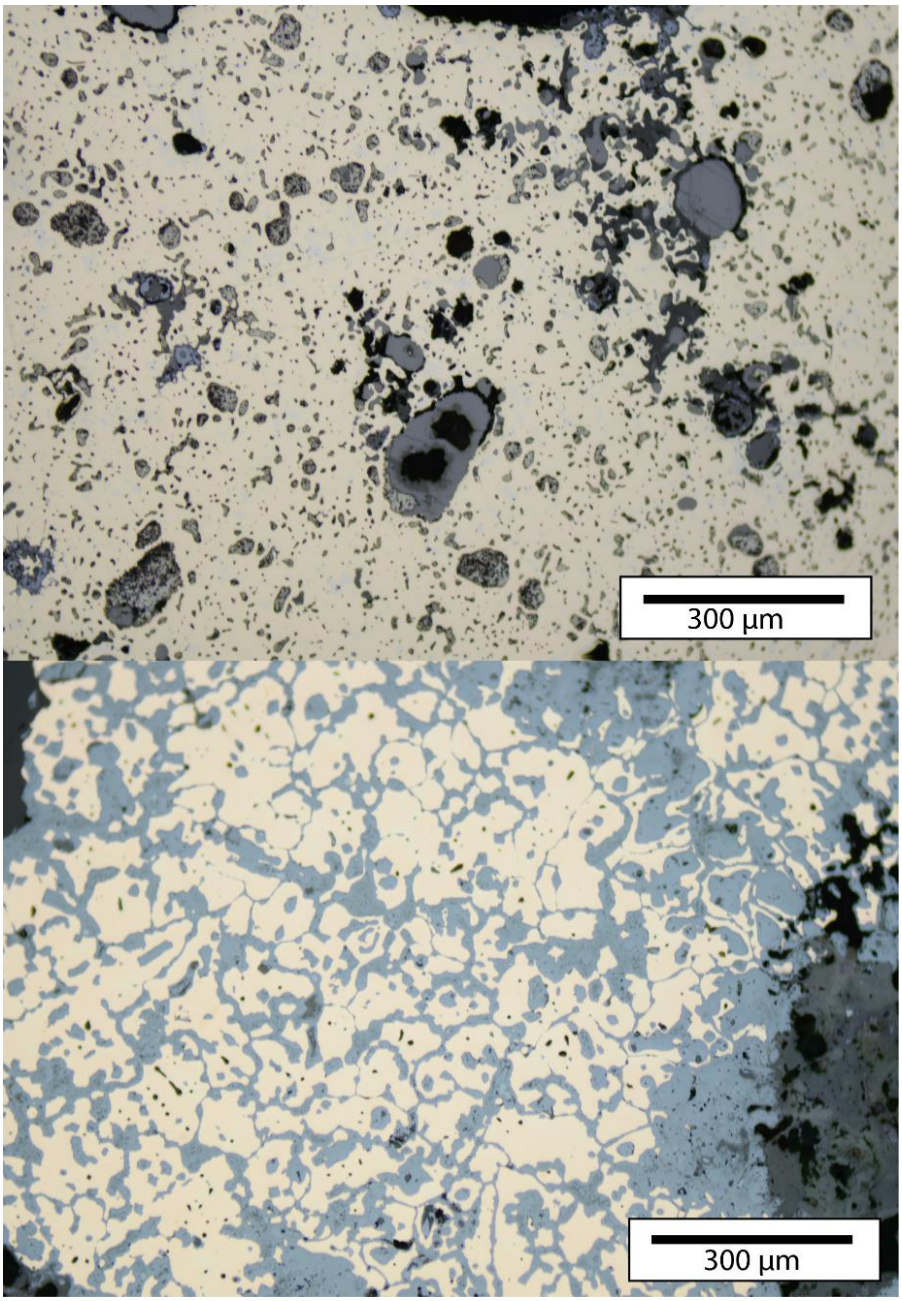


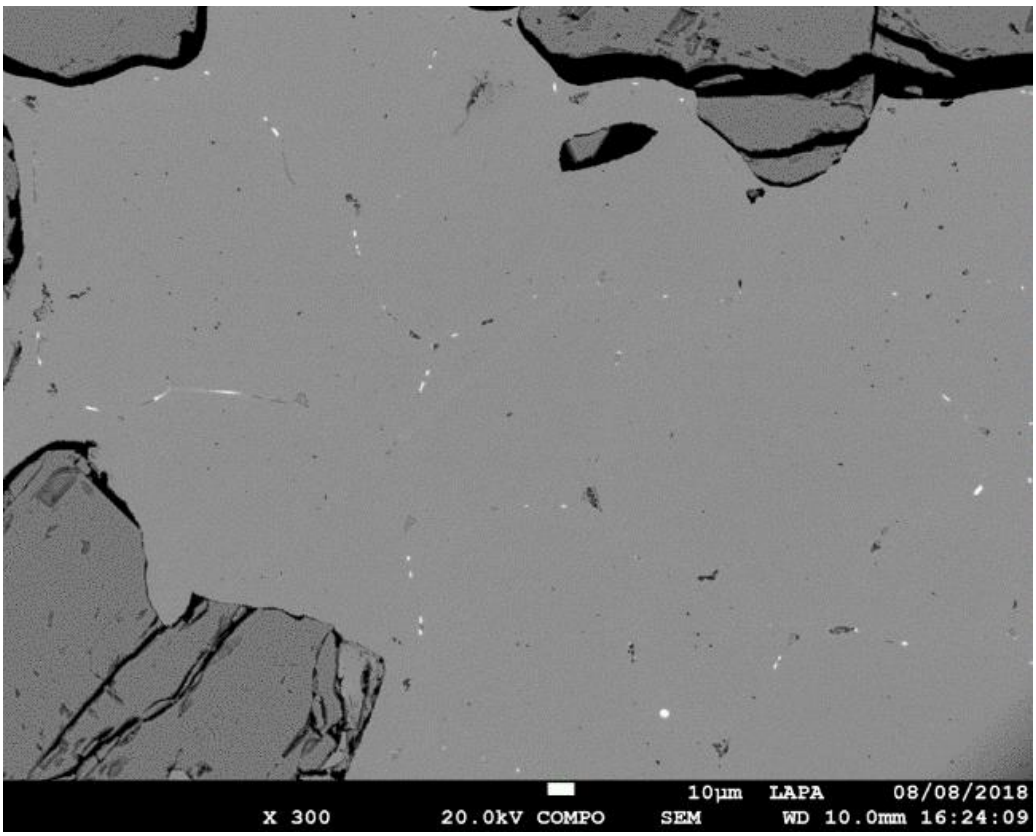
Figure 175 : En haut, image MO (grossissement 10) de l'échantillon de tambour VC/12 avec une structure de brut de fonderie et les inclusions de plomb (gris foncé). En bas, image MO (grossissement 10) de l'échantillon de cloche VC/9 avec une structure de brut de fonderie.

4. Les inclusions

Les observations, au MO et au MEB-EDS en mode électrons rétrodiffusés (BSE), ont permis d'identifier deux types d'inclusions dans les échantillons de Vilabouly : des inclusions de sulfures de cuivre et des inclusions contenant du cuivre, plomb et bismuth, situées dans les espaces intergranulaires. Les inclusions de sulfures de cuivre sont présentes pour presque tous les échantillons en proportions variables, alors que le deuxième type est moins fréquemment identifié (Figure 176). Ces dernières sont principalement présentes pour les lingots (nœud papillon, bol et conique), une cloche (VC/9), le burin (PBL/17), trois haches (PBL/24, 25 et 45)

ainsi que l'herminette (PBL/28). Dans le cas des lingots bol, le plomb n'est pas présent dans ces inclusions, mais est remplacé par l'arsenic.

Les analyses au MEB-EDS permettent également d'avoir accès à la composition globale des inclusions de sulfures de cuivre, avec du cuivre, du soufre et parfois du fer. Les résultats montrent parfois des teneurs inhabituelles de sélénium et de tellure, dans des concentrations jusqu'à 6 %mass. dans le cas d'un échantillon (PBL/22). Le sélénium et le tellure sont souvent retrouvés associés aux minéralisations de cuivre, leur présence dans les inclusions n'est donc pas si surprenante. Ces inclusions peuvent être perçues comme des résidus de la charge de réduction d'origine, non éliminés durant le procédé.



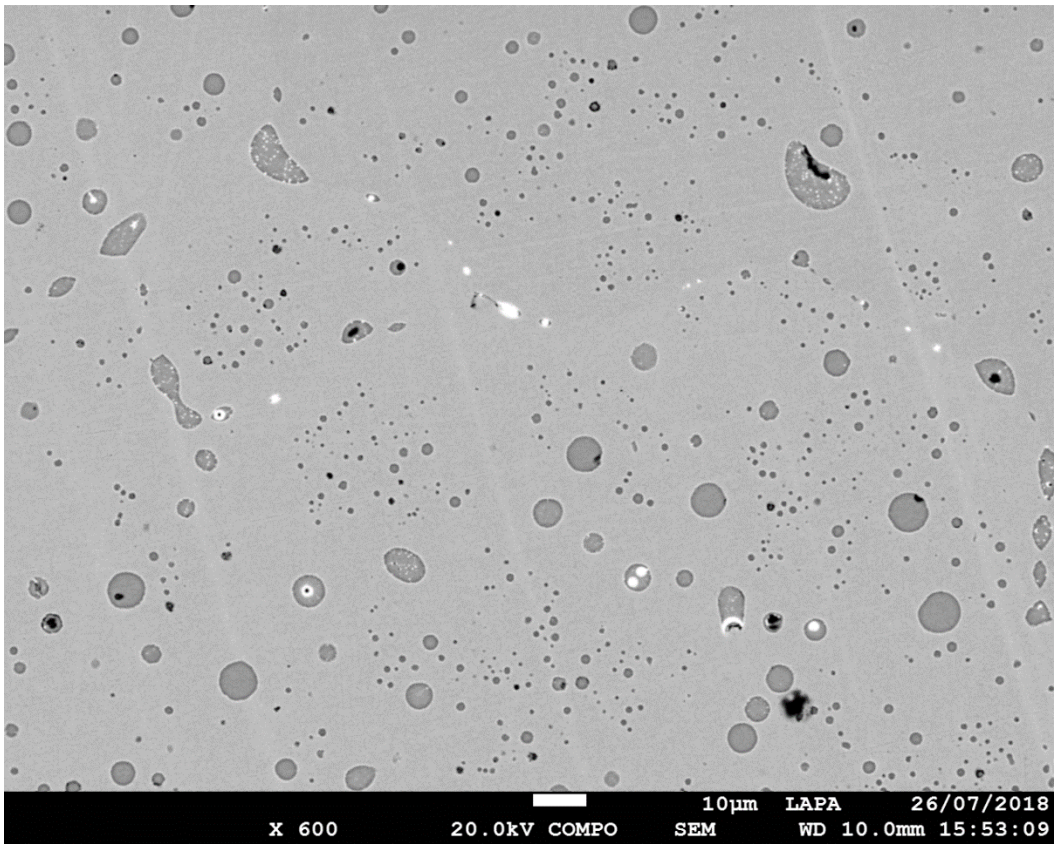


Figure 176 : Images en BSE au MEB-EDS (grossissement 300 et 600) de l'échantillon PBL/40 (en haut) et de l'échantillon VC/7 (en bas) montrant la présence des deux types d'inclusions.

V.5.3. Isotopie du plomb

La signature isotopique du plomb des échantillons du Complexe de Vilabouly a été représentée dans des diagrammes binaires $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$ ratios (Figure 177), accompagnée de celle précédemment obtenue par le *Southeast Asian Lead Isotope Project* (SEALIP, Pryce et al., 2014; Pryce et al., 2011a) pour sept scories de Puen Baolo et deux scories et un lingot de Thong Na Nguak. Les nouvelles données forment une signature homogène, concordante avec celle précédemment obtenue pour SEALIP, renforcent ainsi sa définition, avec tout de même quelques exceptions notables : deux haches (PBL/9 et 45), deux lingots nœud papillon (PBL/10 et 47), l'herminette (PBL/28), le burin (PBL/17), des fragments (PBL/41 et 43), le couteau (PBL/46), deux *ge* (VC/1 et 2), les trois cloches (VC/9, 10 et 11) et les deux tambours (VC/12 et 13). Sachant que les cloches et les tambours sont alliés au plomb, ce n'est donc pas la signature du cuivre que nous obtenons ici. Ces échantillons ne sont pas définis comme concordants, car ils s'éloignent de la signature principale, représentée notamment par les lingots.

Les signatures isotopiques des deux autres productions primaires thaïes, Phu Lon et la vallée de Khao Wong Prachan (Nil Kham Haeng et Non Pa Wai) ont également été ajoutées sur les

diagrammes binaires montrant qu'elles sont bien toutes deux incompatibles avec la signature de Vilabouly (Figure 178).

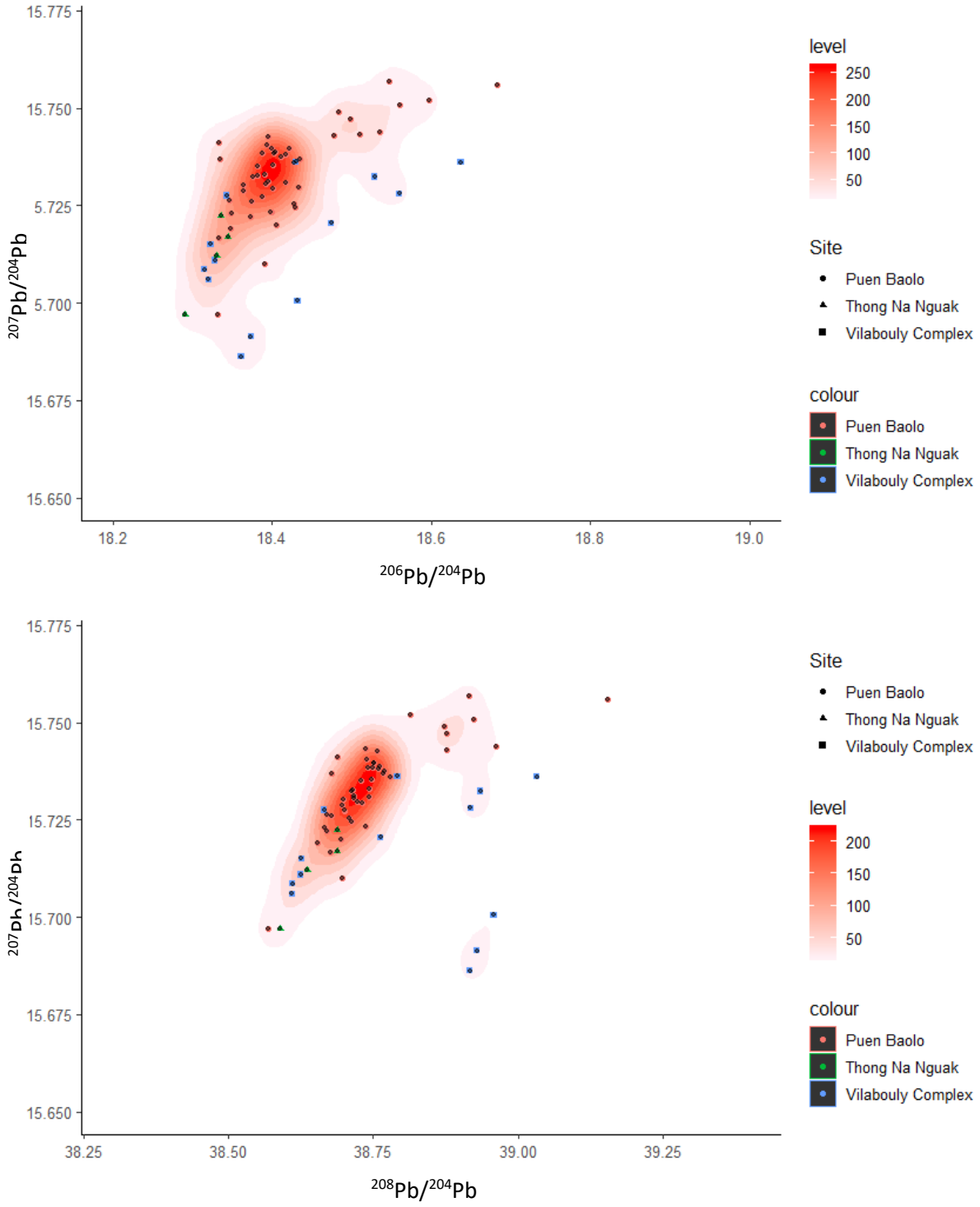


Figure 177 : Diagramme binaire montrant la distribution des échantillons de Vilabouly par sites en fonction de la densité des données (obtenus sur ©Rstudio par l'application du package ggplot *et de la fonction* KDE*).*

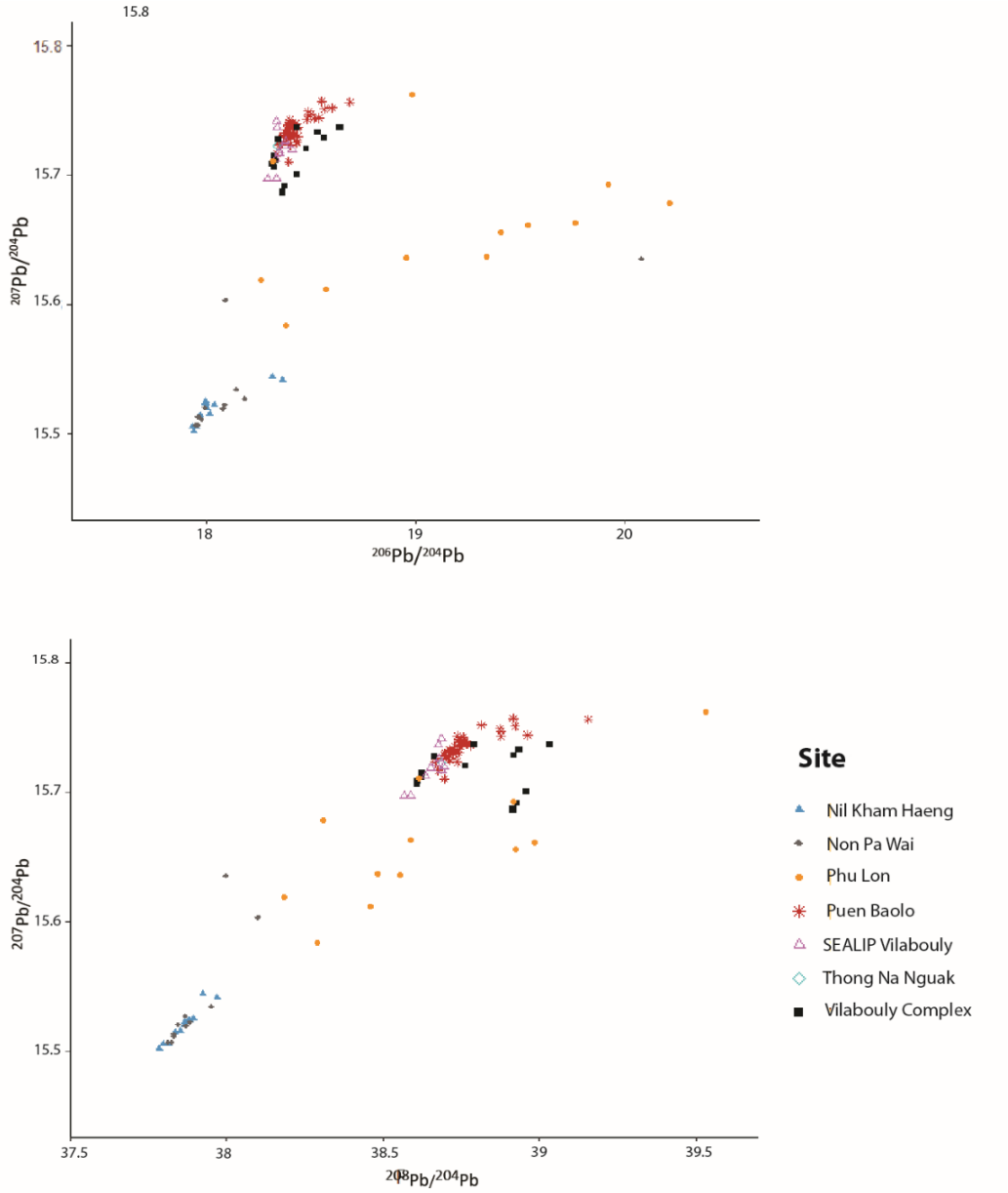


Figure 178 : Données isotopiques du plomb pour le Complexe de Vilabouly, $^{206}Pb/^{204}Pb$ and $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $2^{08}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$. Les données de la vallée de Khao Wong Prachan (Nil Kham et Non Pa Wai), ainsi que Phu Lon ont également été ajoutées. Les bars d'erreurs sont plus petites que les points.

En plaçant sur un diagramme binaire les signatures des lingots par rapport à leur typologie (Figure 179), on peut remarquer de faibles, mais claires distinctions. Les lingots nœud papillon de *Puen Baolo* ont une signature différente des lingots bols et des lingots coniques de *Thong Na Nguak*, pouvant indiquer l'utilisation de minéralisations différentes, bien que locales, peut être variant au cours du temps, en fonction de la localisation et de la profondeur.

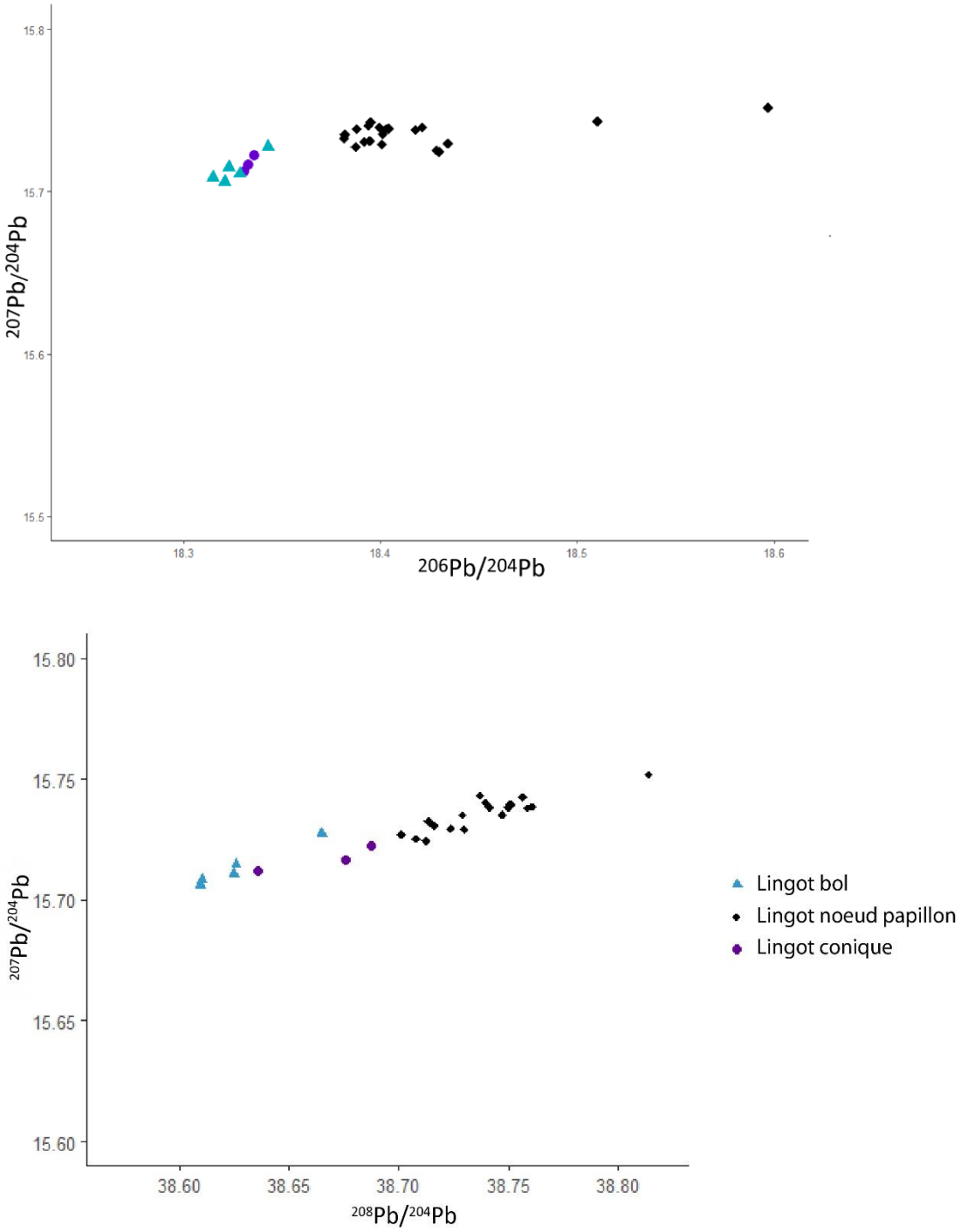


Figure 179 : Diagramme binaire reprenant les données isotopiques par type de lingot (bol, nœud papillon et conique) selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$-$^{207}Pb/^{204}Pb$ (haut) et $^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{207}Pb/^{204}Pb$ (bas).

Autre donnée intéressante, concernant les deux catégories de *ge :* le *ge* de Puen Baolo (PBL/8) perçu comme une importance possède finalement la signature isotopique de Vilabouly, alors que deux *ge* du musée (VC/1 et 2), perçus comme des imitations locales, font partie des exceptions. Cela voudrait dire que des objets appartenant à la culture matérielle chinoise (ou vietnamienne) étaient produits avec du cuivre de Vilabouly, potentiellement à Vilabouly. Ce

résultat s'avère tout particulièrement enrichissant pour la discussion sur les interactions de Vilabouly avec les régions voisines que nous développerons au Chapitre VIII.

V.5.4. Bilan

L'association entre le type de recette (alliage) et les propriétés (mécaniques, esthétiques…) ainsi que la valeur qu'on aurait pu vouloir conférer à l'objet peuvent être appréhendées. En revanche, il est difficile d'établir une relation précise entre la composition exacte de l'alliage et le type d'objet, avec la présence de produits de corrosion, parfois abondants sur certains objets. Ces produits de corrosion empêchent un accès précis à la composition de l'alliage originel.

En prenant les données compositionnelles et microstructurales des objets de Vilabouly, une correspondance semble exister entre le type d'objet et l'alliage choisi pour la confection. Aucune variation n'est notée au sein d'une catégorie d'objet : les lingots sont faits de cuivre non allié ; les haches, la herminette, la pointe de lance, le burin et les *ge* d'un alliage binaire Cu-Sn ; et les cloches et le tambour d'un alliage ternaire Cu-Sn-Pb. Certaines correspondances semblent également pouvoir être établies entre les types et les traitements postcoulée apportés. Les haches sont principalement martelées et recuites, sauf trois exceptions (PBL/9, PBL/22 et 26). Les traitements thermomécaniques permettent de modifier les propriétés d'un objet, en augmentant sa résistance par exemple, ce qui peut être recherché tout particulièrement dans le cas d'objets à vues utilitaires, des outils, comme les haches, mais également l'herminette (PBL/28), le burin (PBL/17) et la pointe de lance (PBL/31). Les cloches et tambours sont des bruts de fonderie, car ils impliquent l'utilisation de moules plus complexes. Ils sont également les seuls à être alliés au plomb, à priori pour la même raison (B. Mille, 2017, p.376), car le plomb permettrait d'avoir une meilleure qualité de coulée à plus basse température et de diminuer l'épaisseur des parois.

Les signatures isotopiques de la majorité des objets analysés sont fortement concordantes avec celles précédemment établies pour Vilabouly (Pryce et al, 2014, 2011). Les lingots tombent dans le champ de Vilabouly, suggérant une production primaire de lingots, avec deux exceptions (PBL/10 et PBL/47). Cela peut être indicatif du recyclage de métaux non locaux ou représentatifs de la variabilité des dépôts de cuivre à Vilabouly.

Les différences macroscopiques mentionnées entre le *ge* de Puen Baolo (PBL/8) et ceux du musée (VC/1,2 et 3) sont confirmées par la composition et la microstructure. En effet, PBL/8 a été martelé et recuit avec des grains homogénéisés portant des macles thermiques et mécaniques. Il possède également un taux d'étain plus élevé à 11 %mass. Alors que, VC/1, 2 et 3 sont des bruts de fonderie, avec une structure granulaire non homogénéisée, ce qui les rend également plus poreux, avec des taux d'étain plus bas entre 1,6 et 6 %mass.

Sur les 21 objets alliés à l'étain analysés, 12 sont concordants avec la signature de Vilabouly, venant renforcer l'hypothèse d'une production secondaire sur le site. Il faut toujours mentionner que le cuivre de Vilabouly pourrait avoir été exporté pour la fonte de bronze sur un autre site et les produits finis réimportés, ou qu'il existe un autre site primaire avec des ratios d'isotopes du plomb similaires.

Les objets alliés non concordants à la signature de Vilabouly sont le burin (PBL/17), l'herminette (PBL/28), deux fragments (PBL/41 et 43), deux haches (PBL/9 et 45), le couteau (PBL/46), deux *ge* (VC/1 et 2), les trois cloches (VC/9,10 et 11) et les tambours (VC/12 et 13). Les 16 exceptions incluent donc sept objets provenant du musée découvert hors contexte de fouille, dont quatre alliés au plomb (cloches et tambour). Il faut également toujours prendre en compte les potentielles pratiques du mélange, alliage et recyclage qui peuvent avoir un impact sur la signature isotopique. Ainsi, elles peuvent aussi expliquer les différences perçues pour les 16 exceptions.

Chapitre 6 : Réductions expérimentales

Des reconstitutions expérimentales ont pu être mises en place avec pour but de tester la faisabilité de certaines hypothèses produites par les études macro, micro et chimiques de l'assemblage archéologique de Vilabouly. Les expérimentations ont eu pour but de tester un mélange de minerais de malachite associée à de la chalcocite et/ou chalcopyrite en une seule étape réductrice, utilisant des creusets comme vaisselles de réaction.

L'introduction de minerais sulfurés dans la charge de réduction a notamment été mise en lumière par l'identification de couche de matte macroscopique dans le corpus (voir partie V.4). Au début de l'étude, l'hypothèse de l'utilisation de malachite, abondante et proche de la surface dans les minéralisations, était préférée, mais l'identification de matte est venue introduire la question de l'utilisation de minerais sulfurés dans la charge de réduction. Les minéralisations de Vilabouly comptent également la présence de minerais sulfurés et tout particulièrement la chalcocite (Cu_2S) qui se retrouve proche et parfois même mélangée aux minerais carbonatés. Cependant, l'étude de l'assemblage de Vilabouly ne semble pas révéler la présence d'un procédé de réduction avec l'utilisation des minerais sulfurés complexes et la production de matte en plusieurs étapes. De plus, la présence abondante de malachite, pour la plupart, associée aux puits de mine anciens, laisse fortement supposer qu'il s'agissait du principal minerai exploité. L'hypothèse privilégiée au vu de l'identification de matte dans le corpus est donc un mélange de minerais, préférentiellement de malachite et de chalcocite. Ce mélange de minerais ne serait pas nécessairement intentionnel, mais dépendant des minéralisations exploitées, qui comme on l'a vu par les analyses isotopiques, auraient potentiellement évoluées.

Différentes études ont pu montrer que le cuivre métallique pouvait être obtenu durant une étape réductrice avec un mélange de minerais carbonatés/sulfurés (R. F. Tylecote, 1980; W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989; D. Bourgarit et B. Mille, 2001; E. Burger et al., 2010; E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010). En revanche, ces études sont presque toutes basées sur des mélanges de minerais de malachite et de chalcopyrite. Or, pour Vilabouly l'implication de la chalcocite est préférée pour la reconstitution technique. À notre connaissance, ce type de mélange de minerais n'a jamais été testé expérimentalement. Burger et consorts ont utilisé la chalcocite associée à la ténorite (CuO) au cours d'expérimentations en atmosphère et température contrôlées en laboratoire, mais seulement pour l'étape de grillage, afin de tester le comportement de la chalcocite à l'oxydation (E. Burger et al., 2011). Hanning et al (2010) emploient également la chalcocite au cours d'un mélange utilisant des minerais naturellement mélangés provenant de Mercês (Espagne). Certaines réductions ont

mené à des produits composés de plusieurs couches (cuivre, matte et scorie) comme observés pour les lingots multicouches de Vilabouly.

Une première tentative de reconstitution expérimentale pour Vilabouly a déjà été réalisée durant une étude de master par Peter Griffin en 2017, en Australie (P. Griffin, 2017). Ces expérimentations étaient en grande partie basées sur l'utilisation du potentiel four mis au jour à PBL et décrit au Chapitre II. En effet, cette structure, portant des signes de chauffe avec des cendres, a été interprétée comme un potentiel four de réduction par l'équipe archéologique. À notre avis, les dimensions de ce four et l'apport en air, trop grands pour cette période, ainsi que les traces de chauffe trop faibles, ne semblent pas aller dans le sens de l'utilisation de cette structure pour la réduction. Nous préférons associer cette structure à une utilisation domestique. Et en effet, lors de cette reconstitution, le four n'a pas été utilisé tel quel : les dimensions du four expérimental ont été réduites par rapport au modèle archéologique (le quart des dimensions originales et un huitième de son volume) pour les rendre plus réalisables avec un impact sur les quantités de charges et la température. La charge était composée de malachite et les opérations ont mené à la production de quelques nodules de cuivre métallique associés en majorité à des scories et des minerais ayant partiellement réagi, non comparables aux évidences archéologiques.

Les résultats dénotent des conditions insuffisantes et/ou non maintenues. Les produits de cette expérimentation viennent renforcer l'hypothèse que cette structure ne soit pas un four de réduction. Nous n'excluons pas la possibilité que cette structure soit une fosse employée pour une étape du procédé métallurgique, mais elle ne semble pas compatible avec l'utilisation des creusets, car leurs dimensions (≈10-15 cm de diamètre) sont bien inférieures à celles de cette fosse. La faible résolution chronologique de Vilabouly ne nous permet pas d'identifiés de changements au cours du temps. Ces fosses pourraient également représenter une forme plus récente du procédé.

VI.1. Conditions expérimentales

Les matières premières utilisées, pour les minerais et les creusets ne proviennent pas du Complexe de Vilabouly pour cause des difficultés et du coût d'exportation des quantités nécessaires. Les expérimentations au Laos n'étaient pas réalisables d'un point de vue logistique dans une zone minière active et la forte présence d'UXO (*UneXploded Ordnance*).

Par conséquent, nos reconstitutions expérimentales ont été réalisées à la plateforme expérimentale de Melle (Deux-Sèvres) avec l'aide de Florian Tereygeol Directeur de recherches au CNRS, en utilisant des matériaux de provenances variées, afin de produire des déchets comparables, morphologiquement et chimiquement, aux évidences archéologiques. Ces expérimentations avaient un but plus qualitatif que quantitatif.

VI.1.1 Les minerais

Les charges expérimentales sont un mélange de différents minerais en différentes proportions (Tableau 40) : malachite/chalcopyrite, malachite/chalcocite et malachite/chalcocite/chalcopyrite. La malachite provient des mines de Katanga au Congo avec un niveau de pureté élevé (55 %mass. de cuivre), la présence mineure de zinc (1 %mass.) et de plomb (0,7 %mass.). La chalcopyrite provient des mines du Burc en France, avec également un niveau de pureté élevé (33 %mass. de cuivre). La chalcocite a seulement pu être obtenue en petite quantité et pour un coût assez élevé (300 euros pour 2 kg) d'une collection géologique privée, avec une origine géologique inconnue. La chalcocite se compose principalement de cuivre (75 %mass.) et de soufre (20 %mass.) avec des composés mineurs de fer (1 %mass.) et de zinc (1 %mass.). L'utilisation de chalcopyrite n'est pas la plus probable pour la reconstitution technologique de Vilabouly, mais elle va ici servir de comparatif avec les autres mélanges testés ainsi que pour une familiarisation avec le dispositif expérimental, compte tenu du peu de chalcocite disponible. La charge totale par réduction est fixée à 150 g, basée sur le volume utilisable des creusets archéologiques reconstitués de 150 mm de diamètre. L'effet de la taille des grains a été testé en concassant et triant la charge suivant différentes classes : 5 mm, entre 5 et 3,5 mm, entre 3,5 et 2 mm, en dessous de 2 mm et des blocs de minerais non concassés.

	Mélange minerais	Rapport masse	Charge	Malachite (g)	Chalcopyrite (g)	Chalcocite (g)	Taille de grain	Temps	Creuset	Contenant de coulée	Total produit
Réduction 1	Ma/chalp	4:1	150	120	30	-	+ 5 mm	41 min	Cuit	Sable de fonderie	20 g
Réduction 2	Ma/chalp	4:1	150	120	30	-	5-3,5 mm	30 min	Cuit	Sable de fonderie	30 g
Réduction 3	Ma/chalp	4:1	150	120	30	-	3,5-2,5 mm	30 min	Utilisation creuset Red 2	Sable de fonderie	23 g
Réduction 4	Ma/chalp	4:1	150	120	30	-	3,5-2,5 mm	45 min	Cru	Sable de fonderie	22 g
Réduction 5	Ma/chalp	1:1	150	75	75	-	+ 5 mm	76 min	Cru	Sable de fonderie	43 g
Réduction 6	Ma/chalp	1:1	150	75	75	-	5-3,5 mm	84 min	Cru	Cendres	36 g
Réduction 7	Ma/chalp	1:2.5	150	110	40	-	+ 5 mm	47 min	Utilisation creuset Red 6	Cendres	77 g
Réduction 8	Malachite	-	160	160	-	-	Blocs	69 min	Cru	Cendres	83 g
Réduction 9	Ma/chalc	1:1	150	75	-	75	+ 5 mm	69 min	Cru	Cendres	83 g
Réduction 10	Ma/chalc	1:1	150	75	-	75	5-3,5 mm	70 min	Utilisation creuset Red 9	Sable de fonderie	40 g
Réduction 11	Ma/chalc/chalp	1:1:1	150	50	50	50	+ 5 mm	62 min	Utilisation creuset RED &à	Sable de fonderie	108 g
Réduction 12	Ma/chalc/chalp	1:1:1	150	50	50	50	5-3,5 mm	70 min	Cru	Sable de fonderie	106 g
Réduction 13	Ma/chalc	1:1	150	75	-	75	- 2,5 mm	75 min	Cuit	Cendres	76 g
Réduction 14	Ma/chalp	1:1	150	75	75	-	+ 5 mm	84 min	Cru	Sable de fonderie	79 g
Réduction 15	Ma/chalc/chalp	1:1:1	180	60	60	60	Blocs	62 min	Cru	Sable de fonderie	132 g
Réduction 16	Ma/chalc	4:1	150	120	-	30	Mix	120 min	Cru	Sable de fonderie	49 g
Réduction 17	Ma/chalc	9:1	150	135	-	15	Mix	90 min	Cru	Sable de fonderie	62 g

Tableau 40 : Conditions expérimentales. Ma= malachite, Chalp= chalcopyrite et Chalc= chalcocite.

VI.1.2. Les creusets, la structure de chauffe et l'apport en air

À la suite des analyses en laboratoire des creusets archéologiques (voir partie V.2), leur utilisation durant l'étape de réduction a été proposée, en addition à un foyer de chauffe. Cette utilisation fait donc partie de la reconstitution technologique à tester durant les expérimentations. Les creusets expérimentaux ont été mis en forme par François Peyrat, un potier professionnel, en utilisant des matières premières les plus proches de ce qui a été observé pour les creusets archéologiques. A savoir : une argile non calcaire à fort taux d'aluminium et pauvre en fer, possédant un taux élevé de grains de quartz et un dégraissant organique de balle de riz. L'argile utilisée pour concevoir les creusets expérimentaux est la *Terre de Langeais* qui est réfractaire, riche en silice (63 %mass.) et alumine (25 %mass.), pauvre en fer (4,5 %mass.) contenant d'autres éléments mineurs comme le potassium (2 %mass.), la calcite (1 %mass.) et le titane (1 %mass.). Les creusets archéologiques ont une surface interne relativement plate, ainsi qu'une partie externe convexe, mais les creusets expérimentaux (Figure 180) ont été préférés avec une partie externe plane afin de faciliter le déplacement du creuset lors des opérations. De plus, ce changement de forme n'a aucun effet sur le volume utilisable du creuset. Des creusets expérimentaux cuits et crus ont été utilisés afin de tester le comportement des deux types.

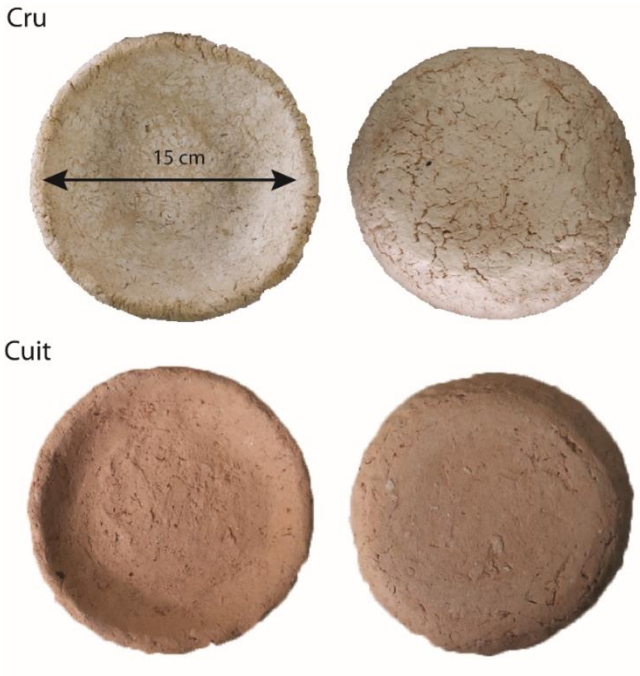


Figure 180 : Les deux types de creusets utilisés.

Nous avons vu au Chapitre II que différents types de fosses ont pu être mis au jour à Vilabouly. Cependant, il ne nous a pas été possible d'établir un modèle de fosse précis, car les formes et les dimensions des fosses sont trop variables et la chronologie imprécise. En l'absence de ce modèle, les creusets ont été placés dans un foyer (Figure 181), une simple fosse dans le sol

avec un revêtement argileux et un côté ouvert afin de faciliter la sortie du feu du creuset. Ce foyer est nécessaire dans le cadre des expérimentations afin de permettre la chauffe apicale.

Aucune tuyère ou fragment n'ont également été découverts à Vilabouly. La même constatation est aussi vraie pour la Vallée de Khao Wang Prachan, où des expérimentations similaires ont suggéré qu'un apport en air naturel ou par l'utilisation du vent était peu probable, et qu'un dispositif d'apport en air forcé devait être présent (T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010). Notre dispositif d'apport en air expérimental est de même forcé en utilisant un soufflet à main en cuir avec une tuyère coudée à 90° (E. Burger, 2008; E. Burger et al., 2011).

Le creuset était placé sous la tuyère et recouvert de larges fragments de charbon de bois (jusqu'à 150 mm de long) et les espaces vides comblés avec des fragments de plus petits diamètres. Le charbon provient d'une essence européenne, le hêtre, évidemment différente des essences disponibles au Laos. La température était ensuite élevée à 800-900°C et maintenue pendant environ 30 min, basée sur des opérations faites par Emilien Burger qui avait pu noter qu'au-delà de cette limite le mélange avait une tendance à s'agglomérer, empêchant le départ du SO_2 (E. Burger, 2008). Une fois que la plupart du SO_2 est perçu comme ayant été éliminé, la température est augmentée. Les changements de températures étaient contrôlés par l'utilisation d'un thermocouple (type K, class 1 simple) jusqu'à ce que ses limites, de 1200°C soient atteintes. Le thermocouple avait seulement un but indicatif, car les températures sont très variables dans le creuset et plus d'un thermocouple aurait été nécessaire afin d'avoir accès à des informations précises sur la température. La température est également contrôlée par l'opérateur avec les changements de couleur à l'intérieur du feu.

De plus, lorsque le contenu du creuset a atteint l'état liquide, ce dernier est retiré du feu en utilisant une pince en fer et le mélange directement coulé dans une autre vaisselle, contenant du sable de fonderie ou des cendres (Figure 182), dans laquelle une empreinte arrondie était préalablement faite. Le sable de fonderie et les cendres ont été choisis pour recevoir le mélange liquide, en l'absence de preuves archéologiques pour le contenant de coulée. Ce choix a également été fait parce que les produits archéologiques ont des surfaces lisses sans signe de pollutions, montrant que le contenant n'a pas réagi avec le mélange fondu, ce qui est le cas pour le sable de fonderie et les cendres. Du matériel de sécurité (gants et tablier de protection) a également été employé durant la totalité des expérimentations afin de prévenir tout problème.



Figure 181 : Le dispositif expérimental utilisé.



Figure 182 : Les différents contenants utilisés pour la coulée du mélange. En haut à gauche, le sable de fonderie et en haut à droite, les cendres. En bas : exemple de coulée après une réduction.

VI.2. Résultats

Les produits et sous-produits des réductions expérimentales ont été étudiés suivant les mêmes méthodes que les échantillons archéologiques (voir Chapitre IV). Les produits ont été sectionnés en deux parties puis placés en résine époxy et polis. Les différentes phases ont été

observées en Microscopie Optique (MO) et au Microscope électronique à Balayage couplé à un Spectromètre à Dispersion d'Energie (MEB-EDS).

Les températures et conditions redox attendues pour un mélange coulé en creuset, avec séparation par gravité du cuivre métallique, ont été atteintes pour la plupart des réductions expérimentales. À l'exception, des réductions 1 à 5, avec des mélanges de malachite/chalcopyrite, qui ont mené à des mélanges agglomérés difficiles à couler, où le produit était un agglomérat de nodules de cuivre avec de la matte et des minerais grillés.

L'oxydation complète des sulfures n'a jamais été atteinte, amenant à la formation de matte avec toutes les variations de charge. Quatre types de produits et sous-produits peuvent être différenciés après les réductions : cuivre métallique, matte, minerais ayant partiellement réagi et des scories. Les principaux produits se composent de cuivre métallique et de matte récupérés après que le mélange ait été coulé (Figure 183, Figure 184 et Figure 185). Le cuivre et la matte forment de petits lingots hémisphériques, avec des masses de 40 à 132 g, des diamètres entre 28 et 43 mm et une épaisseur de 10 à 14 mm. Pour la majorité, le cuivre, plus dense, se forme en bas du lingot, il est recouvert par une couche de matte, comme dans le cas des lingots de Vilabouly. Dans certains cas, seuls le cuivre métallique (réductions 8 et 17) ou la matte (réductions 7 et 12) sont présents. Le cuivre métallique peut aussi se retrouver sous la forme de petits nodules indépendants de quelques millimètres. Il n'a pas été possible d'accéder aux masses des différents produits et sous-produits indépendamment, car cela aurait impliqué un concassage. Or, les produits ont été analysés en conservant les transitions entre les différentes phases.

VI.2.1. Le cuivre métallique

Le cuivre métallique a été obtenu de toutes les réductions, en dépit des différents ratios de minerais. Le cuivre métallique est dans la plupart présent en couche macroscopique, parfois piégée dans la couche de matte en veines. Le cuivre contient jusqu'à 2,5 %mass. de soufre, présent dans des inclusions arrondies (Figure 183). Le cuivre contient également jusqu'à 2 %mass. de zinc et de fer en solution solide, ainsi que de plomb présent en inclusion. Ces éléments sont présents dans les minerais d'origines. La composition globale du cuivre métallique ne semble pas être affectée par les ratios de minerais. En revanche, les inclusions de sulfures peuvent contenir jusqu'à 10 %mass. de fer lorsque la chalcopyrite est présente dans la charge.

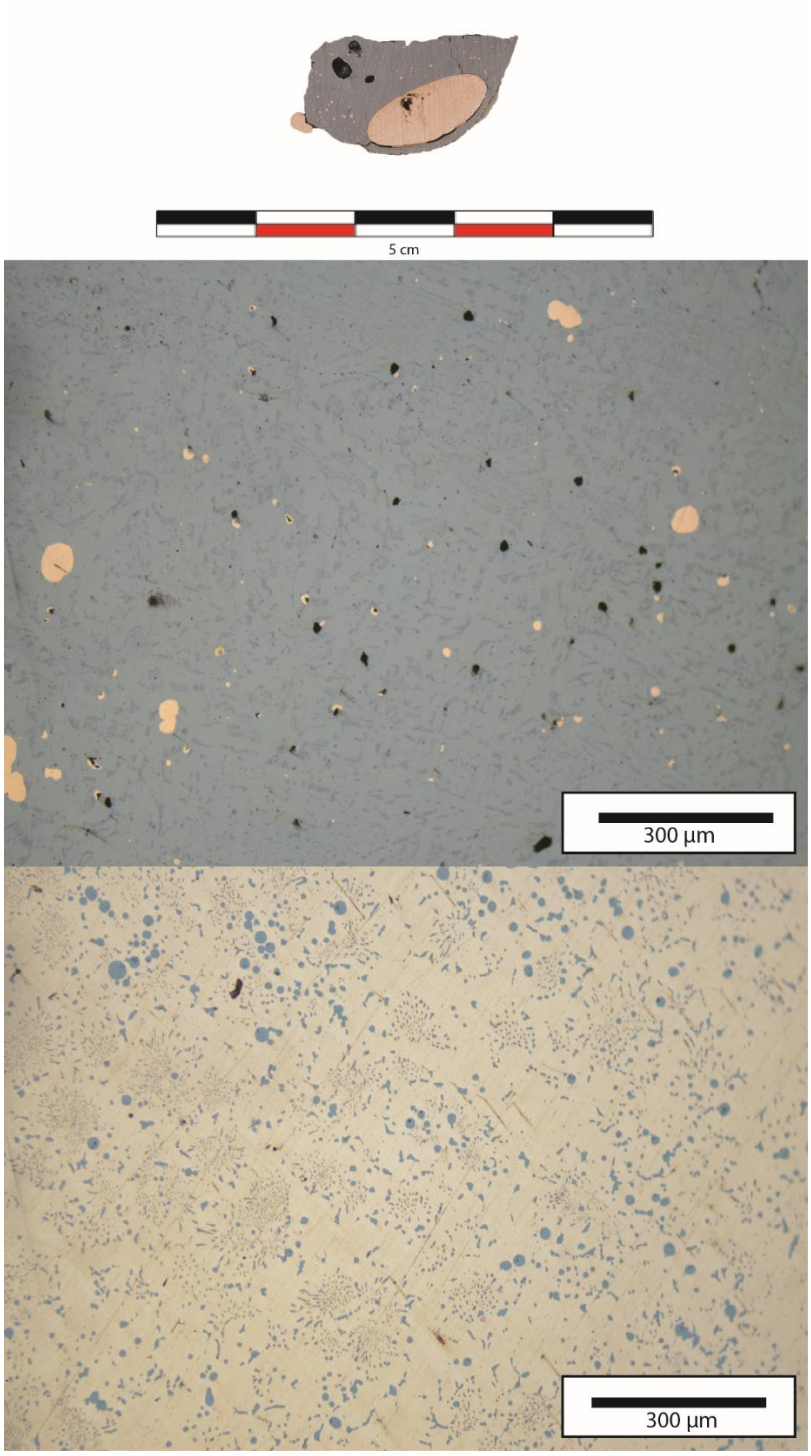


Figure 183 : De haut en bas produit de la réduction 10 avec les images MO associées des couches de matte et de cuivre métallique (grossissement 10).

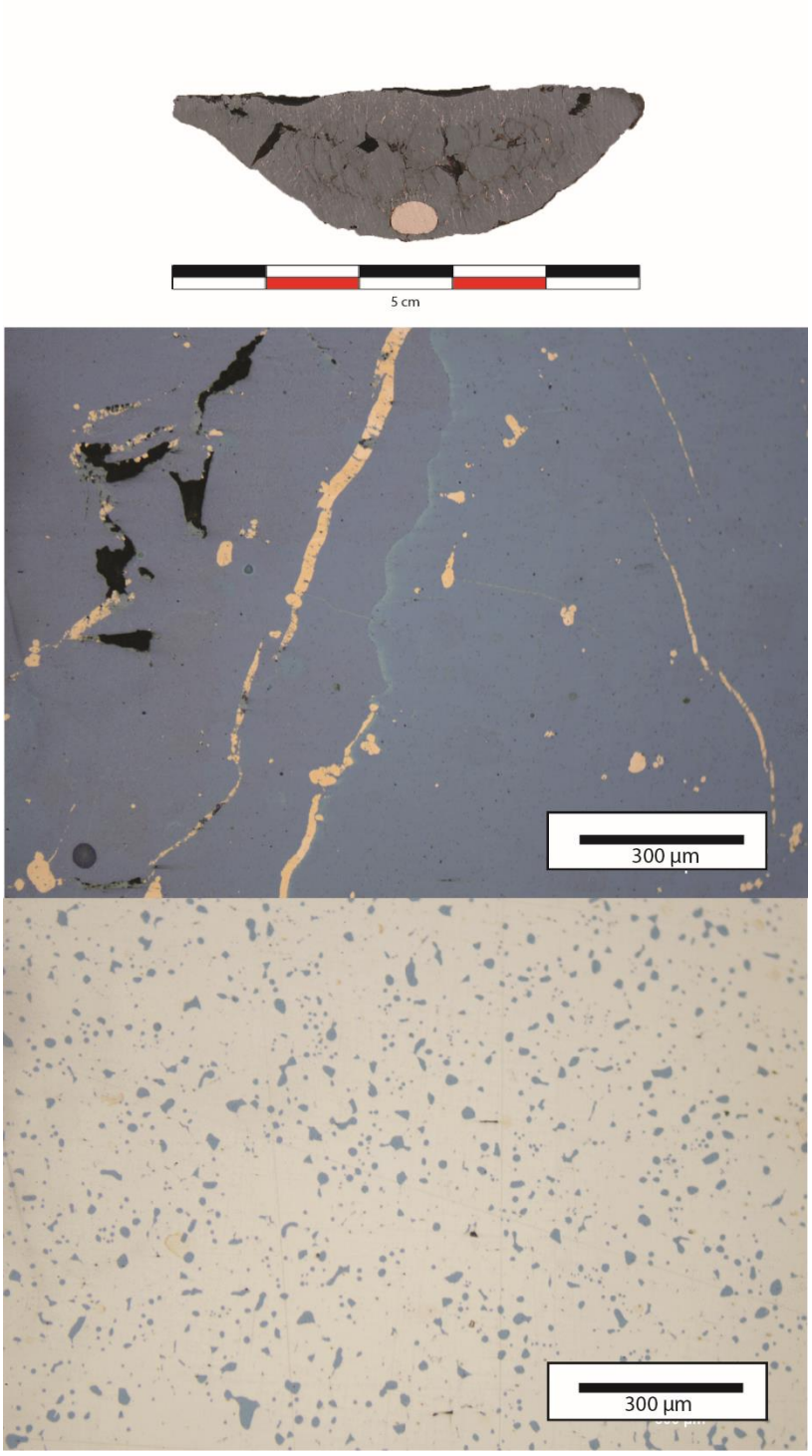


Figure 184 : De haut en bas produit de la réduction 11 avec les images MO associées à la couche de matte et à la couche de cuivre métallique (grossissement 10).

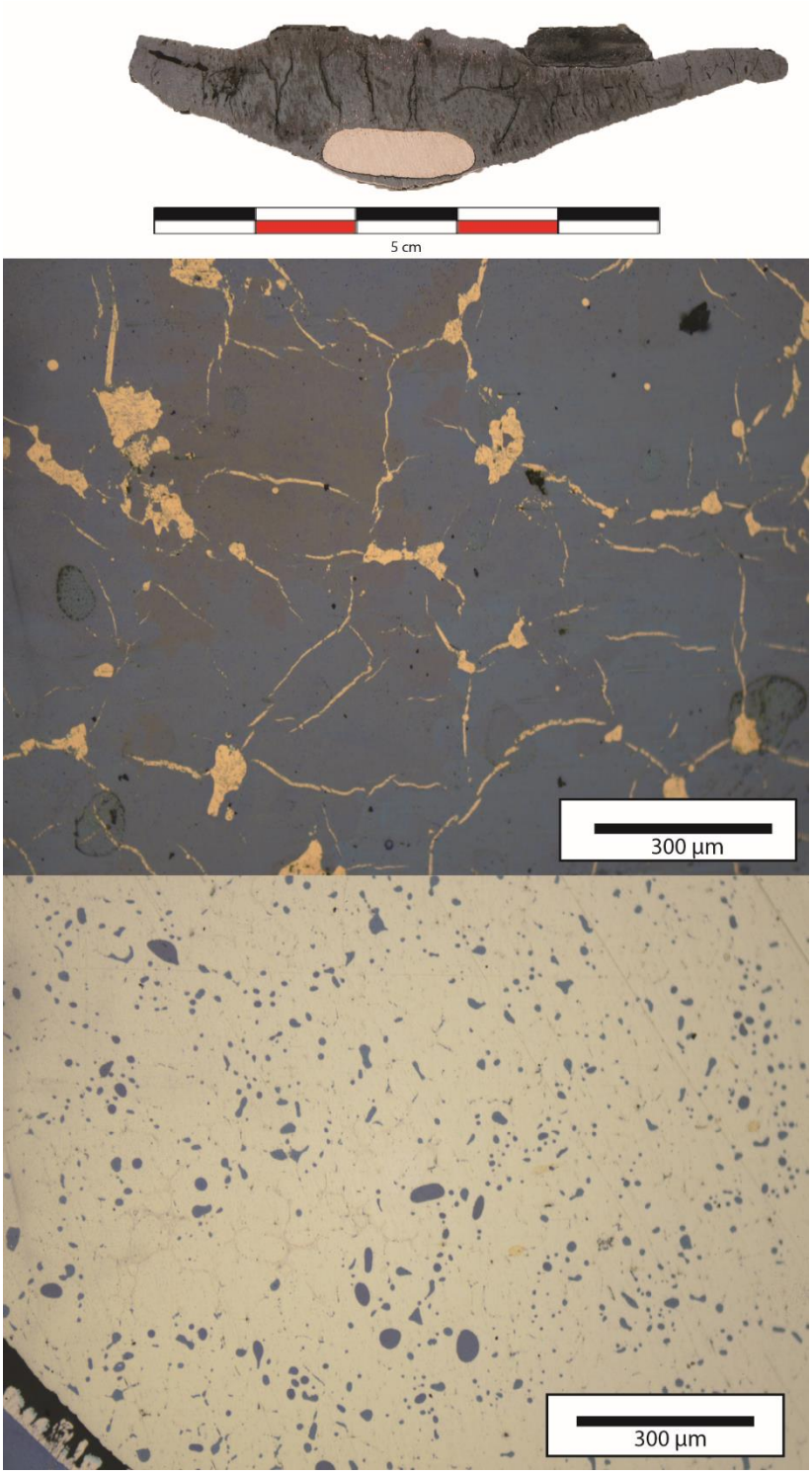


Figure 185 : De haut en bas, produit de la réduction 14 avec ses images MO associées des couches de matte et de cuivre métallique (grossissement 10).

VI.2.2. La matte

Comme attendu, la composition des couches de matte varie en fonction des charges de minerais utilisées. Différents types de microstructures peuvent également être observés : en nodules et en lamelles. Pour certaines réductions, une dissolution de la matte en deux phases peut être observée (réductions 4, 5, 7, 10 et 14). Afin de prendre des exemples représentatifs

des principaux mélanges utilisés durant les réductions, nous allons nous concentrer sur les réductions 10, 11 et 14 (Figure 183, Figure 184 et Figure 185). La réduction 10 (Figure 183) était un mélange de malachite et de chalcocite en même proportion (75g/75g). Cette charge produit une matte avec 78 %mass. de cuivre et 19 %mass. de soufre.

La réduction 11 (Figure 184) était un mélange des trois minerais malachite/chalcocite/chalcopyrite en même proportion. La matte produite se compose de cuivre à 67 %mass., de soufre à 22 %mass. et de fer à 9 %mass. Le fer vient de la chalcopyrite.

Lorsque la charge est composée seulement de malachite et de chalcopyrite en même proportion, comme pour la réduction 14 (Figure 185), le taux en fer dans la matte finale augmente à 15 %mass., avec 60 %mass. de cuivre et 22 %mass. de soufre.

Les réductions 16 et 17 (Figure 186) avaient pour but de diminuer le taux de minerai de chalcocite dans la charge, afin de tester la limite de formation de la couche de matte. La réduction 16 contenait 20% de chalcocite (30 g) et la réduction 17 seulement 10% (15 g). Avec 20% de chalcocite, la couche de matte est présente dans le produit final, mais lorsque la chalcocite est abaissée à 10%, la couche n'est plus produite. Ainsi, le taux de minerai sulfuré dans la charge doit au minimum être de 20% afin de produire une couche macroscopique de matte. La composition de la matte de la réduction 16 est de 80 %mass. de cuivre et 19 %mass. de soufre tout comme pour la réduction 11, signifiant que seule l'épaisseur de la couche de matte est affectée par ce changement.

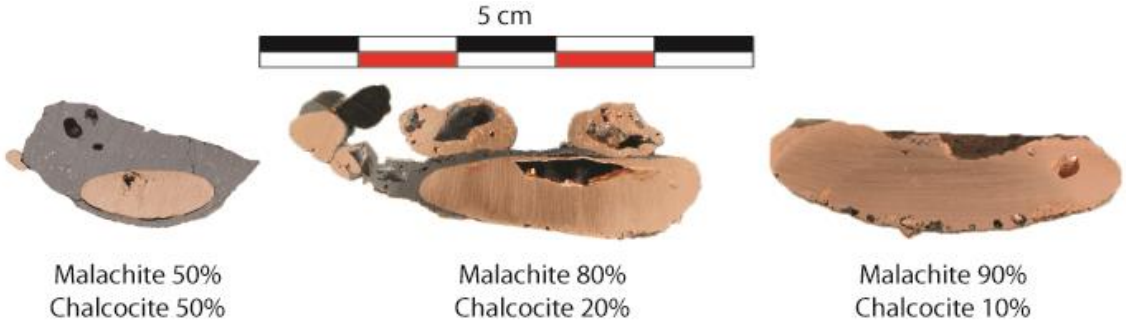


Figure 186 : Comparaison des différents produits issus du mélange malachite/chalcocite montrant la diminution de la matte en fonction de la quantité de chalcocite ajoutée.

VI.2.3. Les scories

Le but de ces expérimentations n'était pas de produire des scories et comme aucun fondant n'a été ajouté à une charge de minerais assez pure, très peu de scories ont été produites.

Les faibles quantités de scories retrouvées sont généralement hétérogènes et grossières, contenant des minéraux n'ayant pas réagi (Figure 187), des inclusions de cuivre métallique et de matte en grandes proportions. Des phases cristallisées sont également présentes :

principalement la fayalite et des oxydes de fer (magnétite, et peu de wüstite) dans une phase vitreuse. La présence de ces phases cristallisées est indicative que les températures suffisantes de 1100-1200°C aient été atteintes pour leur formation, mais non suffisamment maintenues ou excessives pour une bonne séparation scorie/matte/cuivre (C. H. Donaldson, 1976; H. G. Bachmann, 1982). Comme aucun fondant n'a été ajouté pour modeler un ratio Fe/Si optimal pour la formation de scories liquides de composition fayalitique (T. Rehren et al., 2007; M. F. Charlton et al., 2010), ce résultat n'est pas si surprenant.

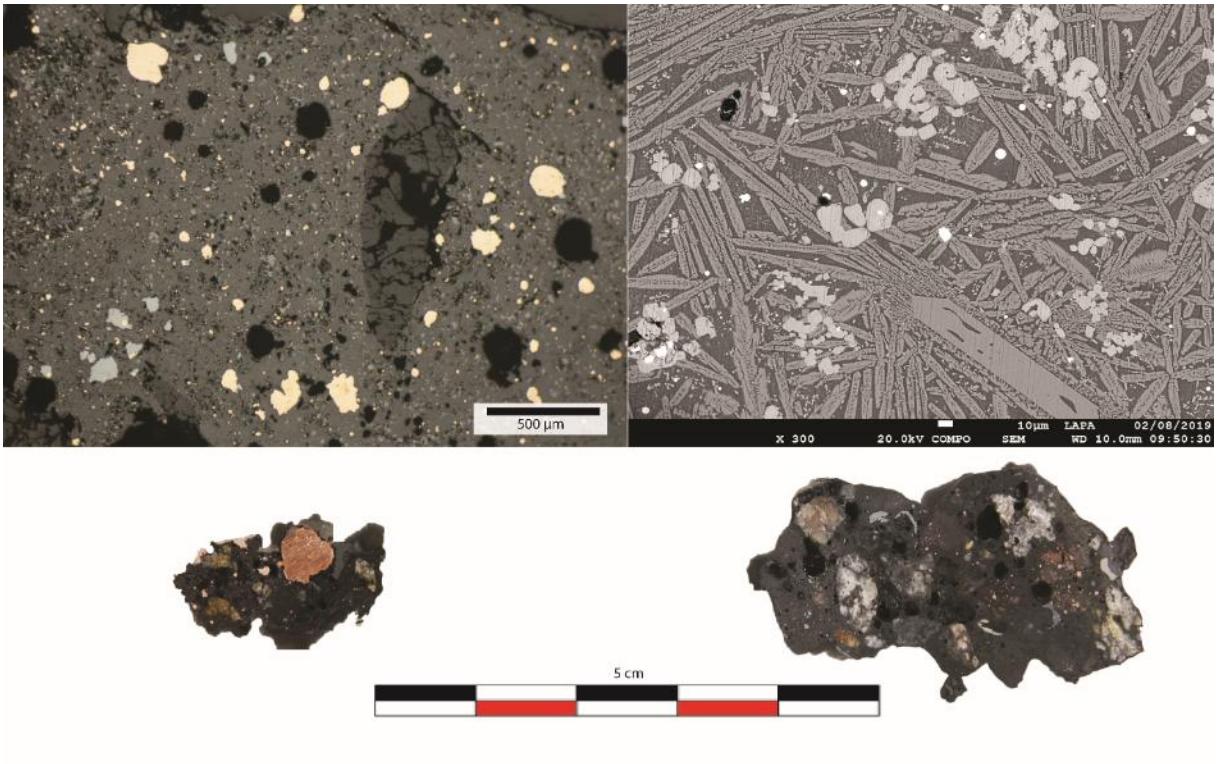


Figure 187 : Deux sections polies de scories expérimentales des réductions 4 (en bas à gauche) et 11 (en bas à droite) ainsi qu'une image MO (haut gauche) montrant les larges inclusions de quartz et de cuivre/matte. En haut, à droite, une image en BSE au MEB-EDS montrant la présence de phases cristallines : fayalite, magnétite dans une phase vitreuse.

VI.2.4 Les minerais ayant partiellement réagi

Des minerais ayant partiellement réagi (Figure 188) étaient présents après les réductions 1 à 5 et 7, lorsque les conditions nécessaires n'étaient pas atteintes ou maintenues pour une réaction complète et une séparation par gravité des phases. Ils se présentent sous la forme d'agglomérats accompagnés de matte et de nodules de cuivre.



Figure 188 : Minéraux partiellement réagis issus la réduction 3 avec une granulométrie entre 3,5 et 2,5 mm.

VI.2.5. Les creusets

Les creusets expérimentaux se sont avérés suffisants pour les opérations hautes-températures. Un des creusets a pu être utilisé jusqu'à trois fois et peut toujours l'être (réduction 9 à 11). À la fin de toutes les opérations de réduction, du cuivre métallique et de la matte se sont retrouvés piégés à l'intérieur des creusets, même lorsque le mélange était suffisamment liquide pour la coulée. Cette couche est principalement composée de matte et d'une épaisseur maximale de 4mm. La proportion restée piégée dans le creuset est difficile à estimer. Des traces de vitrifications sont présentes dans les bords internes, principalement pour les creusets qui ont été réutilisés, alors que les surfaces externes restent préservées. Même si, à la fois les creusets cuits et crus ont montré de bons résultats, des différences peuvent être observées. Les creusets cuits sont plus compacts et ont un gradient thermique dans leur épaisseur moins prononcé, alors que les creusets crus possèdent une plus forte porosité et des changements de couleur dans l'épaisseur, ce qui est normal étant donné qu'ils n'avaient jamais été chauffés. Compte tenu de ces observations, les creusets crus apparaissent plus proches du modèle archéologique. Leur utilisation semble possible pour Vilabouly.

VI.3. Discussion

Les produits expérimentaux ont ensuite été comparés aux évidences archéologiques. La forme et la masse des produits expérimentaux obtenus sont proches de celles des artéfacts de Vilabouly. En effet, la majorité des produits expérimentaux sont composés de deux couches, du cuivre métallique surmonté par une couche de matte, tout comme ce qui a pu être observé pour les lingots archéologiques, perçus comme étant des produits directs de réduction. De plus, la masse des lingots hémisphériques expérimentaux est entre 21 et 132 g, alors que celles des lingots archéologiques sont entre 32 et 84 g. Cette comparaison suggère que le volume utilisable calculé des creusets archéologiques est relativement correct. Cela vient également renforcer l'utilisation des creusets durant l'étape de réduction.

VI.3.1 La matte et le cuivre métallique

Le principal objectif des expérimentations était de tester une réduction par mélange de minerais de malachite et de chalcocite, afin d'essayer de déterminer si ce mélange de minerais fonctionne, et quels types de produits et de sous-produits en résultent. Certaines mattes expérimentales ont une composition similaire à celles des mattes archéologiques avec 79 %mass. de cuivre et 19 %mass. de soufre (Figure 189). Ces mattes ont été obtenues avec une charge de malachite et de chalcocite. Elles viennent donc renforcer l'hypothèse de l'utilisation de ce procédé à Vilabouly.

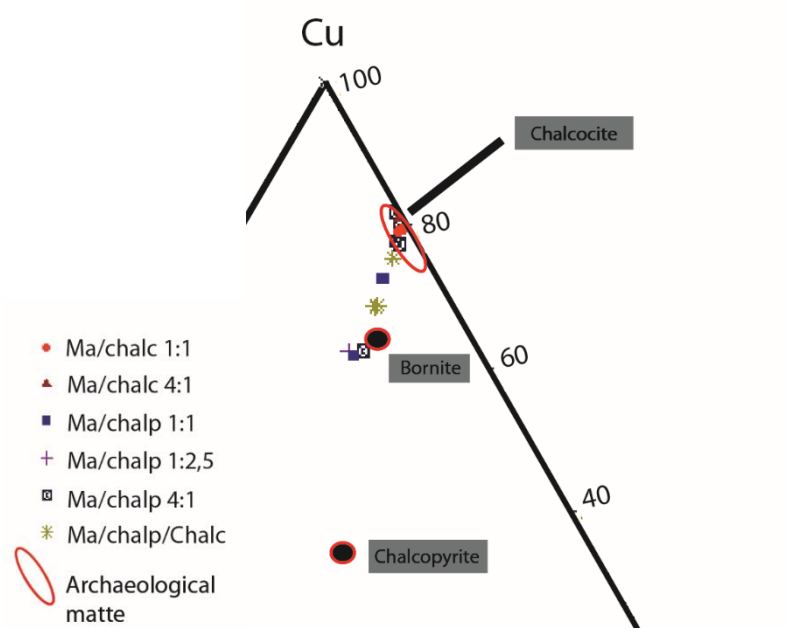


Figure 189 : Diagramme ternaire Fe-Cu-S avec les données compositionnelles des mattes expérimentales provenant des différents mélanges, ainsi que la composition standard des principaux minerais sulfurés, la chalcocite, la chalcopyrite et la bornite. La composition des mattes archéologiques a également été ajoutée (ellipse rouge).

Les charges de malachite/chalcopyrite à 4/1 (réductions 1,3 et 4) ont également produit une matte de cette composition élémentaire. En revanche, les produits ne se présentaient pas sous la forme de lingots hémisphériques avec deux couches bien distinctes, mais en agglomérats de minerais ayant partiellement réagi, accompagnés de la matte et de nodules de cuivre métallique, résultant d'une fusion incomplète.

Concernant le cuivre métallique, à la fois en termes de microstructure et de composition, il est également comparable au cuivre archéologique des lingots multicouches (voir partie V.4, Figure 190), avec d'abondantes inclusions de sulfures de cuivre arrondies et un taux de soufre entre 1 et 2 %mass.

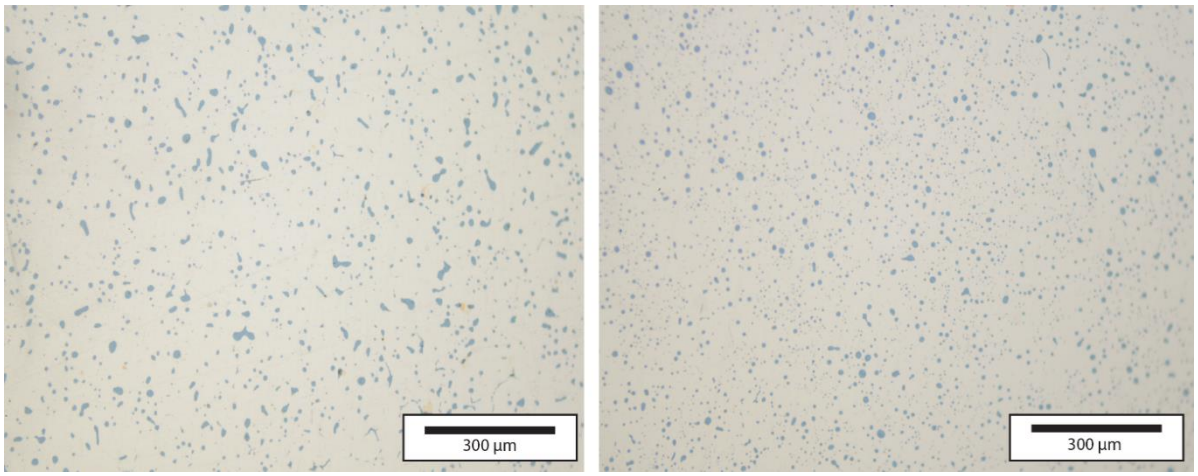


Figure 190 : Comparaison de la micrographie obtenue pour le bouton de cuivre de la réduction 14, à droite et pour le lingot multicouche archéologique SEALIP/LA/PBL/52, à gauche, montrant des inclusions de sulfures de cuivre similaires.

VI.3.2. Les scories

Le peu de scories expérimentales obtenues n'est pas comparable aux scories archéologiques. La pureté des minerais et le manque d'ajout d'un fondant ont mené à une production de scorie très faible. L'obtention de la scorie provient donc d'une charge impure. Les scories expérimentales sont grossières, très hétérogènes avec des inclusions de matte et de cuivre métallique abondantes suggérant des conditions et/ou des compétences de l'opérateur non optimales. Comme nous l'avons vu (Chapitre V.3), les scories de Vilabouly sont en majorité de type fayalitique, plate et homogène, démontrant une bonne séparation du cuivre métallique/impuretés, comparables aux scories nommées *plattenschlacke* par Hans Gert Bachmann (1982).

Le principal objectif des expérimentations n'était pas de produire des scories. On peut tout de même se questionner sur la faisabilité d'obtenir des scories plates de type fayalitique avec ce type de reconstitution expérimentale. Est-ce que les températures et conditions redox nécessaires peuvent être maintenues suffisamment durant une réduction en creuset avec des charges de minerais de qualité plus faible ? Nous discuterons plus amplement de ces questions au Chapitre VII.

VI.3.3 Les creusets

Les expérimentations permettent également de déduire que le volume/forme et matières premières des creusets utilisés, basés sur les évidences archéologiques, est en accord avec une opération de réduction en une étape, comme désirée et prouvée par de précédentes études (Hanning et al., 2010; Rostoker et al., 1989; Rovira et Ambert, 2002; Tylecote, 1975). Les résultats démontrent également que la chauffe apicale produit des intérieurs de creusets contenant des résidus de matte/scorie, par moment des parois vitrifiées et des extérieurs préservés, comme les exemples archéologiques. Il parait également possible que les creusets

crus soient plus proches de ce qu'on peut observer pour les creusets archéologiques, par leur apparence et porosité (Figure 191), même si les sources de matières premières employées ne sont pas locales et pourraient venir quelque peu changer cette perception.

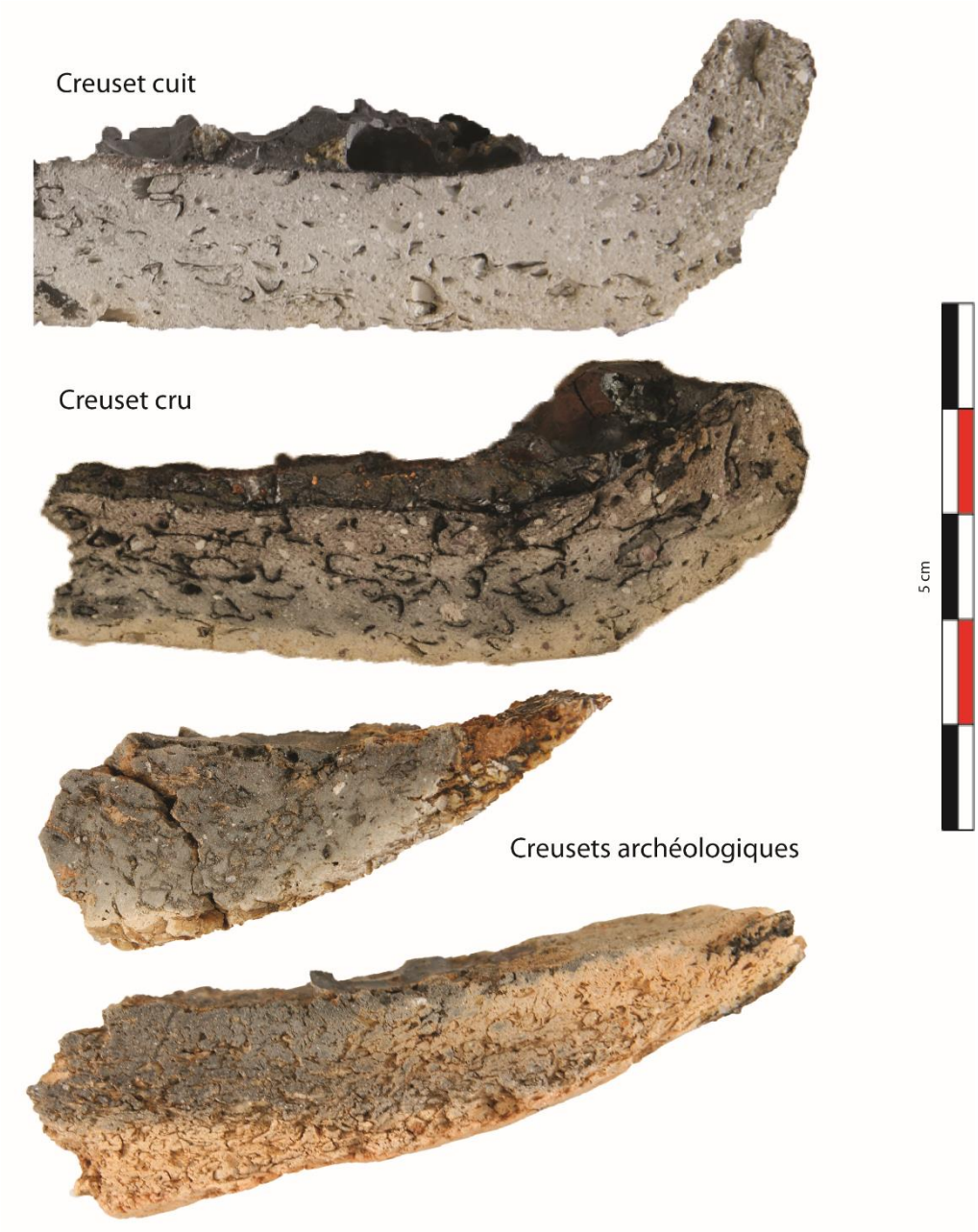


Figure 191 : En partant du haut, deux sections de creusets expérimentaux, cuit (réduction 2) et cru (réduction 7) comparés à deux sections de creusets archéologiques (D13/2/1/3706/a et b).

VI.3.4. La coulée du mélange

En présumant que les creusets étaient utilisés comme vaisselles de réaction et les lingots des produits directs de la réduction, l'opération de coulée dans un moule/dépression doit également faire partie de la reconstitution technologique. En effet, la fine couche de scorie présente dans les creusets archéologiques suggère qu'une opération de coulée prenait place après chaque opération. Ce geste pourrait également permettre une réutilisation du creuset,

comme noté pour les creusets expérimentaux. De plus, les résultats des expérimentations renforcent l'hypothèse d'origine, avec des produits similaires aux lingots archéologiques, à l'exception des scories, qui devraient être modelées lors de prochaines reconstitutions expérimentales.

Puen Baolo (la principale zone de production connue à Vilabouly) possède très peu de preuves d'une activité de fonderie, seulement un fragment d'un potentiel moule en grès et un autre à priori pour des objets coniques (découverts en surface). Deux types de contenants ont été utilisés durant les expérimentations : sable de fonderie et cendres. Il est très peu probable que le sable de fonderie ait été utilisé à Vilabouly, mais les observations sur les objets ont permis de montrer que le contenant de coulée devait être constitué d'un matériau ne réagissant pas avec le mélange en fusion, comme les scories et les lingots cuivre/matte possèdent des surfaces lisses sans signe de réaction. La coulée du mélange a aussi l'avantage d'homogénéisation, ce qui peut être recherché afin d'obtenir une meilleure séparation cuivre métallique/impuretés(A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003).

L'hypothèse de coulée est également renforcée par la présence de creusets complets à Puen Baolo possédant un bec de coulée (partie V.2), même si ces creusets ont été retrouvés en surface, hors contexte de fouille, et doivent être interprétés avec précaution.

VI.4. Bilan

Bien qu'aucune matière première locale (de Vilabouly) n'ait été employée, les reconstitutions expérimentales ont été fructueuses, résultant en des produits directs de cuivre métallique et de matte en utilisant un simple dispositif de chauffe en creuset. Les résultats nous permettent de renforcer une partie des observations sur le terrain et des hypothèses dérivées des analyses en laboratoire. Notamment sur la forme et composition des creusets qui s'avèrent adaptées à un procédé haute température avec un volume utilisable pratique.

Avec une exception, tous les ratios de charge testés ont permis la production de cuivre métallique en quantité variable. Différents types de matte ont été produits, dépendants de la charge d'origine (des mattes contenant seulement du cuivre et du soufre ; des mattes contenant du cuivre, soufre et fer ; et des mattes avec du cuivre, soufre et un taux plus élevé en fer). Les produits du mélange malachite/chalcocite ont montré de bonnes correspondances avec les exemples archéologiques, venant renforcer l'hypothèse que ce mélange ait pu être employé en une étape réductrice à Vilabouly. Le procédé de Vilabouly n'avait peut-être pas pour objectif de traiter directement les minerais sulfurés, car la malachite devait être le principal minerai exploité, mais d'obtenir directement le cuivre métallique. Le procédé n'était alors pas tourné vers l'élimination du soufre, ce qui mène à l'obtention de matte. Les expérimentations ont également permis de montrer qu'une couche macroscopique de matte

se forme, seulement si la quantité de minerais sulfurés dans la charge est à minima de 20%. On peut également se demander ce qui se produit par la suite dans la chaine opératoire. Est-ce que les métallurgistes de Vilabouly avaient conscience du potentiel de la matte à être réutilisée ? En avaient-ils l'utilité ? Visiblement pas, puisque les lingots avec une couche de matte se retrouvent en contexte funéraire, cela pose question. Est-ce d'une importance économique et/ou culturelle ? La réutilisation de la matte produite durant ces expérimentations pourrait également être à tester afin de collecter d'autres informations dans le futur.

Chapitre 7 : Discussion des résultats - bilan sur la chaine opératoire

Les résultats des études macro, micro, chimiques et isotopiques des différents types de mobilier (minerais, creusets, scories et objets finis) confirment bien la présence d'une production primaire à Vilabouly allant de l'extraction des minerais, en passant par leur transformation jusqu'à la potentielle réalisation d'alliage. En effet, tous les artéfacts analysés peuvent être reliés assez surement à une des étapes de la chaine opératoire de production du cuivre. De plus, ils se retrouvent associés dans les mêmes contextes archéologiques. Les données semblent suggérer l'utilisation principale de malachite, parfois associée à un sulfure de cuivre, par un mélange de minerais variable en fonction des minéralisations. Les minerais sont réduits lors d'un procédé en une étape, où le mélange est directement coulé après la réduction dans un autre contenant. Le produit de cette réduction correspond aux lingots multicouches de cuivre métallique, de scorie et/ou de matte. La composition de ces lingots dépendrait de la charge d'origine, de la présence plus ou moins importante de sulfures, ainsi que des conditions durant le procédé pour l'élimination de ces sulfures. La réaction pourrait avoir lieu dans un creuset de petite dimension dont le diamètre n'excède pas 15 cm, placé dans une fosse, ce qui permettrait de couler le mélange directement après la réduction. Le procédé de réduction était maîtrisé par les anciens métallurgistes. Comme en témoignent les scories homogènes de type fayalitique, optimales pour une bonne séparation du cuivre métallique et des impuretés. Selon les résultats isotopiques du plomb, le cuivre ainsi obtenu semble avoir été réutilisé sur place afin de fabriquer des objets finis avec différentes typologies, mais en majorité des objets utilitaires (hache, pointe de lance, burin, etc.). Ce chapitre a pour objectif de dresser un bilan des résultats et de proposer une reconstitution de la chaine opératoire de production à Vilabouly.

VII.1. Nature de(s) minerai(s)

Le Complexe de Vilabouly porte des traces d'une activité minière locale, notamment par la présence abondante de puits de mine (voir chapitre II). Les minerais employés lors de la réduction à Vilabouly peuvent donc être perçus, en première approximation, comme locaux.

Les minerais trouvés en contexte archéologique ne permettent pas de définir exactement le(s) type(s) employé(s) à Vilabouly. En effet, ils sont en grande majorité identifiés comme de la malachite ($Cu_2CO_3[OH]_2$), un carbonate de cuivre, associé à d'autres minéraux comme le quartz (SiO_2) ou la goethite (FeO[OH]). On identifie également de la cuprite (Cu_2O) ainsi que des oxydes de fer. Tous ces minerais proviennent de la couche supérieure d'altération des minéralisations de cuivre (la couche supergène). Bien qu'ils aient été découverts dans un contexte archéologique, notamment à PBL, leur représentativité par rapport aux minerais

réellement employés à Vilabouly peut être questionnée. En effet, ils pourraient également représenter des rejets par les anciens métallurgistes.

En regardant maintenant les informations géologiques dont on dispose pour Vilabouly, on remarque que la malachite est le principal minerai identifié dans les couches altérées des minéralisations accessibles par les anciens métallurgistes, dans les premiers 40 m, parfois accompagné d'autres oxydes/carbonates de cuivre (azurite, cuprite). Comme nous l'avons vu les dépôts supergènes s'étendent entre 20 et 100 m de profondeur, ce qui correspond à celle des puits de mine découverts. On identifie également la présence abondante d'un sulfure de cuivre secondaire, la chalcocite (Cu_2S) proche et parfois même mélangée avec les dépôts d'oxydes/carbonates. Selon les informations fournies par les géologues du SMD (*Sepon Mineral District*) M. Stott et J. Cannell, les anciens puits de mine découverts semblent en majorité associés au minerai de malachite (à 99%).

Les minerais sulfurés complexes sont également présents : de la chalcopyrite ($CuFeS_2$) et de la pyrite (FeS_2), ainsi que de la bornite (Cu_5FeS_4). Ces minerais sont présents plus profondément, mais l'argile entourant les minerais de malachite contient également souvent de la pyrite. A noter que la baryte ($BaSO_4$) est également fréquemment rencontrée en association à la malachite. Les dépôts de cuivre n'étant jamais linéaires, ces minerais primaires peuvent également se retrouver ponctuellement mélangés aux minéralisations altérées de surface dont ils sont à l'origine dans une zone de transition altérée entre la couche supergène et hypogène (A. Hauptmann, 2007). Nos connaissances de la géologie locale se basent uniquement sur les relevés et études effectués par les différents détenteurs de la concession minière actuelle depuis son ouverture. Nous n'avons qu'une connaissance approximative et générale des minéralisations de cuivre à Vilabouly. De ce fait, il est très difficile d'identifier précisément la nature exacte des minéralisations utilisées pour chaque zone archéologique.

Une des questions principales demeurant au fil de cette étude a donc été l'identification du/des type(s) de minerai(s) exploité(s) et employé(s) durant le procédé métallurgique. La nature du minerai venant ensuite conditionner la complexité du procédé (W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989; M. Edmonds, 1990). En première approximation, l'hypothèse d'une utilisation du carbonate de cuivre, la malachite, simple à réduire en une étape (R. F. Tylecote, 1962), largement présente dans les dépôts de surface et associée aux puits de mine anciens découverts, était privilégiée. Cependant, la proche association de certains minerais sulfurés à ces minéralisations d'oxydes/carbonates nous oblige à envisager également leur potentielle utilisation.

On identifie la pratique de la réduction sur le site, au travers notamment de la présence de scories. Les caractéristiques de ces scories permettent de les définir comme scories de

réduction de cuivre notamment par les taux en cuivre détectés (≈ 2 %mass.). La présence de scories de réduction dans le corpus permet également d'accéder à certaines informations sur la charge de réduction, et donc sur les minerais. Les scories sont principalement composées d'olivines ferreuses (Fe_2SiO_4) ainsi que de magnétite (Fe_3O_4) dans une phase vitreuse. On identifie également pour la majorité, la présence d'inclusions de cuivre métallique et de sulfures de cuivre pouvant directement être reliés aux questions sur les minerais. La présence de ces inclusions de sulfures de cuivre implique trois possibilités :

-la présence en tant qu'inclusions de sulfures de cuivre dans un minerai carbonaté/oxydé d'origine ;

-l'utilisation d'un procédé avec réduction de minerais sulfurés complexes en plusieurs étapes avec la production de matte ;

-Ou bien un procédé hybride avec un mélange de minerais carbonatés/oxydés et sulfurés (W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989), qui peut revêtir un caractère non intentionnel (« *serendipitous co-smelting* » ; Pryce et al., 2010, p. 253) ou intentionnel («*deliberate co-smelting* » ; Pryce et al., 2010, p. 253) en fonction des minéralisations exploitées et des connaissances des anciens métallurgistes.

À notre avis, la présence de phases sulfurées dans les scories ne prouve pas l'emploi d'un procédé complexe avec production de matte (A. Hauptmann, 2007; T. Rehren, L. Boscher, et E. Pernicka, 2012), car la présence abondante de malachite et de chalcocite entre 20 et 100 m de profondeur rend cette hypothèse improbable.

L'identification de matte dans certains types d'objets (voir partie V.4) vient ici renforcer les questionnements sur le(s) type(s) de minerai(s). La matte est un composé intermédiaire contenant du cuivre, du soufre et parfois du fer, produit lorsque des quantités significatives de sulfures de cuivre sont introduites dans la charge de réduction. La matte peut également être présente en tant qu'inclusion dans les scories comme déjà mentionnée. En tant qu'inclusions, la matte ne peut pas être associée avec certitude à un procédé utilisant des minerais sulfurés (T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016). En cas d'utilisation massive de minerais sulfurés, donc volontaire, la matte prend part au procédé (R. C. P. Doonan et al., 1996; B. Knapp et V. Kassianidou, 2008; A. Addis et al., 2016) résultant parfois en des scories contenant de faibles quantités de soufre (L. Maldonado et T. Rehren, 2009). Dans ce cas, des quantités macroscopiques de matte sont produites et sont ensuite réutilisées pour obtenir le cuivre. Comme elles représentent un produit intermédiaire, les fragments de matte sont rarement retrouvés sur les sites archéologiques, même lorsqu'une production avec minerais sulfurés est largement attestée.

Dans le cas de Vilabouly, lorsque nous parlons de matte, il s'agit d'une couche macroscopique présente en association à du cuivre métallique dans les lingots multicouches. Il ne s'agit pas seulement d'inclusions dans les scories, signifiant qu'un taux plus élevé en sulfures de cuivre a dû être introduit, du moins pour le cycle concerné, dans la charge de réduction. Ces observations rejoignent les questions posées par les minerais disponibles dans les dépôts. Les lingots coniques (SEALIP/LA/PBL/42, 48, 51 et 52) où la couche macroscopique de matte est ici identifiée sont perçus comme directement issus de l'étape de réduction. Ces hypothèses sont renforcées par les réductions expérimentales menées à Melle (voir Chapitre VI) pour lesquelles des produits d'apparence similaire ont pu être obtenus directement après l'étape de réduction par coulée du mélange dans un autre contenant. Ces réductions expérimentales ont également permis de resserrer les hypothèses vers un type de minerai. En effet, différents mélanges de minerais ont pu être testés, notamment de malachite/chalcocite. Ce mélange a permis d'obtenir un produit proche du modèle archéologique avec une couche de cuivre métallique surmontée par une couche de matte dont la composition est comparable aux mattes archéologiques.

On peut maintenant tenter de dresser un bilan des potentiels minerais utilisés, en prenant appui sur les informations dont on dispose. Les minerais disponibles et accessibles en contexte sont donc principalement la malachite, principal minerai dans la zone des puits de mine, et la chalcocite, également abondante dans les dépôts, mais ne semble pas à priori directement présente dans l'environnement des puits de mine. Nous avons vu également que de la pyrite pouvait se retrouver associée aux argiles entourant la malachite, ainsi que la baryte secondaire qui est fréquente. Malgré l'abondance de malachite, la présence de couche de matte macroscopique associée aux lingots et des inclusions de sulfures de cuivre dans les scories suggère que des minerais sulfurés étaient, par moment, présents dans la charge de réduction. Le plus accessible et abondant de ces minerais sulfurés dans les dépôts se trouve être la chalcocite. Nous avons vu par les expérimentations qu'il est possible d'obtenir des produits similaires au modèle archéologique avec l'utilisation de chalcocite. Bien que la chalcocite ne soit pas le principal minerai identifié dans l'environnement des puits de mine découverts, nous pouvons également supposer que la totalité des puits de mine n'ait pas encore été mise au jour. Certains puits pourraient alors se trouver dans des zones plus riches en chalcocite car ce minerai est également très abondant dans le SMD.

La présence de couche de matte macroscopique dans les lingots, d'inclusions de matte dans les scories, de minerais sulfurés dans les minéralisations et les reconstitutions expérimentales menées laisse donc à penser que l'hypothèse à privilégier pour la chaine opératoire de Vilabouly serait l'utilisation majoritaire de malachite, parfois associée à un minerai contenant du soufre au cours d'un mélange. Ce mélange de minerais serait préférentiellement composé

de malachite et de chalcocite, mais on ne peut pas exclure la présence de baryte, de chalcopyrite ou de pyrite dont la contribution est difficile à évaluer. De plus, nous avons vu que la baryte se retrouvait dans certaines scories, mais en petite quantité (hormis pour un échantillon avec des taux plus élevés en baryum). La malachite et la chalcocite sont les deux principaux minerais disponibles dans les minéralisations de surface. On peut donc se demander si ce mélange de minerais a pu être intentionnel ou non. La présence, peut-être même la nature, des minerais sulfurés dans la charge apparaît comme variable et serait donc dépendante des minéralisations exploitées au cours du temps. Or, dans l'éventualité que les anciens métallurgistes eussent conscience des minerais qu'ils ajoutaient à leur charge, il est en revanche plus que probable que ce mélange de minerais dépendait des minéralisations exploitées.

Cette question rejoint également celle de la Vallée de Khao Wong Prachan, le deuxième site de réduction connu en Asie du Sud-Est, comme nous le verrons dans le prochain chapitre, où Oliver Pryce définit un mélange de minerais non intentionnel (« *serendipitous* ») pour Non Pa Waï et intentionnel pour Nil Kham Haeng (Pryce, 2008 ; Pryce et al, 2010). La différence principale entre les deux sites est l'hétérogénéité des scories de Non Pa Wai, contre l'homogénéité des scories de Nil Kham Haeng, permettant à Oliver Pryce de faire cette hypothèse.

La faible quantité de scories découvertes à Vilabouly pourrait également montrer que les minerais employés étaient relativement riches et possédaient peu de minéraux de gangue, peut être à la suite d'un tri et à un enrichissement des minerais par les anciens métallurgistes avant la réduction. De plus, si les minerais de cuivre présents à Vilabouly étaient riches, leur utilisation aurait pu alors mener à peu de scories.

VII.2. Un procédé en une étape réductrice ?

Les différents éléments disponibles semblent s'orienter vers un procédé en une étape réductrice. Vraisemblablement, le procédé mis en place n'avait pas pour finalité de produire une matte, mais bien directement le cuivre métallique, par l'emploi d'une charge avec un mélange de minerais variable. Le procédé en une étape réductrice est majoritairement visible au travers de l'étude des scories (D. Bourgarit et al., 2010). En effet, les différents types de scories définis ne présentent pas de variation notable. Si on regarde leurs caractéristiques globales, elles se présentent comme un ensemble homogène. Les scories ne semblent pas nous orienter vers un procédé multi-étape. De plus, les réductions expérimentales menées ont montré que des produits comparables à Vilabouly (hormis les scories) pouvaient être obtenus en une seule étape réductrice par l'utilisation d'un mélange de minerais.

Il faut tout de même être prudent, car l'identification d'un seul type de déchet ne constitue pas une preuve stricte de la présence d'un procédé en une étape. En effet, certains sites archéologiques possèdent un seul type de scories, bien qu'un procédé multi-étape soit attesté (N. L. Erb-Satullo, B. J. J. Gilmour, et N. Khakhutaishvili, 2015). Ce type d'évidences peut s'observer lorsque les sous-produits sont réutilisés en tant que fondant par exemple. Un réemploi de scories a notamment été proposé pour la métallurgie du cuivre chinoise et pour le site de Sijiawan (D. Larreina-García, 2012), actif durant la dynastie Tang (618-907 ap. J.-C). En revanche, certains contextes permettent de différencier clairement plusieurs types de scories pouvant être reliés directement aux différentes étapes de la chaine opératoire, notamment dans les Alpes italiennes (A. Addis et al., 2016; A. Addis, I. Angelini, et G. Artioli, 2017). Les types de scories de Vilabouly ne peuvent pas être différenciés en fonction de la morphologie de leurs cristaux. Par exemple différentes morphologies d'olivine se retrouvent au sein d'une même scorie. Aucun type de morphologie de cristal particulier n'est donc corrélé à un type de scorie macroscopique, ce qui vient renforcer l'hypothèse d'un procédé en une étape.

De ce fait, la production de matte était donc dépendante de la quantité de sulfures introduite dans la charge de départ. Nous avons pu voir, à la suite des réductions expérimentales, qu'une couche de matte macroscopique se forme si une quantité minimum de 20% de minerais sulfurés est présente dans la charge de réduction. De plus, les inclusions de sulfures de cuivre (matte) présentent dans les scories viennent renforcer cette hypothèse. On en compte de différentes natures :

-Des inclusions sphériques de sulfures de cuivre secondaire (chalcocite et covellite), signe qu'elles se sont formées à l'état liquide ;

-Des inclusions de sulfures complexes (chalcopyrite et bornite).

Les inclusions de sulfures complexes sont souvent de morphologie plus angulaire et ne semblent pas être entièrement formées à l'état liquide, elles sont partiellement réagies. Ces inclusions représentent donc davantage des minerais résiduels et non des phases néoformées. La présence de ces différentes inclusions métalliques n'est pas corrélée avec le type de scories et semble plutôt refléter une oxydation différentielle entre les inclusions de sulfure. Le procédé n'étant pas tourné vers l'élimination du soufre des minerais sulfurés, une part se retrouve donc ensuite dans la scorie. La désulfuration apparaîtrait donc variable et non systématique.

De plus, la présence de lingots multicouches perçus comme des produits intermédiaires (cuivre métallique, matte et scorie) serait directement issue d'une coulée après la réduction

dans un autre contenant (Chapitre VI et partie V.4). La couche de scories identifiée pour ces produits possède une minéralogie et composition comparable aux scories indépendantes du corpus. Ces scories auraient donc pu être obtenues durant la même étape. Quelle(s) caractéristique(s) viennent différencier les scories indépendantes et les scories de ces produits intermédiaires ? Plusieurs modes de production ? Nous avons vu que les lingots ne sont pas tous composés des mêmes phases. Parfois nous avons l'association cuivre/matte, parfois cuivre/scorie et scorie seule. Serait-il alors possible que les scories plates aient un jour été associées à un de ces lingots ? Lors de la séparation par gravité des différentes phases, spécialement dans le cas d'une coulée, la scorie se retrouve au sommet. Ell pourrait avoir été retirée, constituant un sous-produit, afin de récupérer seulement le cuivre métallique (et la matte dans certains cas). Les reconstitutions expérimentales menées n'ont pas permis de vérifier cette hypothèse, car le peu de scories obtenues était de type hétérogène, non comparable aux scories archéologiques.

VII.3. La formation des scories

Les deux principaux composés des scories, la silice et l'oxyde de fer permettent la formation d'une scorie à point bas de fusions de type fayalitique. La charge de départ devait donc principalement contenir de la silice et des oxydes de fer. Les données élémentaires des scories nous permettent également de voir que la composition de la charge était variable, principalement en oxyde de fer.

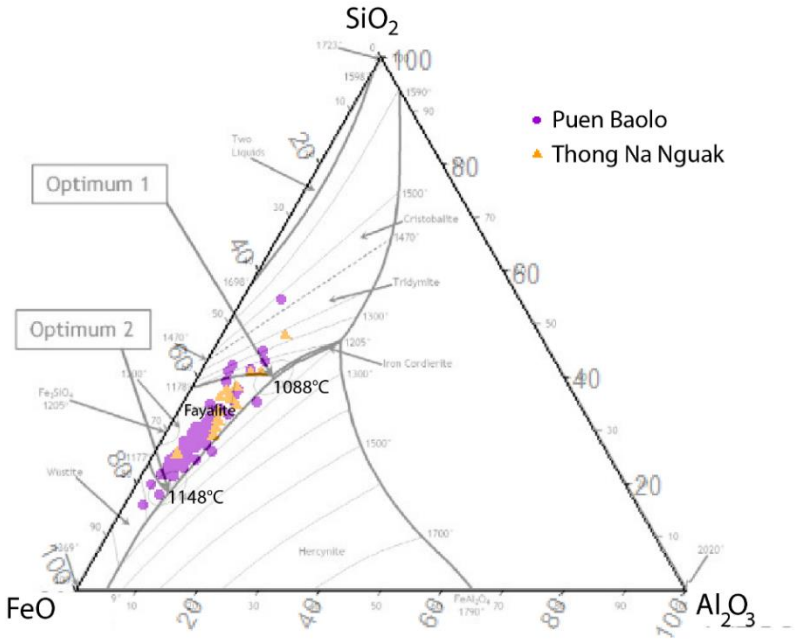


Figure 192 : Diagramme ternaire FeO-SiO_2-Al_2O_3 avec les données ICP-OES et ICP-MS des scories de Puen Baolo et Thong Na Nguak (%mass.) avec le diagramme de phase, d'après Rehren et al, 2007.

Une estimation des températures atteintes durant l'opération métallurgique peut être proposée par une représentation sur un diagramme de phases de la composition des scories

(H. G. Bachmann, 1980). Les données ont été représentées dans un diagramme de phase FeO-SiO_2-Al_2O_3 (Figure 192) afin d'avoir une estimation des températures minimales de formation correspondant au liquidus, sans l'ajout d'autres oxydes, car ces trois composés représentent environ 90% de la composition totale des scories. De plus, les scories de Vilabouly présentent peu d'inclusions n'ayant pas réagi, signe qu'elles sont rentrées en phase liquide, ce qui dans le cas de la représentation dans le diagramme ternaire permet des résultats plus fiables qu'une scorie hétérogène. La composition globale se rapproche alors de celle de la phase liquide.

Les scories de PBL et TNN tombent en majorité dans le domaine de la fayalite, avec quelques notables exceptions. Les scories de PBL semblent davantage se rapprocher de l'optimum 2 défini par Rehren et consorts (2007) à 1148°C pour la métallurgie du fer. Les scories de TNN, semblent davantage se rapprocher de l'optimum 1 avec une température moins élevée, autour de 1100°C (voir Chapitre V.3). Il est à noter que les scories de TNN possèdent un taux plus élevé en MnO (≈5 %mass.) qui est à rajouter à cette représentation afin d'obtenir un résultat plus proche de la réalité. Les scories plates ne semblent pas davantage se rapprocher de l'optimum 2 que les scories grossières.

Cette approche est restreinte par des limitations ne permettant que des approximations (P. Kresten, 1986; A. Hauptmann, G. Weisgerber, et H. G. Bachmann, 1988; F. Kongoli et A. Yazawa, 2001), avec la présence d'éléments mineurs dans le mélange qui peuvent venir modifier la température du liquidus. Les calculs de ces liquidus sont faits pour des mélanges à l'équilibre, ici pour le fer métallique, et non dans des conditions de pressions partielles intermédiaires (Kongoli et Yazawa, 2001). Kongoli et Yazawa (2001) ont ainsi pu montrer l'influence des pressions partielles intermédiaires sur le liquidus. Leur étude a permis de fournir différents diagrammes binaires reposant sur différentes pressions partielles d'oxygène pour le système CaO-FeO-Fe_2O_3-SiO_2-Al_2O_3. Le plus adapté de ces diagrammes dans notre cas est celui reposant sur une PO_2 de 10^{-8} atm avec 7% mass. Al_2O_3 (Figure 193). En plaçant la composition des scories de Vilabouly dans ce diagramme, nous obtenons des températures de 1150°C à 1300°C. Il apparaît alors possible que les températures aient pu atteindre 1300°C dans le réacteur à un certain moment, même si de telles températures n'ont pas dues être maintenues. Cette méthode a également été appliquée par Pryce (2008) pour le calcul des températures à Non Pa Wai et Nil Kham Haeng.

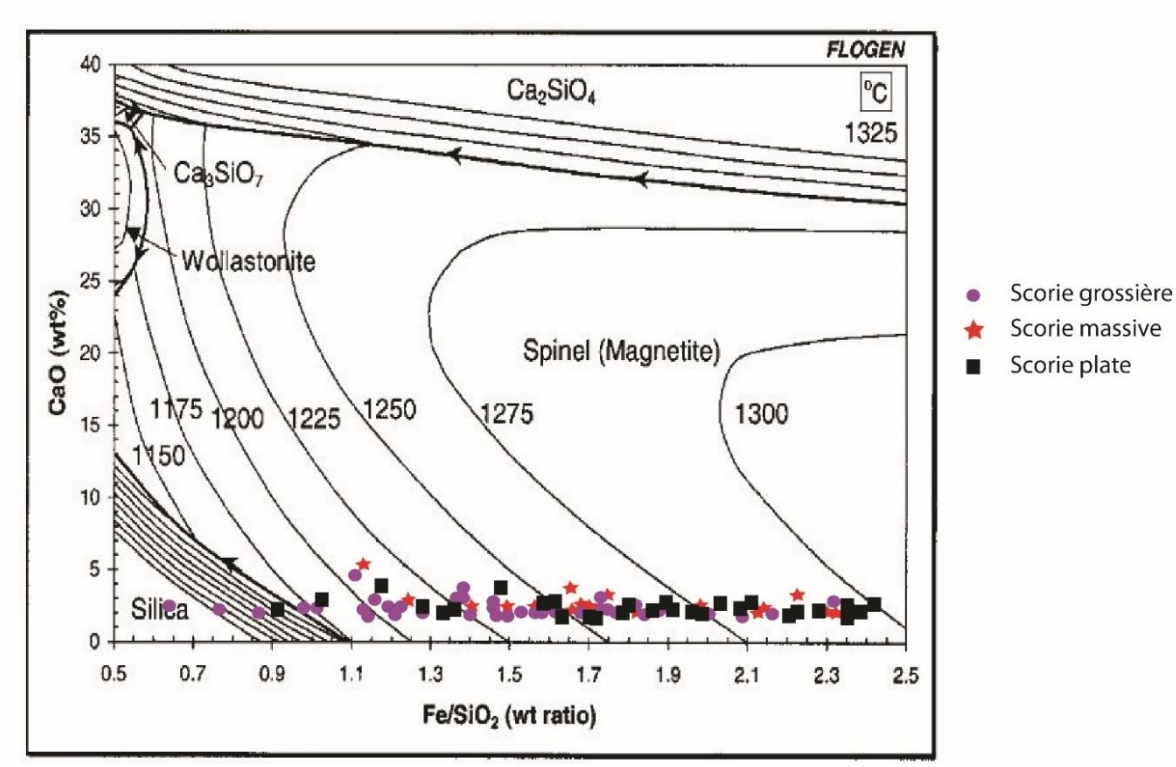


Figure 193 : Diagramme binaire montrant la variation du liquidus en fonction de CaO et du ratio Fe/SiO_2 avec une pO_2 à 10^{-8} atm et Al_2O_3= 7 %mass. (image modifiée d'après Kongoli et Yazawa, 2001).

Peter Kresten en 1896 propose que la méthodologie optimale à notre disposition pour la détermination des températures de fusion, soit atteinte par le calcul des températures de l'olivine liquide à l'équilibre, basé sur le partitionnement entre le magnésium et le fer entre les phases d'olivines. Une estimation des températures de cristallisation des cœurs enrichis en magnésium des olivines peut être faite par comparaison avec le diagramme binaire forstérite-fayalite (N. L. Bowen et J. F. Schairer, 1935). Ainsi, les cristaux de fayalite en polyèdres présentent généralement un zonage à cœur enrichi en magnésium lorsque cet élément est présent, alors que les cristaux en plume/chaine en sont dépourvus. Cette méthode consiste alors à obtenir la composition des cristaux en polyèdres et des cristaux en chaine, ici par analyse localisée au MEB-EDS.

Les valeurs (X) de distribution fer-magnésium dans les cristaux sont ensuite obtenues par le calcul suivant : X= Fe/(Fe+Mg). Cette méthodologie est employée par Emilien Burger (2008) lors de sa thèse afin de calculer la température du liquidus des scories archéologiques. En reportant les compositions chimiques des deux types d'olivines (polyèdre et chaine) ainsi obtenues sur l'isomorphisme de l'olivine Mg-Fe, il est possible d'estimer une gamme de températures régnant dans le réacteur : la température de solidification du cœur des cristaux zonés donne une limite supérieure et celle des cristaux en aiguilles une limite inférieure. Dans le cas d'Emilien Burger, deux types de mesures ont été effectuées sur les polyèdres à cœur plus riche en Mg et sur les bords moins riches en Mg. Dans notre cas le zonage est moins

marqué. Une seule mesure a donc été effectuée à cœur des cristaux. Les températures calculées peuvent être considérées comme une limite maximum des températures de cristallisation, car la présence d'autres composés, comme Al ou Si, peuvent abaisser cette limite.

Si on applique cette méthode de Kresten qui consiste à évaluer les températures à l'aide du diagramme binaire forstérite-fayalite, les estimations nous donnent une température de 1210-1220°C pour Puen Baolo et Thong Na Nguak (Figure 194 et Tableau 41)

	X globaux	Polyèdres	Chaines	Intervalle température
Thong Na Nguak	98±2	94±2	100±1	1220-1210 °C
Puen Baolo	99±1	92	97	1220-1210 °C

Tableau 41 : valeurs de distribution fer-magnésium dans les cristaux de fayalite des scories de Puen Baolo et Thong Na Nguak. X= Fe/(Fe+Mg), selon la méthode décrite par Kresten, 1986 et reprise par Burger, 2008.

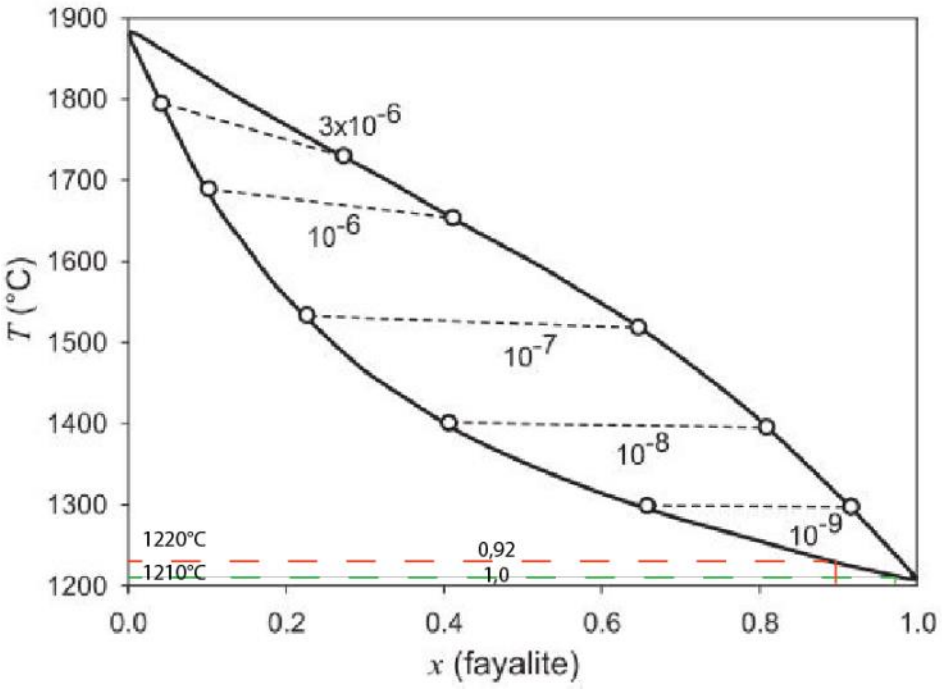


Figure 194 : Isomorphisme Fe-Mg (modifiée d'après Klimm et Ganschow, 2007).

La charge de réduction était donc adaptée à l'obtention de scorie de type fayalitique, ce qui veut dire un rapport molaire Fe/Si proche de 2. Les compositions des scories de Vilabouly se situent pour la majorité dans la vallée eutectique de la fayalite, avec peu d'exceptions. Les scories de Vilabouly sont de type fayalitique dénotant des températures minimums entre 1100 et 1200°C. La nature et l'homogénéité des scories plates suggèrent des températures en excès par rapport à celles-ci, comme montré par les résultats sur le diagramme forstérite-fayalite avec de températures minimums de 1210-1220°C et même jusqu'à 1300°C avec l'utilisation des diagrammes de Kongoli et Yazawa (2001), ce qui pourrait permettre d'obtenir

les scories plates. Les scories plates sont perçues comme solidifiant au-dessus d'un mélange en fusion, matte ou cuivre métallique, ce qui veut dire qu'elles sont les premières à se former lors du refroidissement, ce qui pourrait alors faciliter la séparation par phase avec le cuivre métallique.

On a pu voir que la morphologie majoritaire du corpus était celle des scories plates, montrant une phase homogène et dense en section avec très peu d'inclusions provenant du sol et/ou de minéraux partiellement réagis. Des compositions si homogènes peuvent suggérer l'ajout volontaire d'un fondant et/ou un bon contrôle de la charge afin d'obtenir les caractéristiques désirées (A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003). Nous avons vu que les compositions en oxyde de fer semblent variables dans la charge, mais sans que cela ne mène à des scories hétérogènes, donc avec une incidence mineure sur le type de scories produit. L'oxyde de fer pourrait donc avoir été ajouté ici en tant que fondant, ce qui expliquerait pourquoi sa présence est variable. De plus, nous avons vu que les oxydes de fer sont également abondants à Vilabouly. Il aurait été aisé pour les anciens métallurgistes d'y avoir accès. L'emploi d'un fondant reste encore à être démontré. L'homogénéité et le peu d'inclusions partiellement réagis dans les scories de Vilabouly suggèrent une maîtrise dans la préparation de la charge de départ, par un tri des éléments de la gangue notamment. Notre méconnaissance des procédés de préparation des minerais nous empêche d'aller plus loin dans cette réflexion.

Toutes ces caractéristiques considérées, la majorité des scories de Vilabouly correspond donc au type des *plattenschlacke* décrit pour la première fois par Hans-Gert Bachmann en 1982 et ensuite identifié dans d'autres contextes, principalement alpins (B. Metten, 2003; H. Herdits, 2003; E. Burger, 2008; D. Bourgarit et al., 2010; A. Addis et al., 2016), mais également en Asie, à Tonglüshan en Chine dans la Province d'Hubei (D. Larreina-García, 2017), dans l'Himalaya à Pokhri (A. Gupta, *pers. comm.*), et également au Népal contemporain (N. Anfinset, 2011).

Les *plattenschlacke* des contextes alpins ont généralement une épaisseur entre 8 et 20 mm, fragmentaires, massives et peu poreuses avec des densités définies à environ 3,5 $g.cm^{-3}$. La surface supérieure des scories est très lisse, alors que la face inférieure est rugueuse (D. Bourgarit et al., 2010) très comparable aux données de Vilabouly. Ce type de scories dénote généralement une grande maîtrise des conditions amenant à une séparation optimale du cuivre métallique de ses impuretés (scories), par une fusion complète. L'absence d'inclusions partiellement fondues, ainsi que les taux en cuivre relativement bas (<5%mass.) dans les scories de Vilabouly, renforce cette observation. En revanche, la voie d'obtention de ce type de scories est encore débattue. On sait qu'elles solidifient rapidement sur un liquide en fusion. Elles pourraient donc être obtenues à la suite d'une coulée et d'un refroidissement rapide au

contact de l'air ou d'une surface froide. Certains auteurs décrivent que ces scories pourraient avoir été obtenues par refroidissement rapide au-dessus d'un mélange en fusion et enlevées par couche à la suite d'une trempe (Burger, 2008), révélée par un faciès prismatique, directement de l'intérieur du réacteur suivant une technique nommée *Scheibenreisen* :

> « *If the copper is not good, the master draws off the 'slags' twice, or three times if necessary – the first time when some of the cakes have been melted, the second when all have melted. If the copper was of good quality, the 'slags' are not drawn off […] but at the time they are to be drawn off, he depresses the bar over both bellows, and places over both a stick, a cubit long and a palm wide, half cut away at the upper part, so that it may pass under the iron pin fixed at the back in the perforated wood. This he does likewise when the copper has been completely melted. Then the assistant removes the iron plate with the tongs […] The same assistant, with the iron shovel, throws and heaps up the larger pieces of charcoal into that part of the hearth which is against the little wall which protects the other wall injury by the fire, and partly extinguishes them by pouring water over them. The master, with a hazel stick inserted into the crucible, stirs it twice. Afterward he draws off the slags with a rabble. […] Afterwards he again draws off the slags from the crucible, which the assistant does not quenched, but he sprinkles over them water and allows them to cool*. »(G. Agricola, 1998, p.535-536).

L'étude ethnologique menée par Nils Anfinset (2011) dans des castes (classe sociale fermée) au Népal fait également mention de cette technique d'évacuation des scories par couche, lors d'un procédé de réduction multi-étapes traitant de minerais sulfurés complexes. Le moyen de production de ce type de scories reste donc encore assez flou. Dans le cas des scories de Vilabouly, leur association au lingot multicouches (scorie, cuivre métallique et matte) a été proposée (voir partie V.4.4). En effet, ces scories plates pourraient avoir été obtenues par coulée directe après la réduction, refroidies au-dessus du cuivre/matte en fusion et avoir un jour surmonté un de ces « lingots ».

Les morphologies des cristaux dans les scories, principalement les olivines, présentent différents types (polyèdres, squelette et plume) rendant difficile d'identifier une vitesse de refroidissement. Ces différentes morphologies se retrouvent au sein d'une même scorie. En revanche, on identifie fréquemment la présence de magnétite dite en bande, se présentant comme un agglomérat linéaire de cristaux de magnétite, généralement parallèle à un côté de la scorie. Ces bandes de magnétite sont généralement associées à des scories de coulées, car

elles sont le signe d'un refroidissement rapide au contact d'une surface froide et/ou de l'air. La présence de magnétite aciculaire, principalement sur les bordures des scories, vient également renforcer cette idée.

Ce type de scorie qu'on peut donc nommer *plattenschlacke*, peut être rapproché de différents travaux et notamment de ceux menés par Emilien Burger (2008) durant sa thèse. Celle-ci avait pour but d'explorer la faisabilité d'un procédé, où les deux étapes de grillage et de fusion scorifiante auraient lieu dans le même réacteur, par le procédé de grillage et réaction, ainsi que de mettre en avant des marqueurs permettant de remonter aux conditions durant le procédé, notamment en quantifiant les différentes sources d'oxygène, solide et gazeuse. Emilien Burger a ensuite mis en place une série d'expérimentation en atmosphère contrôlée en laboratoire puis en conditions protohistoriques, utilisant un mélange de minerais, de malachite et de chalcopyrite en différents ratios (O/S)[35]. Afin de comparer son référentiel à une réalité archéologique, il a ensuite tenté de l'appliquer aux scories de Saint-Véran, dans les Hautes-Alpes en France, qui sont les premiers témoins de p*lattenschlack*e connus. Le site de Saint-Véran est daté de l'Âge du Bronze ancien (2300-1750 av. J.-C). Malgré cela, la comparaison aux scories de Vilabouly semble pertinente ici, car comme nous l'avons vu, elles partagent des caractéristiques comparables au p*lattenschlackle,* et donc à Saint-Véran. Le référentiel de E. Burger se base sur les résultats obtenus durant les expérimentations en laboratoire et sur le terrain, pour lesquelles il a caractérisé les différents produits en fonction des conditions expérimentales.

E. Burger a pu montrer que le procédé de Saint-Véran bénéficiait d'un rapport molaire Fe/Si optimal dans la charge et d'une meilleure homogénéisation de la température dans le réacteur, ayant amené la production de ce type de scories. Par le biais du référentiel, il a également pu mettre en lumière, la présence d'un grillage plus avancé, aboutissant à une plus grande proportion d'oxydes et d'une atmosphère plus réductrice (10^{-10} atm) à Saint-Véran, que pour les autres sites étudiés, notamment dans le Trentin italien.

Dans le cadre de notre étude, des analyses aussi précises que dans le cas d'Émilien Burger n'ont pas été mises en place, notamment dans le calcul du taux d'oxydation des scories[36]cependant on peut tout de même tenter une comparaison des résultats au référentiel établi.

[35] O/S = rapport molaire Oxygène/Soufre. L'oxygène provient du CuO de la malachite et le soufre directement de la chalcopyrite (Burger, 2008, p.181).

[36] Emilien Burger a pu faire ces analyses du taux d'oxydation des scories par Spectroscopie Mössbauer, µ-XANES et microsonde électronique.

log(PO2)	O/S = 0	0,8	2	2,5	3	4	∞
1 (air)	Scorie cuivreuse Cu métallique		Scorie cuivreuse Cu métallique				
3	Matte	Matte Scorie (+ Cu métallique	Matte Scorie ferreuse Cu métallique		Scorie ferreuse-cuivreuse Cu métallique	Scorie ferreuse-cuivreuse Cu métallique	Oxyde de cuivre
4			Matte Scorie ferreuse Cu métallique	Scorie ferreuse-cuivreuse Cu métallique	Scorie ferreuse-cuivreuse Cu métallique	Scorie ferreuse-cuivreuse Cu métallique	
7			Matte Scorie ferreuse Cu métallique	Scorie ferreuse Cu métallique	Scorie ferreuse-cuivreuse Cu métallique	Scorie ferreuse-cuivreuse Cu métallique	
10				Scorie ferreuse Cu métallique			

Groupe S: aucne oxydation

Groupe I: oxydation du fer et du soufre

Groupe O: oxydation du cuivre

Figure 195 : Classification des produits obtenus durant les expérimentations en fonction des rapports O/S. Les scories sont réparties en trois groupes (S, I et O) en fonction des éléments piégés dans la scorie. L'encadré noir gras indique où se situe les scories de Vilabouly (image modifiée d'après Burger, 2008, p. 193).

log(PO2)	O/S = 0	0,8	2	2,5	3	4	∞
1 (air)	Delafossite Magnétite Cuprite		Delafossite Magnétite Cuprite				
3	Pas de scorie (matte)	Quartz Fayalite	Quartz Fayalite Magnétite		Delafossite Magnétite	Delafossite Cuprite	Cuprite
4			Quartz Fayalite Magnétite	Delafossite Magnétite	Delafossite Magnétite	Delafossite Cuprite	
7			Quartz Fayalite Magnétite	Quartz Fayalite Magnétite	Delafossite Magnétite	Delafossite Cuprite	
10				Quartz Fayalite Magnétite			

Groupe S *Groupe O*

Groupe I' *Groupe O'*

Groupe I" *Groupe O"*

Figure 196 : Référentiel proposé par Emilien Burger basé sur les expérimentations en laboratoire en atmosphère contrôlée. Ici représentant les différentes phases obtenues dans les scories expérimentales par rapport au ratio O/S employé et à la pO_2. Les différents groupes de scories S, I', I'', O, O' et O'' sont définis par rapport aux phases présentes. L'encadré noir gras indique où se situent les scories de Vilabouly (image modifiée d'après Burger, 2008, p. 198).

Les scories de Vilabouly sont principalement constituées d'olivines ferreuses et de magnétite avec la présence de quartz résiduel. Si on regarde le référentiel établi en laboratoire par E. Burger (Figure 196), pour ce type de scories, on se situe dans un rapport molaire de

malachite/chalcopyrite (O/S) entre 2 et 2,5 et une pO_2 entre 10^{-3} et 10^{-10} atm (Figure 195 et Figure 196). Le ratio O/S à 2,5 est le rapport optimal identifié par E. Burger pour lequel la totalité du cuivre est sous forme métallique. Pour un ratio de 2, une matte avec une composition équivalente à la chalcocite est produite avec un volume d'environ 10% du produit total.

Le cuivre résiduel (sa nature et sa quantité) présent dans les scories est également fortement considéré par E. Burger. Les scories de Saint-Véran comptent un taux de cuivre résiduel global faible en dessous de 4 %mass. présent quasi uniquement sous forme de cuivre métallique. Ces caractéristiques permettent à E. Burger de les associer au rapport optimal de malachite/chalcopyrite à 2,5, pour lequel uniquement le cuivre métallique est produit. Dans le cas des scories de Vilabouly, le cuivre résiduel est également présent en faible quantité globale, en dessous de 5 %mass. En revanche, il se retrouve sous plusieurs formes : cuivre métallique, inclusions de sulfures de cuivre (matte) ainsi que minerais ayant partiellement réagi. Si on suit le raisonnement de E. Burger, ces caractéristiques correspondraient à un rapport O/S entre 0,8 et 2,5 puisqu'on a la présence récurrente d'inclusions de matte signifiant que l'oxydation des sulfures d'origine n'est pas complète.

Ces rapports variés pourraient être rapprochés de la reconstitution proposée pour Vilabouly, à savoir un mélange de minerais variable sans une volonté marquée de traiter volontairement les minerais sulfurés. Ce procédé mènerait à des charges de constitutions variées avec la présence plus ou moins importante de minerais sulfurés, renforcée également par la présence des couches de mattes macroscopiques. Ce référentiel a bien sûr été constitué via des conditions particulières qui ne sont pas nécessairement adaptées à toutes les situations archéologiques. E. Burger suggère que d'autres conditions soient testées dans le futur, en utilisant d'autres types de minerais et de fondant par exemple, afin d'enrichir le référentiel proposé.

Lors de ses expérimentations en atmosphère contrôlée en laboratoire utilisant différents ratios de malachite/chalcopyrite, E. Burger a également pu observer que pour un ratio de O/S=2, le produit obtenu se compose d'un nodule de cuivre central surmonté d'une couche de scories. La totalité du soufre provenant de la chalcopyrite a pu être éliminée, il n'y a donc pas de production de matte. Alors que pour les autres ratios, la couche de matte était présente. Cela signifie qu'un ratio O/S bien maîtrisé peut mener à un *cosmelting* total et à l'absence d'une couche de matte, même si un sulfure de cuivre était présent au départ dans la charge.

VII.4. Les creusets comme vaisselle de réaction

Revenons maintenant au réacteur dans lequel les opérations métallurgiques auraient pris part. Les céramiques techniques identifiées comme creusets en partie V.2 via leurs caractéristiques sont largement présentes. Les fragments de creusets présentent des traces de chauffe et possèdent une couche scoriacée dans leur partie interne, signe qu'ils ont été utilisés durant une opération à haute température. Ils ont une forme ouverte et peu profonde avec un fond convexe, certainement pour permettre un meilleur maintien du creuset dans le charbon/combustible. Ils possèdent des signes d'une chauffe apicale (au-dessus).

Les creusets de Vilabouly possèdent donc les caractéristiques des creusets des débuts de la métallurgie. En effet, ces derniers sont souvent associés à des réductions en creusets, étant des vaisselles portables, à faible contenu, offrant un meilleur contrôle des conditions pour des productions de cuivre à petites échelles (Martinon-Torres et Rehren, 2014 ; Rehren, 2003). Ils sont plus tard remplacés par des réductions en four pour des productions de cuivre en masse. Pour des périodes plus récentes, à l'époque médiévale occidentale par exemple, les deux modes de production peuvent être présents, adaptés aux conditions socio-économiques locales et au niveau de compétences (Bayley et Rehren, 2007). Les creusets des débuts de la métallurgie sont généralement de petites dimensions, ici avec un maximum de 150 mm de diamètre pour Vilabouly. Ils offrent donc un volume utilisable plus restreint, mais permettent de localiser la chauffe et le maintien des conditions dans un espace plus faible qu'un fourneau. En termes de quantité de production, une réduction en creuset produira moins en un cycle, mais elle permet une reproductibilité des opérations plus élevées que lors d'une réduction en four, généralement plus chronophage. L'utilisation des creusets engendre également une implication plus faible de la part des artisans en termes de mise en place de structures pour l'activité métallurgique.

On peut différencier deux types de creusets dans le corpus de Vilabouly en se basant sur le type de résidus scoriacés. On identifie des résidus de scories de type fayalitique, possédant les mêmes caractéristiques que les scories indépendantes aux creusets, et des scories à dominance vitreuse plus riche en cuivre (partie V.2) dénotant des conditions plus oxydantes.

La différence observée entre ces scories pourrait signifier deux choses : d'une part deux utilisations différentes ou d'autre part une variabilité des types de charges/conditions utilisées et tout particulièrement dans les taux en fer. Les résultats ont démontré que les deux types de scories semblaient appartenir à la même étape du procédé notamment par l'observation de leur rapport Al_2O_3/SiO_2 qui est similaire. Ces deux types de scories seraient donc issus d'une charge variable, particulièrement en oxyde de fer, ce qui rejoint les observations faites sur les scories macroscopiques du corpus. On a vu que les scories vitreuses riches en cuivre

impliquaient des conditions plus oxydantes ayant mené à la perte d'une part de cuivre métallique plus importante dans la scorie, en corrélation aux conditions lors du processus. Ces conditions plus oxydantes pourraient également provenir de l'emplacement de la scorie dans le creuset. En effet, les scories situées vers les lèvres du creuset pourraient être davantage exposées à des conditions oxydantes, ce qui pourrait expliquer ces différences. L'état fragmentaire de la plupart des creusets n'a pas permis de le vérifier, mais cela constitue également une hypothèse probable.

De plus, on a vu que les taux de fer devaient être plus élevés dans le cas des scories de type fayalitique pour que la cristallisation des olivines ferreuses apparaisse. Cela pourrait donc dénoter une variation dans les taux de fer présents dans la charge originelle. Les taux de fer dans la pâte sont généralement inférieurs à 5 %mass. La source de fer ne peut donc pas provenir uniquement de la céramique et vient forcément d'un ajout externe, ce qui pourrait renforcer l'utilisation des oxydes de fer en tant que fondant ou comme un ajout supplémentaire à la gangue.

Les creusets avec la couche de scorie interne de type fayalitique peuvent donc être associés à l'étape de réduction. En effet, elles possèdent toutes les caractéristiques décrites pour les scories macroscopiques et pourraient donc rentrer en jeu lors de la même étape. Le second type de creuset, avec les scories vitreuses riches en cuivre, pourrait être également issu de l'étape de réduction, mais avec une charge/condition variable. Nous avons vu que des températures au-delà de 1200°C, potentiellement jusqu'à 1300°C, auraient pu être atteintes dans le réacteur. Ces déterminations ne vont pas à l'encontre de l'utilisation d'un creuset pour la réduction, car de telles températures peuvent être obtenues par leur utilisation (T. O. Pryce, 2008), même si elles sont souvent variables (F. W. Rademakers, 2015).

Si on regarde la composition et minéralogie de la pâte des creusets, cette dernière semble homogène, signifiant que les matières premières utilisées pour leur confection étaient de même nature. On a donc une argile non calcaire riche en alumine, avec la forte présence d'inclusions de quartz et un dégraissant organique ajouté : la balle de riz. La balle de riz est fréquemment rencontrée dans les céramiques en Asie du Sud-Est à la fin de la préhistoire, comme nous le verrons par la suite. On voit donc apparaître une certaine forme d'homogénéité dans la composition, mais avec des formes de creusets variables, comme décrits en partie V.2, signifiant que cette homogénéité n'est pas présente à toutes les échelles.

De plus, l'utilisation des creusets permet une coulée du mélange directement après l'opération de réduction. On a vu, à la fois au travers des expérimentations, mais également de certains éléments du corpus, les lingots et certaines scories, qu'une opération de coulée devait prendre part au procédé. Les réductions expérimentales ont également soulevé un

autre problème : est-il possible d'obtenir les scories du corpus de type fayalitique plate et homogène par une réduction en creuset ? En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, le mode d'obtention de ce type de scorie reste encore assez flou, mais au vu des caractéristiques des scories, il nécessite des conditions particulièrement homogènes et maîtrisées pour leur formation. Est-ce que ces conditions peuvent être obtenues par une réduction en creuset ?

Les sites où ce type de scories est connu, principalement dans des contextes alpins, présentent parfois la découverte de four (H. Herdits, 2003; E. Burger, 2008; D. Bourgarit et al., 2010; A. Addis et al., 2016), mais comme nous l'avons mentionné, le processus de formation de ce type de scories est encore mal défini. À savoir, sont-elles produites par l'utilisation d'un four ou lors d'étape postérieure dans une fosse ? Dans leur étude de scories de Transacqua et Segonzano dans les Alpes italiennes, Anna Addis et consorts ont proposé que les scories plates appartiendraient à la dernière étape d'un procédé traitant le minerai de chalcopyrite et pourraient avoir été obtenues en utilisant un creuset ou un petit four, puis laissées refroidir à l'extérieur de la structure de chauffe (A. Addis, I. Angelini, et G. Artioli, 2017). La question peut également être posée pour Vilabouly, en l'absence de structure de chauffe connue et de l'étendue de la zone minière, laissant ouverte la discussion. Nous n'avons que peu d'éléments de réponses, mais à notre connaissance rien ne vient mettre en évidence une contradiction entre scorie plate et utilisation des creusets.

L'utilisation des creusets pour une étape du procédé métallurgique implique également leur association à une fosse/foyer dans laquelle le creuset était placé pour la chauffe. D'autant plus que les creusets de Vilabouly n'ont pas un fond plat, mais convexe, approprié pour être maintenu dans des charbons de bois par exemple. Nous avons vu (Chapitre II) que différents types de fosses avec des cendres et des signes de chauffe ont pu être découverts à *Puen Baolo*. Malheureusement nous n'avons pas pu étudier ces fosses qui étaient détruites lors de notre visite du site en 2017. On peut facilement supposer que certaines de ces fosses pouvaient être employées pour le procédé métallurgique en association à un creuset, car leurs dimensions concordent. En revanche, il semblerait que différents types de fosses existent à Vilabouly. En l'état actuel nous ne pouvons pas dire si ces différences correspondent à différentes activités ou si elles représentent une évolution des pratiques, car les niveaux archéologiques sont trop perturbés et ne permettent pas une telle interprétation. D'autres exemples de foyers associés à une activité métallurgique sont actuellement connus pour l'Asie du Sud-Est, à Ban Na Di, Ban Non Wat et Non Pa Wai en Thaïlande. Un des exemples de Ban Na Di possède également un conduit secondaire adjacent au foyer principal qui aurait pu avoir été employé pour l'apport en air.

On compte dans la littérature, un site dont les évidences archéologiques et le procédé reconstitué semblent proches de ce qu'on a pu décrire pour Vilabouly, à quelques exceptions. À Sharh-i-Sokhta en Iran, un procédé proche de ce qui vient d'être évoqué pour Vilabouly avait également pu être proposé par Hauptmann et al (2003). L'évidence de la présence de matte en couche macroscopique, comparable à Vilabouly, a pu être mise en avant. Les auteurs proposent que le procédé de réduction eût lieu dans des creusets de forme ouverte, chauffés par au-dessus, et que la charge se composât d'un mélange de minerais, impliquant majoritairement de la chalcocite associée à des carbonates/oxydes. Le mélange de minerai est ici interprété comme non intentionnel. Le principal objectif serait de produire du cuivre et non de la matte. Le cuivre était obtenu du minerai carbonaté/oxydé alors que le sulfure restait presque inchangé. Les sulfures semblent seulement avoir atteint l'état liquide avec un point de fusion relativement bas, à environ 900°C. Chaque opération de réduction impliquait ensuite une coulée du mélange dans une dépression dans le sol permettant l'obtention d'un lingot de cuivre et de sulfures de cuivre de 150 g environ, se séparant en dessous de la scorie. De plus, il apparaît que les mattes étaient ici abandonnées comme matériaux non utiles, car aucun signe de réutilisation n'a été mis en évidence (A. Hauptmann et G. Weisgerber, 1980; A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003). La même constatation peut être faite à Vilabouly, car les lingots avec les couches de matte semblent avoir été placés dans les tombes sans réutilisation. La seule différence notable entre Sharh-i-Sohkta et Vilabouly est la présence majoritaire des scories plates à Vilabouly, absentes du site iranien. Les scories obtenues ont plutôt des morphologies grossières pour Shahr-i-Sohkta, mais les deux procédés se rejoignent sur plusieurs conclusions.

VII.5. L'atmosphère de réduction et la ventilation

L'absence de phases oxydées, comme la delafossite ou la cuprite dans les scories de Vilabouly, indique que le procédé de réduction avait lieu dans des conditions préférentiellement réductrices (Bourgarit, 2007). La combinaison des phases dans la microstructure des scories, Cu métal et magnétite, indique une atmosphère réductrice moyenne (≈10^{-6} atm). La faible présence de wüstite dans certaines scories indique une atmosphère plus réductrice localement (10^{-10}, 10^{-12} atm) pour les mêmes températures. De plus, les mêmes phases peuvent être observées dans une partie de la couche adhérente aux creusets, suggérant des conditions similaires. En revanche, le second type de scorie identifié dans les creusets, vitreuse riche en cuivre, suggère des conditions plus oxydantes, avec une part plus grande de cuivre oxydé.

La présence de taux de fer significatifs identifiés dans certains produits métalliques, les lingots nœud papillon, pourrait indiquer qu'à certains moments les conditions ont mené à une atmosphère plus réductrice ayant permis l'incorporation de fer dans le cuivre, et même dans

un cas, la production de fer métallique (PBL/11). De plus la scorie PBL/C17/1/2/a avec une forte part de wüstite pourrait également aller dans le sens de cette hypothèse.

Les conditions redox sont contrôlées via l'apport en air dans le réacteur ainsi que le combustible. Dans la métallurgie ancienne, on trouve des traces de ventilation naturelle et artificielle dans le réacteur de réduction. Les cas de ventilation naturelle font généralement intervenir des cheminées perforées permettant d'amener l'air dans le réacteur (T. O. Pryce et al., 2007; T. O. Pryce, 2008; F. Téreygeol et P. Cruz, 2014, 2021), alors qu'une ventilation artificielle fait intervenir deux principaux dispositifs : ventilation par pipe à bouche (E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010) ou ventilation par soufflet(s) à main accompagnés d'une ou plusieurs tuyères. Le Complexe de Vilabouly n'a livré aucune évidence d'un dispositif d'apport en air, aucun fragment de tuyère qui est généralement la preuve la plus retrouvée sur les sites archéologiques d'un apport forcé en air. Cela était aussi vrai pour la Vallée de Khao Wang Prachan, où des expérimentations similaires ont suggéré qu'un apport en air naturel, par l'utilisation du vent, était peu probable, et qu'un dispositif d'apport en air forcé devait être présent (T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010). Les conditions décrites par l'étude du mobilier de Vilabouly suggèrent également que l'apport en air devait être forcé, car nous avons vu que les sous-produits, particulièrement les scories témoignaient de conditions maîtrisées et des températures au-delà du liquidus qu'il parait difficile d'atteindre via une ventilation naturelle. Bien qu'aucun fragment de tuyère et/ou dispositif d'apport en air n'ait été découvert à Vilabouly, on peut supposer que l'apport en air était forcé.

VII.6. Une production primaire

Le Complexe de Vilabouly a également livré un large corpus d'objets semi-finis et finis nous permettant d'avoir accès aux étapes finales de la chaine opératoire qui vont ensuite nous permettre plus largement d'appréhender sa production dans le contexte régional (chapitre VIII). La microstructure, la composition et l'isotopie du plomb ont été abordées pour tous les différents types d'objets du corpus en partie V.5. Une partie du corpus est constitué de lingots composés majoritairement de cuivre et la seconde d'objets finis alliés à l'étain et au plomb. Le Complexe de Vilabouly compte en première approximation, la présence d'une production primaire et secondaire.

Les lingots sont des bruts de fonderie et comme ce sont des produits intermédiaires, ils ne nécessitent normalement pas d'autre traitement. Ils possèdent pour la plupart une structure avec des grains équiaxes indiquant un refroidissement plutôt lent qui mènerait à l'absence de dendrite et à la formation des grains. Cette reconstitution semble donc faisable : les lingots étaient coulés, puis laissés à refroidir dans le moule/contenant.

Certaines différences peuvent être observées entre les lingots nœud papillon de Puen Baolo et les lingots bol/conique. Les lingots bols (non datés) du musée de Vilabouly et les lingots coniques de Thong Na Nguak possèdent un taux de soufre plus élevé entre 1 et 2 %mass., ce qui est à relier à la composition de la charge de réduction originale. Ces taux de soufre sont également comparables à ceux décrits pour les boutons de cuivre en partie V.4 pour les lingots composés de couches multiples : cuivre, matte et scories. Des différences sont également présentes dans les inclusions des lingots bols qui ne contiennent pas de bismuth, mais de l'arsenic, en opposition aux lingots nœud papillon.

On peut également mentionner les taux de fer de certains lingots nœud papillon. En prenant en compte que ces lingots, avec des grains équiaxe et jusqu'à 3 %mass. de fer, ont refroidi lentement si on regarde le diagramme de phase Cu-Fe, des précipités riches en fer devraient être visibles dans les échantillons. Or, aucun n'est présent. Le fer a une solubilité faible (3-6 %) dans le cuivre, pour des températures de 1100°C-1200°C décroissants plus le refroidissement est lent, mais la présence de 2 % de soufre dans le système peut augmenter cette solubilité jusqu'à 20% à 1200°C ce qui pourrait expliquer l'absence de précipitée (Craddock et Meeks, 1987).

Une solution solide de cuivre et de fer semble présente, ainsi que des oxydes de fer pour l'échantillon PBL/11 sous forme de goethite (α-FeOOH) qui indiquerait la présence originelle de fer-α et donc d'un taux de fer plus élevé. Sur cet objet, une estimation du taux en fer original a été tentée par traitement d'images MO en calculant la surface occupée par la goethite et la matrice de cuivre, en partant de l'hypothèse que la goethite était à l'origine composée de 100 %mass. de fer. Le taux de fer estimé pour PBL/11 est donc autour de 20 %mass. Cependant, l'échantillon de taille millimétrique ne doit pas être pleinement représentatif de la totalité de l'objet.

Le fait que 6 des 20 échantillons de lingots nœud papillon ait un taux de fer autour de 3 %mass. pourrait signifier des variations dans le procédé de production et/ou une mauvaise maîtrise, ce qui va à l'encontre des caractéristiques décrites pour les scories notamment. La présence de fer pourrait être aussi liée à des conditions plus réductrices localement lors de l'opération puisqu'on a vu que de la wüstite était par moment formée dans les scories.

Pour certains contextes, des chercheurs proposent que la réduction de fer métallique ait pu être encouragée dans le cas d'objets utilisés comme moyen d'échange, où la densité a une importance et donc un avantage économique peut-être gagné en abaissant le taux de cuivre (Craddock et Meeks, 1987). On trouve quelques exemples d'ajout délibéré de fer pour obtenir des alliages cuivre-fer dans la littérature, pour le monde méditerranéen notamment avec les barres *ramo secco.* Hormis PBL/11, les autres échantillons ont un taux de fer moins élevé. Il

est donc difficile de conclure à une pratique volontaire, mais elle mérite tout de même d'être mentionnée. En revanche, en termes de débat sur les lingots, cette pratique de l'enrichissement volontaire en fer peut être comparée à un des lingots coniques de Thong Na Nguak (TNN/3) qui possède une inclusion macroscopique de céramique à cœur (Figure 197), réduisant ainsi également le volume de cuivre.

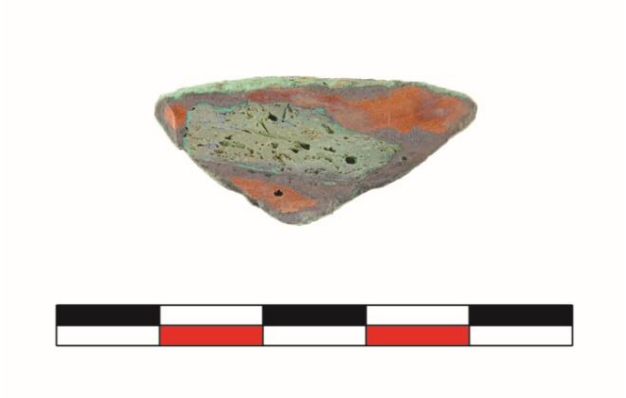


Figure 197 : Lingot conique TNN/3 avec le fragment de céramique à cœur.

La présence de fer dans ces six échantillons indique que du moins occasionnellement, les conditions de réduction à Vilabouly sont montées trop haut en température avec une atmosphère trop réductrice pouvant mener à l'incorporation de fer dans le cuivre, si des oxydes de fer étaient présents dans la charge (S. R. B. Cooke et S. Aschenbrenner, 1975; P. T. Craddock et N. . Meeks, 1987; W. Rostoker, V. C. Pigott, et J. R. Dvorak, 1989). La pratique de l'affinage n'était donc pas systématique, voire non appliquée au cuivre à ce stade. Les taux de fer sont moins élevés dans le cuivre des lingots coniques, ce qui pourrait être lié à des évolutions dans la pratique. En effet nous avons vu que les lingots nœuds papillon pourraient être associés à une activité de l'âge du Bronze, alors que les lingots coniques à l'âge du Fer. Ces différences temporelles pourraient être liées à des évolutions techniques et notamment dans l'affinage du métal. En l'absence d'une résolution chronologique précise, ces questions demeurent sans réponse, mais pourraient être une explication potentielle. Il est également intéressant de noter qu'à PBL les lingots nœud papillon et coniques ne sont jamais retrouvés associés dans les mêmes contextes.

VII.7. Une production secondaire ?

En partant du constat que l'activité d'extraction et de réduction du cuivre avait bien lieu à Vilabouly, on peut maintenant s'intéresser à la pratique des alliages. Tous les objets hormis lingots sont alliés à l'étain, certains également au plomb. Les sources d'étain sont abondantes en Asie du Sud-Est (Hutchison, 2005; Hutchison et Taylor, 1978; Schwartz et al., 1995) et sont parmi les plus importantes de l'Ancien Monde. Le Laos est traversé par la ceinture Truong Son dont fait parti Vilabouly, connue pour ses richesses minérales. Pourtant, aucun dépôt primaire

d'étain n'est connu à proximité immédiate de Vilabouly. Des dépôts sont mentionnés dans le nord du Laos. Il en existe également un actuellement exploité dans la Province de Khammuane, la vallée de Phathen (Lahiri-Dutt et Invouvanh, 2010) proche de Savannakhet. Quant aux minerais de plomb, des minerais de galène, desquels on peut extraire le plomb sont présents à Vilabouly, mais en très faible quantité. De plus, les données isotopiques pour les objets alliés au plomb (tambours et cloches) présentent des signatures différentes de celle de Vilabouly. Les sources de plomb seraient donc également externes au site.

Les restes archéologiques de la réalisation d'alliage ou de fonte à Vilabouly sont très minces, on peut seulement mentionner un moule en grès potentiel pour la fonte de lingot conique ainsi qu'un fragment. Aucun résidu d'étain ou de plomb n'a été mis en évidence dans les creusets, comme nous l'avons vu en partie V.2. La pratique de l'alliage à Vilabouly demeure donc à être démontrée.

VII.8. La signature isotopique du plomb

Les isotopes du plomb nous permettent de vérifier si les objets découverts à Vilabouly sont concordants avec sa signature, s'ils ont bien été produits localement ou importés. Comme mentionné précédemment, nous ne pouvons pas dire pour l'instant si la mise en forme des objets (fonte/alliage) a eu lieu à Vilabouly, en l'absence de matériel découvert. Cette question trouve davantage d'échos encore dans le cas des objets avec une typologie non régionale marqueuse d'échange, les *ge* et les tambours, qui seront plus largement abordés au chapitre VIII.

Les signatures isotopiques de la majorité des objets analysés forment une signature homogène et concordante avec celle précédemment établie (Pryce et al, 2014, 2011). Les lingots tombent dans le cluster de Vilabouly suggérant une production primaire de lingots, avec deux exceptions (PBL/10 et PBL/47), peut-être indicative du recyclage de métaux non locaux et/ou de l'utilisation de ces types de lingots pour d'autres sites de production, ce qui n'est pour l'instant pas connu.

En plaçant sur le diagramme binaire les signatures des lingots par rapport à leur typologie, on peut remarquer de faibles, mais claires distinctions (Figure 198). La signature des lingots nœuds papillon de Puen Baolo semble différente des lingots bols et des lingots coniques de Thong Na Nguak, pouvant indiquer l'utilisation de minéralisations différentes, bien que locales, peut-être variables au cours du temps. Cette observation dessinée par les résultats isotopiques trouve un écho dans les différences observées sur les données élémentaires des lingots : les lingots nœud papillon contenant moins de soufre que les lingots bols et coniques. Les résultats des scories de Thong Na Nguak et Puen Baolo ont également permis de dresser ces questionnements. En effet, les taux d'oxydes de zinc et de manganèse étaient plus élevés

pour Thong Na Nguak signifiant que des minéralisations différentes auraient pu être employées.

Ces variations isotopiques et élémentaires pourraient également avoir un lien avec l'association des deux sites de productions de Puen Baolo et Thong Na Nguak avec les minéralisations de Thengkham South et Khanong exploitées par la mine actuelle. Malheureusement, cette hypothèse ne peut pas être confortée pour l'instant, car les données minérales sont la propriété de la concession minière. Les résultats des creusets et des scories archéologiques de PBL et TNN suggèrent également cette différence dans les matières premières, venant renforcer l'hypothèse.

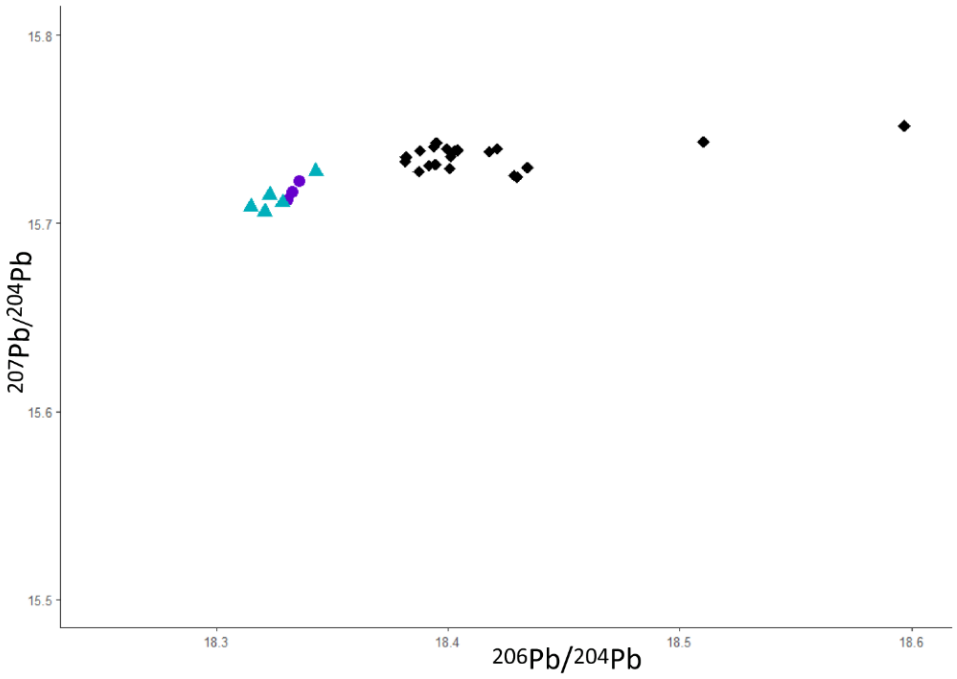


Figure 198 : Diagramme binaire reprenant les données isotopiques par type de lingot (bol, nœud papillon et conique) selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$-$^{207}Pb/^{204}Pb$.

Sur les 21 objets contenant de l'étain analysés, 12 sont concordants avec la signature de Vilabouly, venant renforcer l'hypothèse d'une production secondaire sur le site. Même s'il faut toujours mentionner que le cuivre de Vilabouly pourrait avoir été exporté pour la fonte de bronzes à un autre endroit et les produits finis réimportés ou qu'il existe un autre site primaire avec des ratios d'isotopes du plomb similaires à ceux de Vilabouly.

Les objets non compatibles avec la signature de Vilabouly sont : deux lingots nœud papillon (PBL/10 et 47), le burin (PBL/17), l'herminette (PBL/28), deux fragments (PBL/41 et 43), deux haches (PBL/9 et 45), le couteau (PBL/46), deux *ge* (VC/1 et 2), les trois cloches (VC/9,10 et 11) et les tambours (VC/12 et 13). Les 16 exceptions incluent sept objets, dont quatre alliés au plomb (cloches et un tambour) provenant du musée, découverts hors contexte de fouille, ainsi

que deux de PBL WEST (zone adjacente à la fouille de Puen Baolo). Il faut également toujours prendre en compte les potentielles pratiques du mélange, l'alliage et du recyclage pouvant avoir un impact sur la signature isotopique. Elles peuvent aussi expliquer les différences perçues pour les 16 exceptions. Vilabouly n'a pas livré de signe de la pratique du recyclage ou de l'alliage même si elles restent probables compte de l'étendue du site.

La partie V.5 a permis d'évoquer les différences entre les *ge* via les données morphologiques, microstructurales et compositionnelles. Les trois *ge* prélevés au musée de Vilabouly (VC/1,2 et 3) apparaissent plus simples, avec une structure de brute de fonderie et un taux d'étain plus bas, comparés à l'exemple de Puen Baolo (PBL/8), qui a été martelé et recuit, montrant un objet plus travaillé. La première hypothèse était que l'exemple de Puen Baolo soit une importation, alors que les autres des imitations locales, mais ce n'est à priori pas le cas. PBL/8 est concordant avec la signature isotopique de Vilabouly, ainsi que VC/3. Alors que VC/1 et 2 font partie des exceptions, suggérant qu'ils pourraient avoir une source différente. Cette observation peut signifier deux choses. VC/1 et 2 ont bien été produits à Vilabouly avec du cuivre potentiellement importé et/ou recyclé ou avec un élément d'alliage qui serait venu fausser la signature. Dans la seconde hypothèse, ils auraient bien été produits sur un autre site, mais visiblement selon la même technique. Il est difficile de trancher sur l'une ou l'autre des hypothèses bien que la première semble probable.

Les trois cloches et les tambours sont des alliages ternaires Cu-Sn-Pb. La signature obtenue appartient donc à celle du plomb ajouté et relève des réseaux d'échanges de plomb dont on ne peut pas discuter à l'heure actuelle en l'absence de données (T. O. Pryce, 2012). On peut tout de même noter que les signatures des tambours et des cloches sont différentes, ce qui pourrait suggérer différents lieux d'approvisionnement pour cette matière première. Les objets alliés au plomb pourraient avoir été produits à Vilabouly, avec un import de plomb ou bien produits sur d'autres sites et importés à Vilabouly.

VII.9. Puen Baolo vs Thong Na Nguak

	Puen Baolo	**Thong Na Nguak**
Datation	IV-IIIèmes siècle av. J.-C (TKSC : XI-Xèmes siècle av. J.-C)	IV-Ier siècle av. J.-C
Procédé	Co-smelting (non intentionnel)	Réduction de malachite?
Minerais	Malachite + minerais sulfurés (chalcocite + Pyrite [inclusions?] dépendant des minéralisations	Malachite + ?
Zones minières	Oui (puits de mine)	Oui. Khanong A2 à 300 m (puits de mine)

Scorie	Plate Massive Grossière	Grossière Coulée
Efficacité	CuO scorie en moyenne = 2 %mass.	CuO scorie en moyenne = 2,9 %mass.
Creuset	Oui	Oui
Structure de chauffe	Oui	Oui ?
Matte (macro)	Oui	Non
Lingot	Oui	Oui
Objet fini	Oui	Non
Moule	Deux fragments potentiels	Non
Réduction	Oui	Oui
Métallurgie de transformation	Affinage ? Alliage ? (aucune trace)	Aucune trace
Contexte funéraire associé	Tombes en fosse	Urne
Habitat associé	Poterie domestique	Poterie domestique, allignement de pierre

Tableau 42 : Tableau comparatif des données de Puen Baolo et Thong Na Nguak.

Le Complexe de Vilabouly compte deux sites identifiés comme des lieux de production. Puen Baolo et Thong Na Nguak ont pu être confrontés durant cette étude et des variations émergent sur différents points (Tableau 42). Les premières variations entre PBL et TNN peuvent s'exprimer au travers des scories, notamment dans les taux en oxydes de manganèse et de zinc, plus élevés pour les scories de TNN (Figure 199). Les taux en d'oxydes de fer sont également plus bas pour les scories de TNN (Figure 199).

On note également une différence dans les inclusions métalliques. Les sulfures de cuivre primaire (chalcopyrite et bornite) sont absents des scories de TNN, alors qu'ils sont plus largement observés pour PBL. Ces deux observations pourraient matérialiser une variation dans les matières premières employées entre les deux sites, principalement les minerais, qui dans le cas de TNN semblent plus riches en manganèse et en zinc. La réduction avec mélange de minerais principalement identifiée au travers de PBL, ne semble pas rentrer en jeu de la même manière à TNN. Les sulfures primaires sont absents des scories, ce qui pourrait signifier deux choses : d'un côté la présence moins importante de minerais sulfurés dans la charge de réduction de TNN, ou bien un procédé permettant une meilleure désulfuration, notamment

des sulfures complexes, menant à l'obtention d'inclusions de sulfures seulement composées de chalcocite et de covellite. On peut ici une nouvelle fois rapprocher cette hypothèse du référentiel d'Émilien Burger qui avait pu noter que pour l'utilisation d'un mélange avec un rapport O/S de 2 (malachite/chalcopyrite), la matte obtenue était de type chalcocite. La totalité du fer et une grande partie du soufre avaient pu être éliminés. On pourrait donc avoir à TNN un procédé pour lequel la charge de minerais et les conditions étaient davantage maîtrisées pour une oxydation plus optimale des sulfures et un rendement supérieur en cuivre métallique.

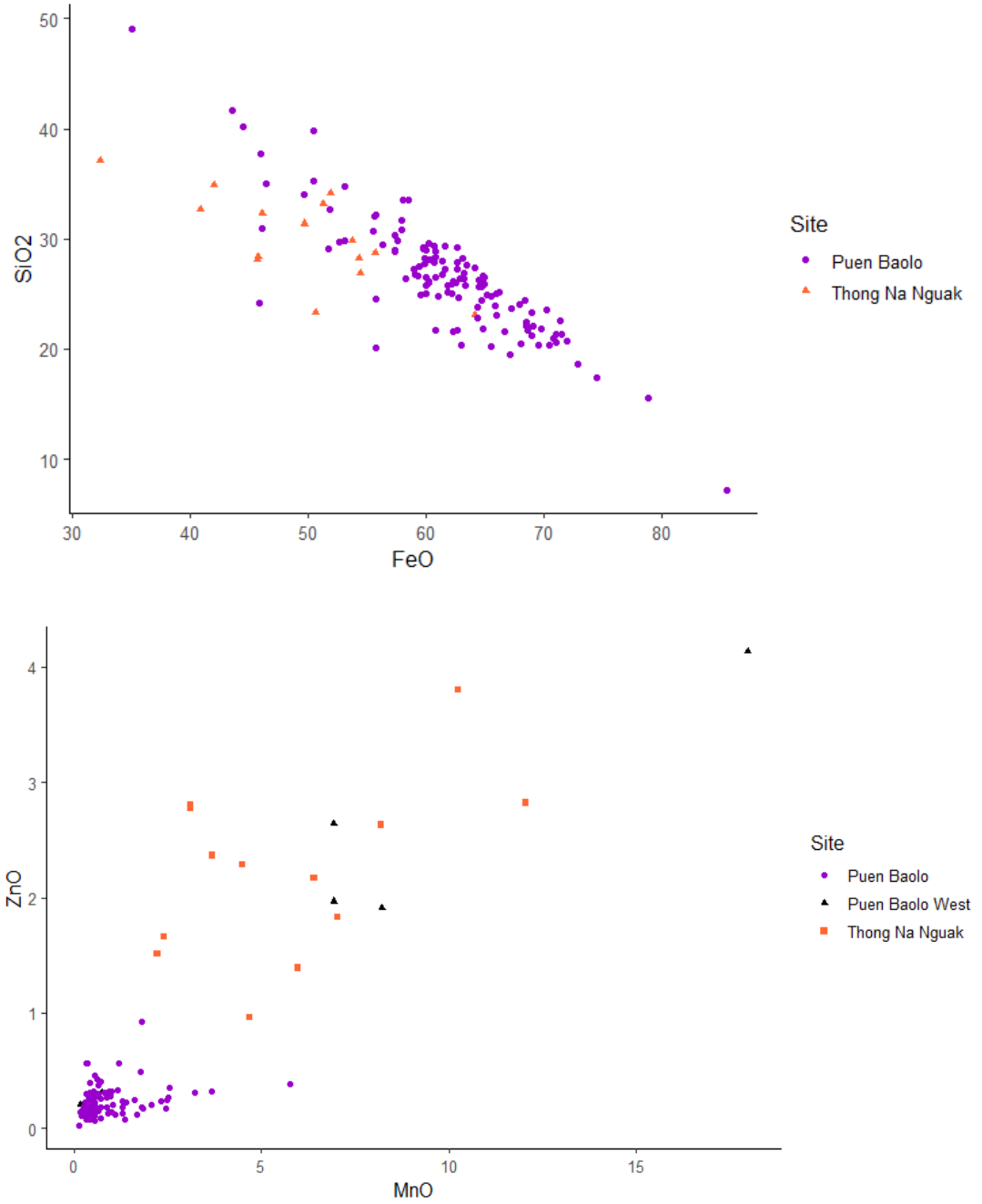


Figure 199 : Diagramme binaire représentant les teneurs en FeO et SiO_2 (en haut) et en MnO et ZnO (en bas) des scories de Thong Na Nguak comparées à celles de Puen Baolo.

Si on regarde à nouveau la géologie du site, on remarque que les minéralisations du Complexe de Vilabouly, à la fois à Khanong et Thengkham (voir Chapitre II), contiennent des minéralisations définies comme exotiques, comportant des agglomérats de cuivre manganésifère. Ces agglomérats sont parfois associés, c'est le cas pour Khanong, à de la malachite, azurite, cuprite et cuivre natif. On les retrouve dans la zone supergène disséminés dans les premiers 25 m d'épaisseur. La présence de ces minéralisations exotiques comportant des minerais Cu-Mn pourrait expliquer la plus forte présence d'oxyde de manganèse dans les scories de TNN. En effet, ces minéralisations, situées dans les premiers 25 m, auraient pu être exploitées. De plus, la profondeur des puits de mine anciens mis au jour à Khanong A2 semble cohérente (Chapitre II) avec certains atteignant jusqu'à 30 m de profondeur. L'exploitation de ces minéralisations exotiques pourrait être à l'origine des différences entre les scories de TNN et PBL dans les taux d'oxyde de manganèse.

La différence entre les matières premières de TNN et PBL, particulièrement les minerais est renforcée par les résultats isotopiques du plomb. En effet, en regardant les données isotopiques des lingots de PBL et de TNN, on voit apparaître une fine, mais significative variation (voir partie V.5). Ce résultat pourrait matérialiser l'emploi de minéralisations différentes et peut être variable au cours du temps au sein du Complexe de Vilabouly, possédant une signature isotopique interne variable. Seulement deux lingots coniques de Thong Na Nguak ont pu être analysés, ce qui empêche de proposer des conclusions définitives, mais tous les résultats analytiques du corpus semble nous orienter vers une différence entre les deux sites.

Les datations pour Thong Na Nguak et Puen Baolo ne montrent pas une période d'activité différente. Ils sont tous deux datés du début de l'âge du Fer régional, même si les datations sont trop peu nombreuses pour permettre de proposer une hypothèse sure. Le site de Thong Na Nguak mérite également d'être plus amplement exploré, mais les fouilles sont rendues difficiles par l'importance qu'occupe la zone dans les croyances locales et l'activité minière. On peut dire assez surement qu'une seule saison de fouille n'était pas suffisante à TNN et qu'il n'a pas fini de livrer son potentiel. De plus, il semble être associé à la zone minière de Khanong qui a permis la découverte d'un vaste complexe minier, composé de puits de mine verticaux, dénotant une activité d'extraction d'ampleur. Si la zone minière de Khanong était bien liée à l'activité de production de Thong Na Nguak, on peut donc s'attendre à un site de production beaucoup plus étendu.

Pour l'instant, nous pouvons dresser deux hypothèses face aux résultats des études de PBL et TNN. Les variations mises en évidence pourraient :

-Soit montrer la mise en place de deux procédés proches, exploitant différentes matières premières, notamment les minerais. Ainsi elles dénoteraient la présence parallèle de plusieurs communautés/artisans.

-Soit elles représenteraient une variation temporelle qui n'a pas encore pu être mise en avant par les datations à l'heure actuelle.

VII.10. Synthèse

Le Complexe de Vilabouly a livré différents artéfacts qui ont pu être directement reliés à la chaine opératoire de production du cuivre (fragments de minerais, scories, céramiques techniques et objets en cuivre/alliage cuivreux) et dont l'étude nous a permis d'enrichir notre connaissance des procédés employés (Figure 200). Les données ont relevé l'utilisation de malachite comme minerai principalement exploiter, du fait de son abondance dans les dépôts. D'autres minerais sulfurés se retrouveraient associés à la malachite en fonction des minéralisations exploitées et mèneraient donc à un procédé avec mélange de minerais. Le minerai sulfuré principalement présent dans la charge a été identifié comme la chalcocite car il s'agit du second minerai le plus abondant à Vilabouly. Il serait également possible que d'autres types de minerais contenant du soufre soient également présents, comme la pyrite ou la chalcopyrite, mais leur contribution reste difficile à discerner.

Le procédé n'avait pas pour but de traiter les minerais sulfurés, mais principalement la malachite et donc d'obtenir directement du cuivre métallique en une étape réductrice. L'ajout de sulfures à la charge et l'utilisation du *co-smelting* pourraient donc être définis comme involontaires. Les variations de minerais sulfurés dans la charge pouvaient mener à l'obtention de couche macroscopique de matte dans les produits, car le procédé n'était pas tourné vers l'élimination du soufre provenant des minerais sulfurés.

L'opération de réduction avait lieu dans des creusets de forme ouverte dont les dimensions n'excèdent pas 15 cm de diamètre, en association à un foyer/fosse. Après la réduction, le mélange était directement coulé dans un autre contenant ce qui permettait d'obtenir les lingots multicouches composés de scories, de matte et/ou de cuivre métallique. La présence de matte et de scories était directement reliée à la composition de la charge d'origine et aux conditions.

L'observation des scories a permis de montrer que le procédé de réduction était maîtrisé, menant à la production de scories homogènes de type fayalitique (1100-1200°C), et principalement de type *plattenschlacke.* Des variations dans les compositions en oxyde de fer ont été mises en évidence pour les scories adhérentes aux creusets, mais également pour les scories macroscopiques. Ces variations dénotent des fluctuations en oxyde de fer dans la charge d'origine qu'on pourrait attribuer à une origine volontaire, dans le cas d'un ajout de

fondant et/ou une préparation des minerais et de la gangue, ou involontaire dans le cas d'une présence plus ou moins importante d'oxydes de fer associés à la gangue des minerais employés.

Une partie du cuivre brut obtenue semble avoir été transformée sur place, puisque les résultats isotopiques démontrent des signatures concordantes d'objets finis avec celle du Complexe de Vilabouly. Les étapes liées à cette métallurgie de transformation sont invisibles sur le site, car aucun élément, hormis quelques potentiels fragments de moule, n'a été découvert. Il faut également prendre en compte la longue occupation du site dont nous avons une faible résolution chronologique, durant laquelle les procédés ont pu évoluer. Les données obtenues durant cette thèse ne permettent pas de mettre en avant ces potentielles évolutions, hormis peut-être dans le cas des lingots nœuds papillon. En effet, la forme de ces lingots diffère des lingots multicouches (et coniques) qui seraient directement issus de l'étape de réduction et pourrait donc représenter une variation de procédé et/ou temporelle. Nous avons mentionné que ces lingots se trouvaient associés au contexte funéraire profond de Puen Baolo et pourraient donc représenter une production antérieure aux lingots mutlicouches. L'origine des différences observées entre les deux types de lingots (multicouches/coniques et nœud papillon) ne peut donc pas être distinguée.

Enfin, il faut mentionner les différences mises en avant entre les productions de *Puen Baolo* et *Thong Na Nguak*, les deux sites de production étudiés. En effet, les résultats montrent des variations entre les compositions des scories de TNN et PBL, qui seraient reliées à l'utilisation de matières premières différentes, et donc de minéralisations différentes, ce qui est renforcé par les données isotopiques. Afin de conforter cette observation, nous percevons la nécessité d'élargir les fouilles à TNN (qui n'a été fouillé qu'une année), bien que cela semble compromis avec le changement de propriétaire de la concession minière. Davantage d'artéfacts de TNN devraient être étudiés afin d'effectuer une comparaison plus approfondie avec PBL.

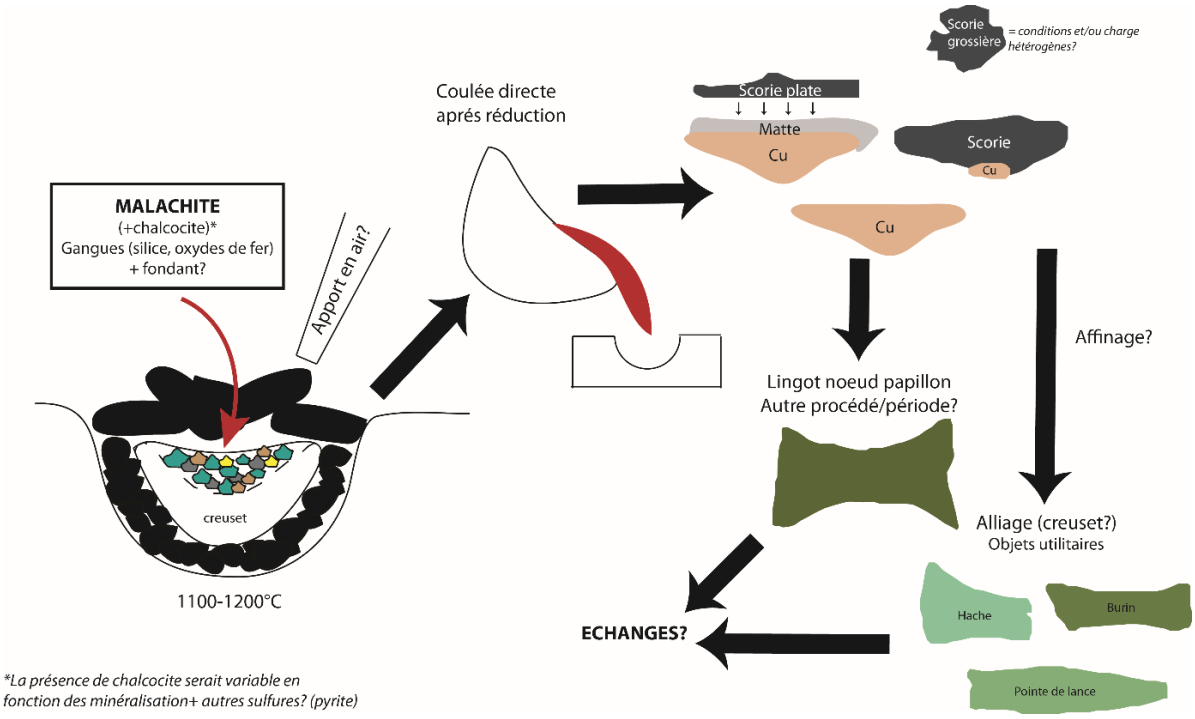


Figure 200 : Figure bilan reprenant les différents éléments de la chaine opératoire proposée.

Le dernier chapitre permettra de développer plus amplement les comparaisons entre les résultats de Vilabouly et ceux de différents sites métallurgiques en Asie du Sud-Est afin de compléter les premières observations dressées lors de ce bilan. Dans un second temps, la place de Vilabouly dans les réseaux d'échanges sera plus largement questionnée au travers de la nature des produits, ses lieux de consommations et ses voies d'échanges potentielles qui offriront également un proxy à l'interaction et à la circulation des communautés.

Chapitre 8 : Le Complexe de Vilabouly dans la macro-région : approche comparative et réseaux d'échanges

Le premier chapitre nous a permis de décrire les différents sites connus d'Asie du Sud-Est continentale pour lesquels des traces d'une métallurgie du cuivre primaire et secondaire ont pu être identifiées. De ce fait, nous allons maintenant pouvoir comparer les données obtenues pour le Complexe de Vilabouly, présentées Chapitre V à VII, à ces différents sites régionaux avec leurs caractéristiques techniques en lien avec la métallurgie. La métallurgie sera également un biais par lequel nous aborderons des réflexions plus générales sur les réseaux de contacts/échanges liant ces communautés la pratiquant et la consommant. Cette partie a donc pour objectif de présenter une sélection pertinente d'éléments comparatifs régionaux afin d'appréhender la production de Vilabouly à l'échelle de la macro-région et de la replacer au sein des connaissances régionales. La macro-région englobe ici un vaste ensemble de tous les pays actuels de l'Asie du Sud-Est continentale (voir Chapitre I).

VIII.1. Comparaison de la reconstitution technologique de Vilabouly avec d'autres sites de productions (primaires et secondaires)

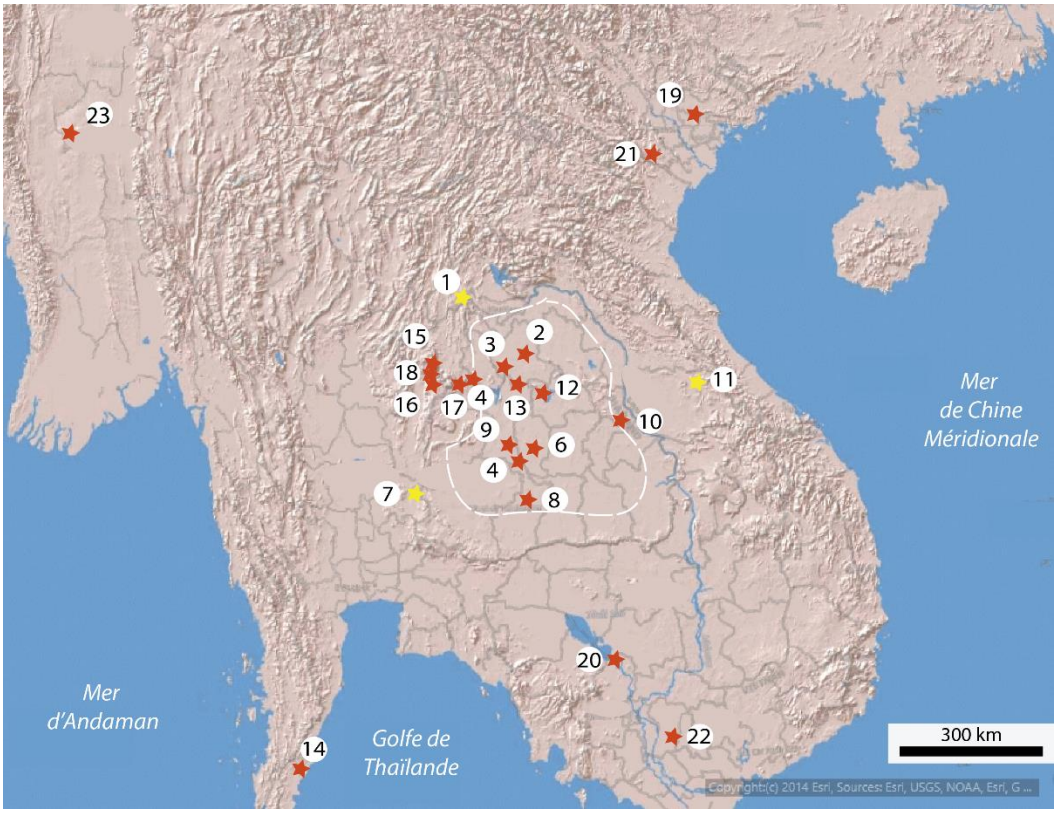


Figure 201 : Localisation des sites avec des signes de métallurgie primaire (étoiles jaunes) et secondaire (étoile rouge) : 1= Phu Lon, 2= Ban Chiang, 3= Don Klang, 4=. Non Nok Tha, 5=Noen U-Loke, 6= Ban Lum Khao, 7= Vallée de Khao Wong Prachan, 8= Non Ban Jak, 9= Ban Non Wat, Non Nong Hor, 11= Vilabouly, 12= Ban Chiang Hian, 13= Non Chai, 14= Khao Sam Kaeo, 15= Ban I Loet, 16= Non Kaw Wong, 17= Non Pa Kluay, 18 : Ban Puan Phu, 19= Co Loa, 20= Samrong Sen, 21= Than Den, 22= Go O Chua, 23= Oakaie (crédit carte de base= ESRI).

Les preuves archéologiques physiques d'une métallurgie du cuivre/bronze en Asie du Sud-Est continentale se retrouvent seulement pour deux autres sites miniers et de production de cuivre à la fin de la période préhistorique (en plus de Vilabouly) : la vallée de Khao Wong Prachan et Phu Lon en Thaïlande. On dénombre également des sites avec des signes d'une métallurgie secondaire, dont les principaux (Figure 201) sont : Ban Non Wat, Ban Chiang, Non Nok Tha, Ban Na Di, Dong Klang, Noen U-Loke, Non Pa Kluay, Ban I Loet, Non Khaw Hong, Ban Chiang Hian, Non Nong Hor et Khao Sam Kaeo en Thaïlande, Samrong Sen (Cambodge) ou encore les sites liés à la culture de *Dong son* au nord du Vietnam, et Go O Chua au sud (pour une description et les références, se référer au Chapitre I.2.1), qui vont maintenant pouvoir être comparés à la *chaine opératoire* du Complexe de Vilabouly.

VIII.1.1. La Vallée de Khao Wong Prachan : principale zone de comparaison

La vallée de Khao Wong Prachan (notée KWPV) représente la plus pertinente comparaison, car il s'agit du seul autre site de production primaire dont l'assemblage a été étudié en détail par une approche archéométrique (A. Bennett, 1988 b; a; T. O. Pryce, 2008; T. O. Pryce et al., 2010). La reconstitution technique de KWPV a été présentée au Chapitre I, nous n'aborderons ici que les points d'intérêts servant cette comparaison.

L'étude de NPW et NKH par Pryce (2008) avait conclu que KWPV possède une séquence évolutionniste passant d'une production hétérogène non maîtrisée (NPW) vers une production maîtrisée de plus grande échelle (NKH), stimulée par une demande extra-régionale en cuivre. Les deux sites représentaient alors deux périodes temporelles différentes, âge du Bronze et âge du Fer. Donnée intéressante, les nouvelles datations pour NPW et NKH (T. Higham et al., 2020) montrent qu'une partie de l'activité des deux sites aurait pu être parallèle. Ces nouvelles datations ont également permis de déplacer la période d'activité des deux sites, puisque Non Pa Wai serait actif à l'âge du Bronze (avec un début d'occupation au Néolithique), alors que Nil Kham Haeng le serait à la fin de l'âge du Bronze et au début de l'âge du Fer. L'évolution temporelle perçue par T.O Pryce entre NPW et NKH tient toujours, seulement elle est maintenant plus ancienne que supposée précédemment. Cela pose alors les questions suivantes : pourquoi deux grandes zones de production ont pu être en activité contemporaine durant une période dans deux zones géographiquement proches de 3 km (V. C. Pigott, 2019, p.6) ? Pourquoi le site de Non Pa Wai a-t-il été abandonné ? Ce questionnement trouve également un écho pour Vilabouly, puisque les deux sites principaux de PBL et TNN étaient également en activité durant une période contemporaine, à seulement 8 km d'écart. Les nouvelles datations placent l'activité de NKH en majeure partie durant l'âge du Bronze, ce qui ne correspond plus à la période d'activité principale des sites de production du Complexe de Vialbouly, daté principalement de l'âge du Fer. Vilabouly pourrait être actif

dès l'âge du Bronze puisque les datations sur les puits de mine placent l'activité minière durant cette période également, ce qui rend alors pertinente cette comparaison.

Pour NPW on a pu voir que le procédé métallurgique prenait part dans des creusets, potentiellement associés à une fosse. À NKH, les creusets prennent toujours part au procédé, mais ils possèdent des caractéristiques différentes qui les rendent très friables, bien que le type de pâte soit de même composition. Dans les deux cas, un procédé utilisant un mélange de minerais d'oxydes et de sulfures a pu être identifié avec une augmentation des minerais sulfurés à NKH et une meilleure maîtrise de la charge/conditions (Pryce et al, 2010 ; Pryce, 2008 ; Pigott, 2019). La production de KWPV semble particulièrement orientée vers la production de lingots non alliés, comme en atteste la découverte de nombreux moules. De plus, l'analyse des creusets n'a pas révélé la présence d'éléments d'alliages, hormis des traces d'étain dans les scories de NKH (Pryce et al, 2010).

On observe donc différentes similitudes entre les productions de KWPV et Vilabouly (Tableau 43) avec une production utilisant une charge composée d'un mélange de minerais (moins marquée à Vilabouly), l'utilisation des creusets pour l'opération métallurgique ainsi que la production majoritaire de lingots. Autre similitude intéressante, on identifie également la présence de tombes, étroitement liées à l'aire de production, sans distinction spatiale à NKH et Vilabouly. La présence de ces tombes semble signifier dans les deux cas l'association des métallurgistes à la zone de production. En revanche, des différences importantes existent entre les deux sites en termes de quantité de matériel découvert. En effet, KWPV a livré plusieurs tonnes en un sondage, alors que pour Vilabouly seulement 142 kg ont été répertoriés pour la quasi-totalité du matériel archéologique. Cette différence pose alors la question de l'ampleur et de l'intensité de la production de Vilabouly par rapport à celle de KWPV. Les fouilles de sauvetages de Vilabouly n'ont peut-être pas encore permis la découverte du/des site(s) de production principale. Il est également possible qu'il soit détruit par l'activité moderne. Les scories issues de cette production pourraient également avoir été réutilisées, ce qui expliquerait alors la faible quantité de scories disponible. Une autre hypothèse serait qu'une partie des minerais extraits de Vilabouly aient été acheminés vers d'autres lieux, peut être des sites de peuplement, pour être transformés. Cette tendance a déjà été observée pour les débuts de la métallurgie dans le monde méditerranéen où très peu de déchets de transformations étaient découverts à proximité immédiate des mines (A. Hauptmann, H. G. Bachmann, et R. Maddin, 1996; A. Hauptmann, 2007). Les minerais ont tendance à être réduits où le combustible est disponible, mais cela n'est pas le cas pour Vilabouly où le combustible ne manque pas. L'usage de minerais riches, comme cela semble être le cas à Vilabouly avec l'utilisation de malachite, pourrait également expliquer pourquoi si peu de scories ont été découvertes. En effet, les procédés de KWPV semblent employés des

minerais moins riches menant à une production de scories supérieure. Cette dernière hypothèse semble pouvoir expliquer une partie des différences de matériels observées.

La première correspondance entre les productions de Vilabouly et de KWPV se retrouve dans le type de charge employée, avec un mélange de minerais. Les différences observées dans les scories de NPW (hétérogène) et NKH (homogène) amènent également Pryce (2008) à proposer que le mélange de minerais soit non intentionnel à NPW (« *serendipitous* ») et intentionnel à NKH. En effet, l'homogénéité des scories de NKH semble montrer une maîtrise de la charge de réduction, et dénoterait donc une maîtrise et une connaissance des anciens métallurgistes des minerais employés. Les mêmes questions pour Vilabouly ont été posées au Chapitre VII et la production de Vilabouly semble davantage se rapprocher d'une utilisation involontaire des minerais sulfurés, car la production serait en grande majorité destinée à l'utilisation de malachite. En effet, le mélange de minerais ne semble pas systématique à Vilabouly, mais dépendant des minéralisations exploitées. Les différences observées entre les deux mélanges de minerais de KWPV et Vilabouly tiennent alors dans la nature des dépôts de cuivre disponibles pour les deux sites, qui ne contiennent pas les mêmes ressources.

La structure de chauffe de NKH pourrait inclure une fosse de 20 cm de diamètre associée à un creuset. Contrairement à NPW, la production de NKH montre une augmentation dans la maîtrise du procédé et de la main-d'œuvre, menant à des sous-produits majoritairement homogènes. En effet, nous avons vu pour Vilabouly que l'étude des scories montre une production homogène, résultant de condition/charge maîtrisée. En revanche, si on compare les scories de NKH à celles de Vilabouly, l'homogénéité semble même supérieure à Vilabouly avec une majorité de scories plates et très peu d'inclusions de minéraux résiduels non fondus. Les scories plates sont absentes à NKH et les scories possèdent des inclusions de minéraux résiduels en taux supérieur par rapport à Vilabouly. En revanche, en termes de production ancienne cela ne signifie pas que le procédé de KWPV était moins efficace, mais qu'il suffisant pour le résultat souhaité par les anciens métallurgistes en fonction des ressources dont ils disposaient. Ces différences pourraient également résulter des minerais disponibles. En effet, pour KWPV le taux de minerais sulfurés dans la charge semble plus élevé que pour Vilabouly qui utiliserait majoritairement la malachite, plus simple à réduire. La nature des minerais employés explique les différences observées entre les scories. Vilabouly est un procédé menant à une faible production de scories alors que KWPV possède certainement une charge moins riche menant à une plus forte proportion de scories produites.

Un type de sous-produits trouve un écho tout particulier entre Vilabouly et NKH (Figure 202), il s'agit des *slag cast*, du nom donné par Vincent Pigott (V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997). En effet, les *slag cast* sont décrites comme des scories ayant solidifié dans

un moule et peuvent donc être perçues comme le produit direct de la réduction (Pryce et al, 2010 ; Pryce, 2008, p.190). Des moules de différentes dimensions ont également été découverts avec un diamètre à 10 cm pour les plus grands, principalement à NPW. Ces moules serviraient à la coulée directe du cuivre métallique en fusion depuis les creusets. La présence de *slag cast* résulterait de l'impossibilité de retirer la totalité des scories avant la coulée dans les moules (Pigott et al, 1986). Des fragments de céramiques avec des scories adhérentes ont également été interprétés par Vincent Pigott comme « *slag scrapers* », potentiellement utilisés par les anciens métallurgistes durant la coulée pour retenir les scories flottant en surface. Ce type de sous-produit se rapproche des lingots multicouches de Vilabouly : cuivre, matte et scorie, perçus également comme directement issus de la réduction. Bien que les exemples de Vilabouly ne soient pas seulement constitués de scorie, une similitude dans leur procédé d'obtention semble présente.

Les exemples complets de *slag cast* de NKH donnent des dimensions de 5 à 6 cm de diamètre et de 50 à 100 g, alors que ceux de Vilabouly ont environ cinq cm de diamètre, pour 30 à 84 g. Contrairement aux exemples de Vilabouly pour lesquels une couche de scorie, de matte et/ou de cuivre est présente alternativement, ceux de NKH sont uniquement composés d'une couche de scorie. Il serait possible que les *slag casts* de NKH aient été retrouvés en contexte archéologique, car ils n'ont pas nécessairement de valeur et sont perçus comme un déchet par les anciens métallurgistes, contrairement aux lingots de cuivre qui eux n'ont pas été retrouvés. Les lingots multicouches avec matte et cuivre métallique semblables à ceux mis au jour à Vilabouly auraient donc pu être produits également à NKH, mais ces derniers possédant une valeur, ont été réutilisés ou exportés et ne se retrouvent pas dans les dépôts archéologiques. On peut alors se demander pourquoi les anciens métallurgistes de Vilabouly ont abandonné les lingots avec la matte et le cuivre métallique sur le site, et pas ceux de NKH. La réponse se trouve dans le contexte. En effet, la majorité des lingots multicouches de Vilabouly a été mise au jour associé à des contextes funéraires (Unité C15, voir Chapitre II), avec quelques exceptions. Dans ce contexte, les lingots multicouches de Vilabouly ne peuvent pas être seulement perçus comme des rejets/déchets par les anciens métallurgistes, mais au contraire, comme des biens auxquels on attribue une valeur, si bien qu'on les place avec les morts. Les lingots avec la matte et les scories pourraient également être d'une qualité inférieure, par rapport aux lingots en cuivre qui, eux, seraient exportés. À NKH, les lingots en fines plaques cordiformes se retrouvent également dans les tombes.

L'étude des deux types de scories de NKH, les scories *cakes* et les *slag cast* (Pryce et al, 2010 ; Pryce, 2008) n'a révélé aucune variation majeure de composition ou de microstructure, signifiant que ces deux scories appartiendraient au même procédé. Les auteurs proposent que les *slag cast* puissent être issus de la réutilisation des scories *cakes*. Tout comme pour

Vilabouly, aucun signe ne semble jusqu'à présent montrer la présence d'un procédé de réduction en plusieurs étapes. Bien que quelques différences subsistent entre les *slag cast* de NKH et ceux de Vilabouly, un procédé proche devait être actif pour les deux sites, suggérant des technologies partageant certains traits communs.



Figure 202 : À gauche, les slag casts de NKH (courtoisie d'Oliver Pryce). À droite, les lingots multicouches de Vilabouly.

KWPV et Vilabouly pourraient également avoir une production secondaire. En effet, les signes d'une production secondaire à Vilabouly se basent pour l'instant sur la découverte d'objets alliés à l'étain dont certains possèdent une signature isotopique concordante. Il faut tout de même mentionner qu'aucune preuve archéologique, type moule ou creuset avec des résidus d'étain, ne vient pour l'instant confirmer la production secondaire d'objets alliés à Vilabouly. En l'absence de preuves contraires, si on reste sur l'hypothèse que Vilabouly est bien une production secondaire, le site semble posséder des traces de la totalité de la chaine opératoire de production du cuivre, de l'extraction des minerais, en passant par la réduction et la réalisation d'objets semi-finis et finis alliés.

Pour KWPV, certaines découvertes pourraient montrer la présence d'une métallurgie secondaire, mais elles sont très minces, reposant seulement sur des traces d'étain identifiées dans certaines scories de NKH (Pryce et al, 2010, p. 255), ainsi que la découverte d'objets en bronze dans certaines tombes. Les analyses isotopiques du plomb des artéfacts à base de cuivre de KWPV confirment que les objets en cuivre non allié cordiforme de NKH (NKH/11,12 et 13) ont la signature isotopique de KWPV. En revanche, les résultats pour un objet allié de l'âge du Bronze semblent démontrer une origine externe à la vallée (NPW/11 ; Pryce et al, 2014 ; 2011), donc le potentiel import d'objet et/ou de matières premières.

Les deux productions partagent des traits communs (mélange de minerais, creusets, production de lingots). La reconstitution technologique proposée pour le Complexe de

Vilabouly ne semble pas comporter d'évolution technique majeure. En particulier, on ne distingue pas la présence d'une période d'expérimentation avec un procédé moins efficace, si on la compare au second site de production connu qu'est KWPV (NPW et NKH). En effet, le corpus étudié de Vilabouly a une nature homogène, sans changements sur la séquence archéologique étudiée. Seule la forme des lingots nœud papillon semble pour l'instant représenter une spécificité locale, tout comme les fines plaques cordiformes en cuivre de NKH en représentent une pour KWPV. Le procédé de Vilabouly semble également utiliser des minerais plus riches menant à une plus faible production de scories. Des différences entre Puen Baolo et Thong Na Nguak, les deux zones de productions de Vilabouly sont en revanche attestées, mais elles sont pour l'instant davantage reliées à des différences de matières premières, notamment la composition de la charge, qu'à des différences temporelles comme NPW et NKH.

La métallurgie du cuivre primaire en Asie du Sud-Est continentale à la fin de préhistoire semble avoir connu des évolutions communes qu'on perçoit entre les deux sites de KWPV et Vilabouly. Les techniques de production demeurent simples et on peut les retrouver pour d'autres exemples des débuts de la métallurgie du cuivre pour d'autres parties du monde, notamment pour l'utilisation de creusets (A. Hauptmann, T. Rehren, et S. Schmitt-Strecker, 2003; F. Nocete et al., 2008; E. Hanning, R. Gauß, et G. Goldenberg, 2010; N. L. Erb-Satullo, B. J. J. Gilmour, et N. Khakhutaishvili, 2015; T. Rehren, P. Leshtakov, et P. Penkova, 2016). Les différentes communautés pratiquant la métallurgie en Asie du Sud-Est pourraient avoir évoluées vers les mêmes solutions techniques, avec des variantes locales, liées à chaque contexte et aux ressources. L'identification d'un procédé de réduction utilisant un mélange de minerais pour les deux sites de productions primaires connus actuellement en Asie du Sud-Est permet également de compléter nos connaissances sur les productions de cuivre de la fin de la préhistoire dans la région. L'utilisation d'un mélange de minerais pour les deux sites pourrait signifier que les productions complexes et multi-étape avec des minerais sulfurés primaires, comme la chalcopyrite, n'existaient pas encore à cette période. Cette hypothèse sera peut-être confirmée par de prochaines découvertes archéologiques.

La situation géographie de Phu Lon dans une zone montagneuse éloignée des côtes en fait également un parallèle intéressant pour Vilabouly, mais les données disponibles ne sont pas suffisantes pour effectuer une comparaison. La comparaison technique avec le troisième site de production primaire identifié en Asie du Sud-Est, Phu Lon, ne va pas être développée, car contrairement à Vilabouly et KWPV, les données archéologiques pour la réduction locale de cuivre à Phu Lon sont minces (seulement trois scories analysées) et ne permettent pas de comparaison directe en termes de production primaire. Phu Lon semble tout de même utiliser des creusets comme vaisselles de réactions comme cela est le cas pour Vilabouly et KWPV. De

plus, Phu Lon semble avoir été principalement exploité pour la malachite avec un large volume (Pigott et Weisgerber, 1998), tout comme Vilabouly. Les résultats principaux pour Phu Lon attestent également de la présence d'une production secondaire, avec la mise en évidence d'étain dans les creusets.

	Non Pa Wai	**Nil Kham Haeng**	**Puen Baolo**	**Thong Na Nguak**
Datation	2000 BC (Néolithique, pas d'activité métallurgique) âge du Bronze	Fin de l'âge du Bronze Début de l'âge du Fer	IV-II^{lèmes} siècles av. J.-C (TKSC :1071-922 BC)	IV-Ier siècle av. J.-C
Procédé	co-smelting non intentionnel	co-smelting intentionnel	Malachite (+ sulfures non intentionnels)	Malachite?
Zones minières	Non, mais zones proches	Non, mais zones proches	Oui (puits de mine)	Khanong A2 à 300 m (puits de mine)
Minerais	Chalcopyrite, malachite +magnétite	Chalcopyrite, malachite +magnétite	Malachite + minerais sulfurés (chalcocite + chalcopyrite [inclusions?], pyrite	Malachite(+ ?)
Scorie	*Slag cakes* (<15 cm de diamètre)	• *Slag cakes*(7-10 cm) • *Slag cast (*5-6 cm*)* • *Slag skins*	• Plate • Massive • *Slag cast* (5 cm) • Grossière	• Plate (2) • Grossière • Coulée
Matte (macro)	Non	Non	Oui	Non
Efficacité	CuO scorie en moyenne =3,1 %mass.	CuO scorie en moyenne = 2 %mass.	CuO scorie en moyenne = 2 %mass.	CuO scorie en moyenne = 2,9 %mass.
Creuset	Oui (<20 cm diamètre)	Oui (diamètre ?)	Oui (<15 cm diamètre)	Oui (diamètre ?)
Structure de chauffe	Non	Fosses	Fosses	Fosses ?
Lingot	Oui	Oui	Oui	Oui

Objet fini	Oui	Oui	Oui	Non
Réduction	Oui	Oui	Oui	Oui
Métallurgie de transformation	Aucun signe	Faible. Traces d'étain (scorie)	Affinage ? Alliage ? (aucun signe, sauf isotopie)	Aucun signe
Moule	Plusieurs centaines	Plusieurs centaines	Deux potentiels fragments	Non
Contexte funéraire	Pas dans les niveaux liés à l'activité métallurgique	Tombes en fosse	Tombes en fosse	Urne
Habitat	Poterie domestique, restes de faunes	Poterie domestique, restes de faune	Poterie domestique	Poterie domestique

Tableau 43 : Tableau comparatif des données de la vallée de Khao Wong Prachan (Non Pa Wai et Nil Kham Haeng) et de celles du Complexe de Vilabouly (Puen Baolo et Thong Na Nguak).

VIII.1.2. Les lingots : objet d'export et reflet d'une production primaire

À présent, nous allons aborder un autre type d'objets dont la présence est récurrente pour les deux sites de productions primaires : les lingots. En effet, nous l'avons déjà mentionné, les deux sites de KWPV et Vilabouly ont tous deux montré la production majoritaire de lingots en cuivre non allié. En revanche, leur typologie est différente. Pour KWPV, NPW possède un large corpus de moules pour lingot conique de différentes dimensions alors que pour NKH une autre forme se distingue, il s'agit de fines plaques cordiformes (Pigott et al, 1997 ; Pryce et al, 2011), dont les dimensions et masses sont très variables. À Vilabouly, on identifie majoritairement des lingots coniques (multicouches) et des lingots dits nœud papillon. Ces deux formes de lingots pourraient représenter deux périodes temporelles différentes à Vilabouly, respectivement âge du Bronze et âge du Fer (voir Chapitre II). Les lingots coniques et nœuds papillon reflètent une homogénéité de forme, mais leurs masses sont plus variables, suggérant que l'homogénéité pour les masses n'était pas nécessairement recherchée par les anciens producteurs et consommateurs. Le type de lingot nœud papillon ne trouve pas encore de comparaison en Asie du Sud-Est protohistorique, mais il peut tout de même se rapprocher d'un exemple beaucoup plus tardif, sous la période angkorienne (IX-XV siècles ap. J.-C) d'une forme pour les crampons en fer utilisés dans la maçonnerie des temples (S. Leroy et al., 2017). Bien qu'ici nous nous trouvions dans deux contextes techniques et temporels différents, cette correspondance pourrait indiquer une certaine préférence régionale pour cette forme, surtout que les lingots en fer ont été beaucoup plus tard, au XIXème siècle, utilisés comme devise au Cambodge (D. Harmand, 1876). La forme conique/plan-convexe de certains lingots

se retrouve quant à elle plus largement, à KWPV ou pour le site de Non Nong Hor (Nord-Est de la Thaïlande).

Les résultats isotopiques du plomb semblent montrer que les productions de Vilabouly étaient distribuées en Asie du Sud-Est à la fin de la préhistoire comme nous le verrons par la suite. Les lingots pourraient donc représenter un reflet direct de ces échanges/interactions. En effet, en leur qualité de demi-produits, ils sont destinés à être réemployés pour façonner des objets finis. Bien qu'aucune preuve archéologique ne vienne le confirmer, ces lingots pourraient avoir servi pour l'export. Ils pourraient également représenter une certaine forme de proto-monnaie (Pryce, 2008), comme moyen d'échanges.

Pour KWPV, particulièrement pour NKH, les fines plaques cordiformes en cuivre semblent avoir été le type majoritaire d'objets produits durant l'activité du site. Ces fines plaques cordiformes suggèrent également une certaine forme de production homogénéisée avec des dimensions et masses également variables. Vincent Pigott a proposé que ce type de produit puisse représenter une forme de lingot (V. C. Pigott, A. D. Weiss, et S. Natapintu, 1997; F. Rispoli, R. Ciarla, et V. C. Pigott, 2013). Pour T.O Pryce, ils pourraient être un moyen d'échanges ou même un type de monnaie (Pryce, 2008, p. 209). Cependant, la forme ne trouve aucun écho pour d'autres sites archéologiques à cette époque.

En suivant ce raisonnement, au Myanmar, des fouilles récentes ont également mis au jour un type de produit particulier, se présentant sous forme de filaments agglomérés composés de cuivre non allié (J. P. Pautreau, A.-S. Coupey, et A. A. Kyaw, 2010; L. Dussubieux et T. O. Pryce, 2016). Ces agglomérats de filaments se retrouvent en contexte funéraire, placés dans la main des défunts, adultes ou enfants, attestant donc de leur symbolique. Cette production particulière pourrait trouver un écho dans les deux précédents exemples. De plus, un autre site de production primaire de cuivre régionale est fortement supposé grâce à une signature isotopique bien définie, potentiellement au Myanmar, bien que le lieu ne soit pas encore connu (T. O. Pryce et al., 2018).

La forme particulière des lingots nœuds papillon de Vilabouly ou des fines plaques de NKH pourrait également être une forme caractéristique et reconnaissable pour ceux qui en font l'acquisition (une certaine forme de marque). Voilà pourquoi, la répétitivité de cette forme serait importante et pas nécessairement sa masse. En Europe, pour la production du fer durant l'époque médiévale, nous avons des exemples de demi-produits avec des caractéristiques particulières, notamment de forme, qui avait pour but une reconnaissance plus aisée de la part du consommateur, car elle pouvait être gage de sa qualité (C. Verna, 2009). Elle pouvait être représentative du lieu de production. Pour une période plus proche de notre chronologie d'étude, cela a également pu être observé pour l'Antiquité et des demi-

produits en fer des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (fin du Ier siècle av. J.-C-Ier siècle ap. J.-C) qui pouvaient être liés à des qualités de métal différentes (G. Pagès et al., 2008). Pour l'Asie du Sud-Est, la quantité de données disponibles est encore loin de celle de l'Europe. Ces hypothèses sur les corrélations entre formes/qualité/origine du métal se rapportent uniquement à des observations sur la forme. Nous ne pouvons pas encore regarder si des liens existent entre la forme, la qualité ainsi que le lieu de production, ni en quoi cela peut avoir un impact sur la consommation mais ces hypothèses constituent une intéressante piste à suivre.

Ces formes de lingots standards, associées à des zones géographiques différentes pourraient représenter des spécificités régionales liées à des entités de productions variées. Pour aller encore plus loin, elles pourraient également être rattachées à des entités politiques ou sociales différentes, imposant certains types de production. Aucune donnée ne vient le confirmer. La production majoritaire de lingots pour les deux sites de production primaires de Vilabouly et KWPV pourrait être un reflet direct de l'intensification de l'utilisation du cuivre/bronze en Asie du Sud-Est à la fin de l'âge du Bronze, et à l'âge du Fer ainsi que du développement de l'organisation des sites de production et des réseaux.

La production secondaire d'objets finis alliés à l'étain à Vilabouly a été suggérée par les résultats isotopiques (M. Cadet et al., 2019), mais elle n'a pas pu être clairement démontrée en l'absence de moules ou de traces d'étain dans les creusets. Si on prend maintenant l'hypothèse inverse, c'est-à-dire, une production externe d'objets alliés au site de Vilabouly, mais produits avec du cuivre de Vilabouly. Alors les sites de KWPV et Vilabouly apparaîtraient tous deux orientés vers un type de production spécifique, celle du cuivre non allié sous forme d'un type d'objet « standard ». Mis à part les *ge* et les tambours, qui sont à priori des objets plus ornementaux, les autres types d'objets de Vilabouly sont des objets majoritairement utilitaires (haches, pointes de lance, burin, herminette) qui pourraient avoir une utilisation majoritairement locale. C'est également le cas pour KWPV. Excepté les lingots en leur qualité de demi-produit, la nature des objets de Vilabouly et KWPV ne semble pas révéler la présence d'un artisanat spécialisé pour un type spécifique d'objets finis mais vers la production de cuivre non allié et de lingots.

VIII.1.3. Les creusets : vaisselle de réaction privilégiée à la fin de la préhistoire

Le chapitre I a permis de montrer que les débuts de la métallurgie, particulièrement en Thaïlande pour laquelle nous avons un plus grand ensemble de données, semblent se caractériser par l'utilisation de vaisselles portables, de creusets. Les creusets étaient utilisés pour la réalisation des opérations métallurgiques, sans la mise en place d'une structure fixe complexe, type four. Les creusets d'Asie du Sud-Est découvert sont de petites dimensions, associés parfois à un bec de coulée. Ces creusets sont principalement identifiés pour les sites

de : Ban Chiang, Ban Tong, Ban Phak Top, et Don Klang (W. W. Vernon, 1997; W. W. Vernon, J. C. White, et E. G. Hamilton, 2018), Ban Na Di (C. F. Higham et A. Kijngam, 1984, p.130), Non Nok Tha (D. Bayard et W. G. Solheim II, 2009), et Ban Non Wat (C. F. Higham, 2008) ainsi que les sites miniers de Phu Lon (S. Natapintu, 1988, p.122; W. W. Vernon, 1996) et KWPV (Pryce, 2008 ;Pryce et al, 2010 ;Pigott, 2019). Un autre site du plateau du Khorat a également livré un vaste corpus de creusets complets non étudiés, dont certains, avec un fond plat. Il s'agit du site de Non Nong Hor que nous avons présenté. Higham (1984), évoque que des creusets de factures similaires se retrouvent également dans des contextes du nord au sud du Vietnam et au centre du Cambodge, mais nous n'avons pas eu accès à des images ou des données métriques. Des creusets avec un bec de coulée ont été découverts à *Samrong Sen* au Cambodge et un plus haut (16 cm de hauteur) dans un contexte de la culture de *Dong son* à *Lang Ca* (R. Murowchick, 1988 b; a). Des fragments de creusets ont également été découverts pour le site de Oakaie 3 au Myanmar.

Face aux différences entre les creusets qualifiés de « *Common Southeast Asian crucibles »* (J. C. White et E. G. Hamilton, 2009) et ceux de KWPV (voir Chapitre 1), une hypothèse proposée par Pryce (2014) serait que la forme/taille des creusets était adaptée à leur utilisation/fonction. On aurait alors une différence de typologie entre les creusets utilisés pour une activité de production primaire de cuivre (KWPV), qui seraient de plus larges dimensions, et les creusets utilisaient pour une production secondaire affinage/fonderie/alliage (Ban Chiang, Don Klang, Ban Non Wat, etc.) de plus petites dimensions avec un bec de coulée. De plus, aucun creuset complet n'a été mis au jour pour le site minier de Phu Lon (Pryce et al, 2011). Il était alors difficile de vérifier cette hypothèse, jusqu'à présent.

Le Complexe de Vilabouly a livré la présence de deux types de creusets complets (voir chapitre V et VI) un creuset de 15 cm de diamètre sans bec de coulée et des creusets de dix cm de diamètre avec un bec de coulée. Les deux types de creusets ont des fonds convexes, tout comme les fragments mis au jour. Les creusets complets n'ont pas pu être analysés, mais leur présence pourrait rejoindre l'hypothèse de Pryce puisqu'une activité de production primaire et secondaire aurait été pratiquée à Vilabouly. Les résultats d'analyses des résidus scoriacés internes dénotent des variations de charge notamment pour les oxydes de fer. Cette variation a été reliée à des fluctuations dans la charge d'origine durant la réduction, mais on ne peut pas exclure qu'une partie des creusets ait pu être employée pour une étape d'affinage, car une partie des scories internes comportent des composés oxydés. Il serait intéressant de voir si la fonction peut être directement reliée à la forme, mais l'état fragmentaire des échantillons ne permet pas de le dire. En effet, il n'a pas été possible d'associer les fragments à un type de creuset. Un même type de creuset pourrait servir pour plusieurs activités.

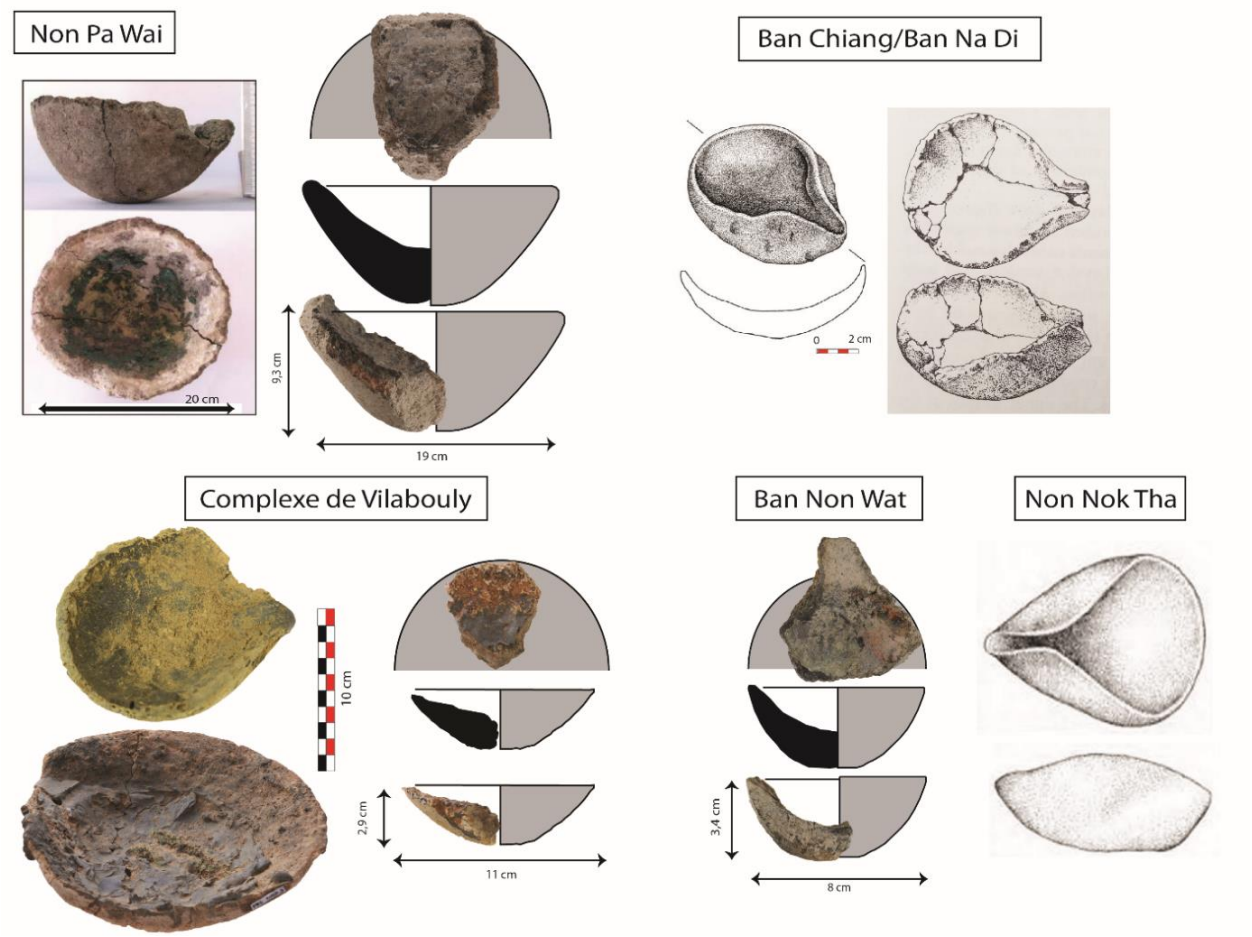


Figure 203 : différents exemples de creusets découverts en Asie du Sud-Est, en haut, de gauche à droite : creuset entier de Non Pa Waï (image Vincent Pigott, Pryce, 2008, p.121) et fragment de paroi de creuset de Non Pa Wai ; creuset entier de Ban Chiang (image Pigott et White, 1996, p.156) et dessin d'un creuset entier de Ban Na Di (Higham,1988). En bas, de gauche à droite : deux creusets entiers et un fragment de creuset D13/2/1/3706/b du Complexe de Vilabouly, un fragment de paroi de creuset de Ban Non Wat (image : auteur) et dessin d'un creuset de Non Nok Tha (image : Bayard et Solheim, 2009, p. 260). Pour précision, les creusets de Non Pa Wai ne sont pas représentés à l'échelle par rapport aux creusets des autres sites.

Les preuves archéologiques en Thaïlande suggèrent donc que les creusets étaient utilisés pour différentes étapes du procédé métallurgique en fonction des sites incluant la réduction, l'affinage, l'alliage ou la fonderie. Les creusets étaient probablement associés à un foyer en fosse comme les exemples mis au jour à Ban Na Di (C. F. Higham, 1988) ou Ban Non Wat. Malgré l'existence de traits communs aux creusets découverts en Thaïlande, l'étude des creusets du plateau du Khorat pour des sites proches géographiquement, comme Ban Chiang ou Don Klang, situés à seulement 7 km, a également permis de mettre en évidence des différences dans les techniques de fabrication (W. W. Vernon, J. C. White, et E. G. Hamilton, 2018, p.122). Bien que les creusets du nord de la Thaïlande partagent des caractéristiques communes dans la morphologie, il semblerait que des variations techniques régionales dans les dimensions et la composition soient également présentes même à l'échelle de microrégions (J. C. White et E. G. Hamilton, 2019, p.133), reflétant ainsi des adaptions/innovations locales par les artisans en fonction des sites. Cette observation pourrait

alors rejoindre l'hypothèse d'une évolution conjointe de la métallurgie pour différentes régions d'Asie du Sud-Est et le partage d'une même sphère technique à la fin de la préhistoire, avec des variantes en fonction des besoins, mais également des artisans et/ou des matières premières disponibles, ainsi que de leurs influences.

La forme des creusets de Vilabouly se rapproche donc du corpus des sites de métallurgie en Thaïlande (Figure 203) associé à des variations locales, mais elle représente également une forme basique, qu'on retrouve également pour d'autres parties du monde (voir Chapitre I). Leur forme ouverte et peu profonde avec un fond convexe trouve des correspondances pour d'autres sites avec tout de même quelques différences. Les dimensions des creusets de Vilabouly ont été estimées entre 50 et 150 mm de diamètre et une profondeur moyenne de 40 mm (voir Chapitre V). Pour KWPV, un seul exemple de creuset complet a été découvert, à NPW avec un diamètre de 200 mm et des épaisseurs de pâtes de 60 mm à la base et de 10 mm à la lèvre (Pryce, 2008, p. 119), donc un peu plus large que les plus grands exemples de Vilabouly. La forme/dimensions des creusets de NKH étaient difficiles à appréhender, car ils sont composés d'un matériau trop friable. Pour les deux sites, les creusets ont une forme ouverte et montrent les signes d'une chauffe apicale avec la présence d'un gradient thermique et d'une couche interne de scories. Les creusets de NPW ne semblent pas posséder de bec de coulée or il semblerait que certains creusets de Vilabouly en possèdent un (Figure 203).

En termes de composition, tous ces exemples de creusets ont été fabriqués à partir d'argile avec quelques adaptations/améliorations en vue des opérations pyrométalurgiques comme l'ajout d'un agent isolant dans la partie interne, identifié pour les creusets des sites de la culture de Ban Chiang, Phu Lon et Ban Non Wat, ou encore l'ajout d'un dégraissant organique, commun à de nombreux sites. Pour la quasi-totalité des creusets de Vilabouly, la présence de balle de riz a également pu être observée, ajoutée volontairement comme dégraissant. L'ajout de la balle de riz sert un but mécanique, car elle permet d'offrir une meilleure résistance à la chauffe de la céramique, mais on peut également l'aborder sous un angle socio-culturel. En effet, la balle de riz est très fréquemment rencontrée dans les pâtes céramiques en Asie du Sud-Est pour la protohistoire, aussi bien pour des céramiques domestiques (B. Vincent, 2003; R. Tomber, C. Cartwright, et S. Gupta, 2011; L. Carratoni, C. Meucci, et F. Rispoli, 2018) que pour des céramiques techniques, comme c'est le cas à Ban Chiang ou Phu Lon (P. E. McGovern, W. W. Vernon, et J. C. White, 1985; J. C. White et E. G. Hamilton, 2018 b). En ce sens, l'ajout de balle de riz peut apparaître comme non spécifique à la métallurgie, mais appartenant à une tradition céramique plus large en Asie du Sud-Est. L'ajout de balle de riz ne serait donc pas inhérent à la pratique métallurgique. En revanche, l'ajout d'un agent isolant dans la partie interne n'a pas été observé pour les creusets de Vilabouly et pour certains, on observe également l'ajout d'un dégraissant minéral (quartz).

La poterie domestique découverte à Vilabouly est également étudiée (E. Watroba, 2012) en faisant actuellement l'objet d'une thèse à l'Université James Cook par Katherine Cameron. L'étude de Watroba incluait seulement trois fragments qui ont révélé la présence de trois dégraissants : de la balle de riz pour un fragment, de la chamotte pour un autre fragment ainsi que du quartz pour les trois fragments (Figure 204). La composition de la pâte céramique des poteries domestiques apparaît similaire à celle des creusets avec une argile non calcaire, riche en silice et en alumine. L'étude de K. Cameron sur un corpus plus large confirme les observations de E. Watroba avec trois dégraissants : la balle de riz, la chamotte et du quartz (K. Cameron, *pers. com.*). Les creusets et la céramique domestique de Vilabouly partagent certaines caractéristiques, mais également des différences qui proviennent certainement d'une adaptation à la destination de la céramique. L'étude de Cameron, toujours en cours, permettra d'obtenir une idée plus précise des types de traditions céramiques présentes à Vilabouly, ainsi qu'une comparaison plus fine avec les creusets.

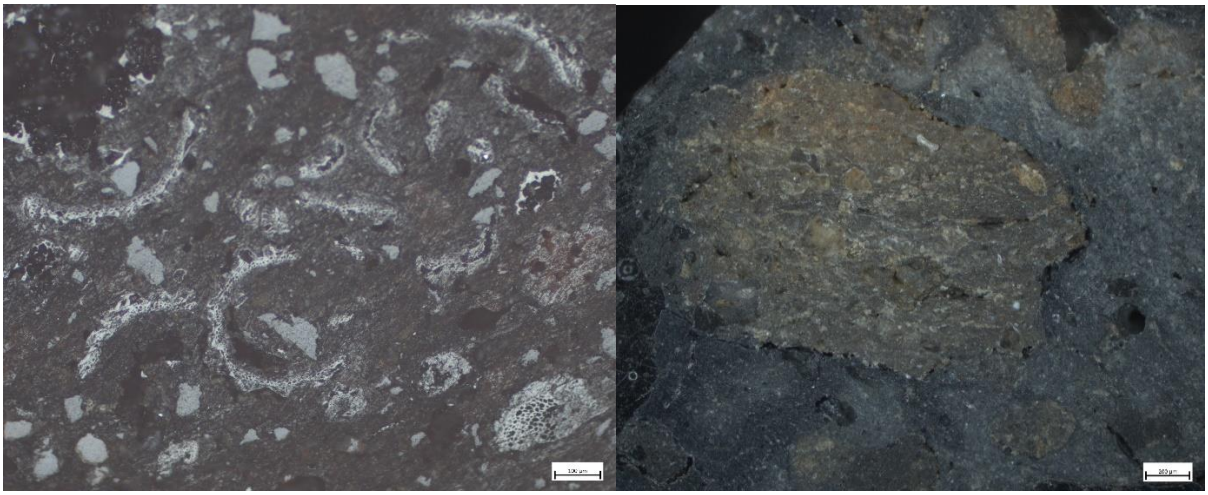


Figure 204 : Exemples de micrographie pour les poteries domestiques de Puen Baolo. À gauche, une céramique contenant de la balle de riz et à droite une céramique avec de la chamotte.

Si on met de côté l'exemple de KWPV et de Phu Lon, tous les autres sites où des creusets ont été découverts en Asie du Sud-Est sont des creusets employés lors d'activités de production secondaire du cuivre pour la réalisation d'alliages, à l'étain et au plomb. Les sites de ces activités de production secondaire sont également des lieux d'habitat puisque des structures, des zones funéraires ainsi que d'autres types d'artisanats (ex : poterie, métallurgie du fer) ont également été identifiés.

Les exemples de Vilabouly et KWPV sont donc différents par leur statut de production primaire, par leur étendue et leur intensité, plus élevées que dans le cas des sites de productions secondaires pratiquées pour la plupart à l'échelle de sites d'habitats. Les découvertes archéologiques de Vilabouly, comme celles de KWPV, définissent un site majoritairement orienté vers la production de cuivre qui est leur but premier. Les sites de

production secondaires sont orientés vers la réalisation d'alliages et la fonte d'objets finis, attestés par la forte présence des moules et de traces d'étain dans les creusets. Cela ne constitue pas leur activité majoritaire, puisque d'autres types d'artisanats sont généralement pratiqués, comme la poterie ou la métallurgie du fer. Malgré cette différence, il est tout de même intéressant de noter le trait commun que partagent tous ces sites au travers de l'étude des creusets qui semblent avoir été employés en Asie du Sud-Est durant la protohistoire pour réaliser diverses opérations métallurgiques, de la réduction à la fonderie en passant par la réalisation d'alliage et l'affinage.

VIII.1.4. Artisans et organisation de la production

1. Organisation de la production en Asie du Sud-Est continentale

Les caractéristiques de la production de Vilabouly d'un point de vue technique (matières premières, formes et dimensions des productions, procédé(s) de production, étapes de productions, etc.) et leurs comparaisons aux autres sites (partie VIII.1) vont permettre maintenant de tenter une corrélation de ces données aux artisans/communautés à l'origine de cette production, ainsi que leur organisation. En effet, plusieurs questions peuvent émerger des données archéologiques : Vilabouly était-il occupé de manière permanente ou saisonnière ? Était-il exploité par un seul ou plusieurs groupes ? Est-il un lieu indépendant ou dépendant ?

En 1996, White et Pigott avaient proposé un premier modèle pour une organisation de la production du cuivre en Asie du Sud-Est continentale à la fin de la préhistoire, principalement basé sur les découvertes alors connues en Thaïlande. Ce modèle concluait que la production du cuivre se pratiquait à l'échelle de communautés de manière saisonnière, non régie par une autorité hiérarchique fixe, ce que Costin (1991, p.8) définit comme : « *autonomous individual or household-based production units, aggregated within a single community producing for unrestricted regional consumption* », et non à des spécialistes rattachés à des échelons sociaux supérieurs produisant pour une élite. Ces communautés spécialisées se seraient développées en l'absence d'une centralisation politique et auraient même perduré à la période historique et l'apparition des états. Ce modèle n'est pas aujourd'hui remis en question par les nouvelles découvertes, mais d'autres données peuvent y être apportées.

Au Laos, hormis Vilabouly aucun autre site de métallurgie du cuivre et très peu de sites de la fin de la préhistoire ne sont connus. Replacer Vilabouly dans sa région immédiate s'avère donc difficile à l'heure actuelle, tout comme appréhender une organisation de sa production. Même si les données sont encore peu nombreuses, la comparaison la plus pertinente dont nous disposons est celle de la Thaïlande qui compte une plus forte concentration de sites ayant fait l'objet d'études depuis près de soixante ans.

En Thaïlande, deux types de production peuvent se différencier : une exploitation et une production intense, pour les sites miniers de KWPV et Phu Lon, contre une production secondaire de petite ampleur pratiquée au sein d'habitats. Pour la vallée de Khao Wong Prachan, T.O Pryce a mis en avant la présence d'une séquence évolutionniste, passant d'une production avec des conditions hétérogènes (NPW) vers une production maîtrisée (NKH) à la fin de l'âge du Bronze et au début de l'âge du Fer. Si on suit les nouvelles datations (Higham et al, 2020), c'est donc potentiellement à la fin de l'âge du Bronze et au début de l'âge du Fer que certains biens importés commencent à faire leur apparition dans les sépultures de KWPV. Ces biens importés dénotent des contacts avec d'autres entités, notamment d'Asie du Sud. Selon T.O Pryce, l'arrivée de ces biens importés s'accompagne d'une intensification dans l'activité minière et dans les productions de cuivre à NKH (Pryce et al, 2010 ; Pryce, 2008). Cette intensification pourrait s'expliquer par une augmentation de la demande régionale en cuivre, directement reliée aux échanges intensifiés durant l'âge du Fer, avec le développement de communautés côtières participant à un complexe réseau d'échange maritime. Avec les nouvelles datations, l'activité de NPW et NKH a été déplacée, et ces différents changements observés par Pryce pourraient donc être antérieurs, puisqu'une partie de l'activité de NKH se place à la fin de l'âge du Bronze.

À KWPV, aucune évidence archéologique d'une organisation en ateliers ou en unités contrôlées rattachée à une élite socio-politique n'a pu être identifiée jusqu'à présent (V. C. Pigott, 2019). Les signes d'un contrôle du site de production par une entité socio-politique peuvent être difficiles à déceler par le biais de l'archéologie. Leur absence sur les sites archéologiques ne signifie par nécessairement que ce contrôle n'était pas présent, d'autant plus que l'écriture n'était pas encore employée. Les premières formes connues proviennent de Khao Sam Kaeo avec la présence de seaux indiens (IV-IIèmes siècles av. J.-C), de quelques formes au Myanmar sous les *Pyu*, et également au nord du Vietnam à la fin du premier millénaire de notre ère. En revanche, ces premières formes d'écritures demeurent minces et aucune source écrite ne nous est parvenue sur ces systèmes de productions et d'organisations anciens. Un certain nombre d'informations sur ces systèmes d'organisations peut être en revanche appréhendé par l'étude des réseaux d'échanges.

La présence de petits groupes indépendants à KWPV serait indiquée par la proche association des habitats et cimetières, et par le manque de différences spatiales entre habitat et production. La technologie semble évoluer avec l'exploitation de minerais moins riches, mais la production peut apparaître relativement simple, avec de petits développements pouvant être interprétés comme de modestes investissements avec l'utilisation principale de creusets, sans structures complexes fixes (Piggot et White, 1996 ; Pryce, 2008). Seule une augmentation dans la quantité de combustible peut être perçue en lien à l'intensification de la production.

Compte tenu de la différence de quantités entre les débris et les objets en métal découverts, une demande extra-régionale devait être présente à KWPV. La production n'était pas seulement orientée vers une demande locale. En se basant sur les travaux de Costin (1991), White et Pigott (1996) mentionnent que les découvertes archéologiques en Thaïlande semblent montrer un modèle où producteurs et consommateurs sont indépendants et appartiennent à des groupes relativement flexibles et vastes : « *served by a production system that minimizes production and transaction cost* » (Costin, 1991, p. 11). Ce modèle pourrait se révéler plus complexe pour le transport. En effet, comme nous le verrons dans la prochaine partie, les données isotopiques du plomb semblent indiquer que les sources de cuivre identifiées pour certains sites ne sont finalement pas les plus évidentes et les plus proches, notamment pour Ban Chiang. D'autres facteurs doivent venir influencer la production et le transport des denrées (T. O. Pryce, D. O'Reilly, et L. Shewan, 2017).

Les caractéristiques décrites pour les sites où des activités métallurgiques primaires et secondaires en Thaïlande sont présentes peuvent également s'appliquer à ce que nous avons pu observer à Vilabouly. En effet, nous ne disposons d'aucune preuve qu'une entité politique et/ou sociale a un contrôle sur la production. Comme nous l'avons mentionné, ces signes sont parfois difficiles à déceler par le biais de l'archéologie, d'autant plus dans un climat humide et pour un site minier actif. De plus, l'activité principale de Vilabouly se situe à l'âge du Fer que nous avons décrit comme une période de spécialisation de l'artisanat, d'un contrôle plus accru de l'agriculture et des ressources par des entités socio-politiques naissantes dans certaines zones d'Asie du Sud-Est. La question du contrôle de cette production et d'une ressource importante comme le cuivre trouve alors tout son sens. Ces différents changements ne s'opèrent pas de la même manière ni à la même époque pour toutes les régions d'Asie du Sud-Est, notamment en fonction de leur situation géographique. Les transformations d'organisation des sites de peuplements proto-urbains et des réseaux d'échanges culminent durant la seconde moitié de l'âge du Fer avec l'apparition de constructions monumentales en briques, de la statuaire ou encore de l'écriture qui préfigurent les premiers états. Étant donné que nous avons peu, voire aucune information sur les communautés implantées au centre du Laos à la fin de la préhistoire, la question du contrôle demeure difficile à résoudre en l'état actuel. Contrairement aux régions voisines, au centre du Vietnam (*Champa*), au centre de la Thaïlande (*Dvaravati*) et au Cambodge actuel (*Chenla*), où les premiers états naissent durant la seconde moitié du premier millénaire ap. J.-C, on sait encore peu de choses sur le développement de la complexification socio-politique au centre du Laos (M. Lorrillard, 2010, 2014). De plus, les datations disponibles pour Vilabouly ne permettent pas d'identifier différentes périodes dans son exploitation.

Vilabouly se présente comme une production utilisant principalement de petits creusets de forme ouverte avec une chauffe interne, aucune structure fixe complexe type four, la présence de tombes étroitement liées à l'air de production, sans distinction spatiale, ainsi que la production majoritaire de lingots et de petits instruments utilitaires. La présence en grande quantité de lingots, ainsi que certains objets avec une typologie marqueuse d'échange, reflèterait l'ouverture du site vers les réseaux d'échanges avec une production destinée en majorité vers l'export. On retrouve donc ici les mêmes caractéristiques que celles décrites pour KWPV, en terme technique et d'organisation spatiale.

Les résultats des analyses isotopiques sur le corpus d'objets de Vilabouly ont montré que certains objets alliés à l'étain ont été produits avec du cuivre de Vilabouly. En première approximation ces objets ont été désignés comme de fabrication locale. Or, en l'absence de preuves pour la réalisation d'alliages ou d'objets finis à Vilabouly, la question de leur lieu de fabrication d'origine peut tout de même se poser. En effet, comme nous l'avons mentionné, mis à part des fragments de moule pour lingot plan-convexe, rien ne semble montrer la fonte locale d'objets, ni d'alliage. On pourrait donc également envisager que ces objets aient été produits sur un autre lieu avec du cuivre de Vilabouly, puis réimportés sous forme d'objets finis.

Si on compare cette observation à KWPV, on remarque qu'un schéma similaire semble présent. KWPV a livré des preuves archéologiques pour la fonte de lingots, mais également d'objets finis comme des haches, alors qu'un objet fini et/ou leur matière première pourrait provenir d'un autre lieu (Pryce et al, 2011). On voit donc ici que malgré une production locale de cuivre, tous les objets finis ne seraient pas nécessairement produits localement. On verrait alors se dessiner une certaine spécialisation des lieux de production, selon des relations d'interdépendance, avec des lieux de production pour la matière première du cuivre, exportée vers d'autres lieux. Certains de ces sites seraient donc spécialisés dans la production d'objets finis, comme les sites du plateau du Khorat, par exemple le site de Ban Non Wat ou les sites de la région de Phu Wiang. White et Pigott (1996, p. 155) mentionnent notamment la spécialisation de la région de Phu Wiang, au nord-ouest du plateau du Khorat. En effet, les sites de la région du Phu Wiang comme Non Nok Tha et Non Pa Kluay ont livré de nombreux exemples pour la fonte d'objets bivalves comme des haches, des moules complets en grès, des moules pour hache ainsi que des creusets. Une des raisons soulevées par les auteurs serait la proximité de la matière première du gré servant à la fabrication des moules.

On pourrait alors distinguer un système interdépendant avec des sites de productions primaires, exportant la matière première du cuivre (sous forme de lingot ?), des sites consommateurs et producteurs d'objets finis et des sites consommateurs. Les sites de

production primaire semblent pouvoir également être ici qualifiés de sites consommateurs. Les analyses isotopiques (Pryce et al, 2011) ont également montré que de la matière première brute (minerais) ou même des sous-produits (scorie) auraient pu circuler entre les différents sites de production primaire de Phu Lon, de Vilabouly et de KWPV. Bien sûr, il faudrait étudier davantage de sites de production de cuivre/bronze afin de pouvoir conforter cette tendance. White et Pigott (1996, p.160) parlent de « *community specialization* » qu'ils font remonter avant la métallurgie du cuivre, où des communautés proches des ressources développent un système d'échanges avec les communautés en demande, plus éloignées des ressources. De ce fait, on peut également se demander quelles étaient les denrées recherchées en échange des objets/lingots/matières premières. Cette question est encore difficile à appréhender compte tenu du manque de données, mais il est intéressant de voir que certaines régions possèdent d'autres denrées essentielles, manquent de cuivre et d'autres éléments d'alliages, comme une partie du Cambodge ou le plateau du Khorat en Thaïlande qui est en revanche une région riche en sel.

Un autre élément intéressant à mentionner, quand on aborde la question de l'organisation de la production, est l'activité parallèle de deux zones de productions distinctes sur un même site d'exploitation. En effet, les nouvelles datations obtenues pour KWPV (Higham et al, 2020) ont montré que NPW et NKH ont partagé une activité parallèle durant une période allant de la fin de la période d'activité de NPW au début de celle de NKH. Cette activité parallèle pose question. En effet, elle pourrait trouver plusieurs origines. La présence de différentes communautés sur le site durant une période parallèle serait une première hypothèse, mais cela ne semble pas être le cas pour KWPV. De plus, les technologies de NPW et NKH indiquent une continuité dans les pratiques avec les mêmes procédés, seulement une maîtrise plus élevée pour NKH. La demande en cuivre extra-régionale expliquerait l'évolution perçue à NKH, mais elle n'explique pas pourquoi le site de NPW a été abandonné et pourquoi l'exploitation du site de NKH a débuté. Ce changement pourrait également être concomitant avec l'exploitation de nouveaux dépôts de minerais et l'abandon de l'ancien (Pryce, *pers.comm*.).

La même situation est observée pour le Complexe de Vilabouly. En effet, les deux sites de production principaux, Puen Baolo et Thong Na Nguak, sont tous deux datés de l'âge du Fer. Tout comme à KWPV, les deux sites auraient donc été en activité parallèle, dans une même zone située à seulement 8 km de distance. En revanche, certaines données nous permettent ici d'argumenter dans le sens de la présence de différentes communautés pour les deux zones de productions et/ou des variations temporelles, non encore mises en évidence. Il existe des différences observées entre les productions de TNN et PBL au Chapitre V, ainsi que la présence de différents types de contextes funéraires pour les deux sites.

2. Les contextes funéraires : marqueurs de communautés différentes ?

Le Complexe de Vilabouly a livré peu de preuves archéologiques à relier directement aux artisans/communautés, mis à part certains contextes funéraires. Bien que les os aient disparu, on a déjà mentionné à PBL la présence de contextes en fosse, identifiés comme des tombes, dans lesquelles ont été retrouvés la majorité des objets en métal, ainsi que des céramiques domestiques et autres types d'objets. Ces tombes ne peuvent pas de manière certaine être attribuées à des artisans, mais enterrer les morts avec des objets en métal ou autre signe de distinction d'un statut d'artisan, comme des moules ou des creusets, est largement observé dans les contextes d'Asie du Sud-Est et au-delà (White et Hamilton, 2009 ; Higham et al, 2011 ; Pigott et Weisberger, 1997 ; Pigott, 2019). De plus, les fouilles de KWPV ont montré qu'une certaine reconnaissance de l'artisan pratiquant la métallurgie était présente, du fait des objets associés dans certaines sépultures.

La présence de tombes en relation directe avec la zone de production pourrait dénoter une proche association des artisans à leur pratique (Tucci et al, 2014). Les tombes de ce type, associées à des présents funéraires en liens à l'activité métallurgique, proviennent d'une tradition reliée aux Steppes Eurasiennes où elles sont nommées *tombes de fondeurs* (« *founders burial* », Chernyck, 1992 ; Pigott et Ciarla, 2007). Ces tombes contiennent donc des objets liés à la pratique métallurgique, souvent des moules bivalves et/ou des creusets, ainsi que des objets en métal. Ce type de tombes se retrouve au centre de la Thaïlande, pour KWPV (Rispoli et al, 2013), au nord de la Thaïlande à Non Nok Tha et Ban Non Wat, mais également en Chine dans la région de Lingnan. Les *tombes de fondeurs* de NPW ont pu être datées de 1200-800 av. J. -C, contemporaines à une tombe particulière de Ban Non Wat datée du XIème siècle av. J. –C (Higham et al., 2020). La capacité à réduire et à couler le métal devait donc représenter une valeur sociale durant cette période en Asie du Sud-Est. De plus, l'activité de réduction et la fonderie peuvent apparaître comme deux activités distinctes nécessitant des compétences particulières. Ces activités pourraient donc être pratiquées par des artisans différents.

Deux autres potentiels types d'inhumations peuvent être mentionnés pour Vilabouly. Le premier est représenté par la découverte de pirogues qu'on pourrait attribuer à des cercueils. Les pirogues ont été découvertes à *Thengkham East* et *Thengkham South D*. À *Thengkham East*, la pirogue était associée à une dizaine de haches en cuivre. Ce type de cercueil associé à un contexte funéraire a également été identifié pour d'autres régions d'Asie du Sud-Est, notamment au nord du Vietnam dans le delta du fleuve Rouge où ils sont fréquemment associés à des biens de type chinois dans les sépultures de la culture de *Dong son* (C. F. Higham, 2002; A. Reinecke, 2018), mais également au nord-ouest et à l'ouest de la Thaïlande,

à Ban Non Wat (C. F. Higham et A. Kijngam, 2012) ou à KWPV (Pryce, 2008). L'attribution de ces pirogues à un contexte funéraire reste encore à être démontrée pour Vilabouly.

Enfin, on peut également mentionner la présence de jarres funéraires, cette fois à TNN et *Khanong A2*. L'urne funéraire de *Khanong A2* a été découverte au fond d'un puits de mine. Elle contenait des cendres accompagnées de fragments d'objets en fer. Cette jarre montre une nouvelle fois ici le lien étroit entre pratique métallurgique et communauté(s). Les jarres funéraires associées à la pratique de la crémation se retrouvent davantage pour des sites au centre du Vietnam, notamment pour les sites attribués à la culture *Sa Huynh*, comme Con Rang (Reinecke, 2018) situé à une centaine de kilomètres de Vilabouly. Les jarres funéraires de TNN se trouvaient dans une jarre plus grande. Ce type d'inhumation en jarre double est également répertorié pour la culture *Sa Huynh*, notamment pour le site de Go Dua (L. T. M. Dzung, 2009).

La présence de tombes en fosse à PBL et de jarres funéraires à TNN/Khanong pourrait ici matérialiser des communautés aux pratiques socioculturelles différentes. Cette observation est bien sûr directement à relier aux variations observées entre les productions de TNN et PBL (voir Chapitres V et VII). Les pratiques funéraires avec des cercueils en forme de pirogue au nord du Vietnam et celles des jarres à crémation au centre du Vietnam, seraient d'époques contemporaines, aux environs des III/IIème siècles av. J.-C (Reinecke, 2018). Avec ces éléments, on pourrait envisager que des communautés socioculturelles différentes aient exploité le cuivre de Vilabouly lors de périodes contemporaines. Avec seulement deux dates radiocarbones pour Puen Baolo et Thong Na Nguak, la période d'activité réelle des deux sites demeure difficile à appréhender. Ces différences de contextes funéraires pourraient également être reliées à des variations temporelles : signifieraient-elles un changement de communautés pour l'exploitation du site au cours du temps ?

3. Lao Lum et Lao Sung : récits ethnographiques du Laos

La question de l'organisation entraîne également celle de « l'intensité », définie par Costin (1991) afin de déterminer si la pratique métallurgique était pratiquée de manière permanente ou saisonnière à Vilabouly. En Asie du Sud-Est, le climat joue également un rôle important : la pratique de la métallurgie n'y échappe pas. En effet, la période des moussons allant d'avril à octobre peut rendre difficile, mais pas impossible, l'activité métallurgique. De ce fait, en première approximation, cette pratique peut être perçue comme une activité saisonnière (White et Pigott, 1996). En Asie du Sud-Est, des études ethnographiques ont montré, encore récemment, que certaines activités se pratiquaient de manière saisonnière, durant la saison sèche (C. Archaimbault, 1985; B. Bronson et P. Charoenwongsa, 1986).

Pour une période proche de la nôtre, durant la période coloniale, la métallurgie était encore pratiquée de manière saisonnière en Asie du Sud-Est lorsque les activités liées à l'agriculture étaient terminées. En effet, durant la période coloniale, les observations faites par les Français explorateurs de la fin du XIXème siècle montrent une exploitation locale des ressources du sous-sol par les Laotiens, principalement orientée vers la satisfaction de leurs besoins propres. Des quantités minimes leur suffisent. Elles sont vraisemblablement aisées à trouver, d'après les récits (M. L. Gascuel, 1905; F. Blondel, 1932). Après la satisfaction de leurs besoins viennent l'impôt et l'échange. Les locaux exploitaient l'or lorsqu'ils avaient un besoin de liquidités, notamment dans la région du Complexe de Vilabouly. Ce qui revient de façon récurrente dans les observations faites durant l'époque coloniale de l'exploitation par les locaux est le caractère d'activité complémentaire que revêt l'exploitation du sous-sol. C'est une activité le plus souvent saisonnière, pratiquée en saison sèche. Les Laotiens sont avant tout des agriculteurs (M. Mouscadet, 2013, p.66).

Les récits disponibles pour l'Asie du Sud-Est sont plutôt avares en données concernant l'exploitation minière et la production du cuivre de manière générale. Des textes de la période historique font état de l'exploitation de mines Sud-Est asiatiques par des indiens dans la péninsule Thaï-Malaise et à Sumatra : des inscriptions et des textes malais du XIVème siècle relatant l'exploitation de l'or par des guildes tamiles et au premier millénaire de notre ère des guildes tamiles ont laissé des inscriptions décrivant l'exploitation de mines d'or par les indiens (D. Perret, 2011). Ces inscriptions et textes témoignent alors de l'exploitation des ressources locales par des goupes étrangers durant la période historique en Asie du Sud-Est. De telles données ne sont pas disponibles pour la protohistoire mais les ressources minérales, comme l'or, sont perçues comme ayant stimuler les échanges entre l'Asie du Sud et du Sud-Est dés cette période (A. Bennett, 2009).

On peut également regarder ce que l'ethnologie peut nous apprendre actuellement des communautés lao sur ces questions. Comme nous l'avons déjà abordé au Chapitre II, l'exploitation locale des ressources a été décrite par les Français durant la période coloniale. L'exploitation du cuivre par les Laotiens sous le protectorat français apparaît faible, de même que les Français vont peu s'y intéresser. En revanche, l'exploitation de l'étain au Laos par les populations locales a été observée et documentée par les Français durant l'époque coloniale. Les récits mettent l'accent sur le caractère saisonnier et les moyens simples misent en œuvre pour son exploitation, mais avec une connaissance de la sélection et du travail des minerais. Gascuel (1905) décrit les exploitations autochtones dans la vallée de la Nam Pathène (Province de Khammouane), dont il essaie d'évaluer la richesse minière. M. Gasuel décrit :

« Il existe dans le moyen Laos français […] de curieux gisements d'étain. Ils se trouvent dans la vallée d'une petite rivière, la Nam-Pathène, affluent du Hin-Boun, lequel se jette dans le Mékong […] à une centaine de kilomètres en amont de Savannakhet […] *Le gisement de Poun-Tiou a été de tout temps exploité par les indigènes, mais sans acharnement, loin de là. Ils ne vont y travailler que lorsqu'ils n'ont pas autre chose à faire, c'est-à-dire après la récolte du riz, en attendant que vienne le moment des semailles nouvelles, soit pendant trois mois par an environ, de novembre à février. Durant cette période, chaque jour le village entier se transporte sur la colline. Les hommes creusent les puits, tandis que les femmes et les enfants préparent les corbeilles dans lesquelles on remportera le soir le minerai, ou aident à sortir les blocs des excavations et à concasser en petits fragments, guère plus gros en moyenne qu'une noix, des "experts" trient avec patience ceux qui sont riches, c'est-à-dire sur les faces desquels étincèlent les minuscules cristaux de cassitérite. Leur teneur peut être estimée à 10, 12%. C'est le seul minerai dont puisse venir à bout leur métallurgie primitive. A la fin de la journée, un puits a donné ainsi au maximum une dizaine de kilogrammes. Les puits sont peu profonds. Il n'est pas nécessaire qu'ils le soient beaucoup, car la valeur du produit extrait n'a pas de relation avec la profondeur. […] en aucun cas ils ne descendent à plus de 4 à 5 mètres. Leurs trous sont grossièrement circulaires, d'à peu près 1 mètre de diamètre, sans boisage ni soutiens d'aucune sorte. Le minerai riche ainsi obtenu est transporté au village, concassé dans les pilons à riz, qui sont en bois, sommairement lavé par les femmes dans les batées coniques afin d'éliminer les matières terreuses, et enfin fondu avec du charbon de bois dans de petits fours à manche en argile. Le vent est donné dans ces appareils au moyen d'une soufflerie consistant en deux tubes de bambou montés sur un conduit en terre, dans lesquels un homme pousse alternativement des pistons garnis de plumes. Quand l'opération est terminée, on trouve au fond du four une masse métallique d'étain renfermant de 10 à 20% d'impuretés, si tout s'est bien passé, sinon un culot ferrugineux plus ou moins stannifère […] Ces gisements ont une réelle importance pour les indigènes. Grâce à eux, ils peuvent s'acquitter régulièrement de leurs impôts, même dans les mauvaises années. […] Pour y parvenir, une fois qu'on est arrivé à Saïgon, on a le choix entre deux routes : remonter le Mékong jusqu'à Pak-Hin-Boun, puis le Hin-Boun, et enfin la Nam-Patène, ou aller à Hanoï, de là à Vinh, et de Vinh au Hin-Boun en traversant la chaine annamitique au col d'Ha-Traï […] La durée totale du voyage*

jusqu'aux gisements est d'une trentaine de jours, sauf imprévu. » (M. L. Gascuel, 1905, p.321-329)

Encore aujourd'hui, la population lao peut être séparée en plusieurs entités, dont les Lao des plaines (*lao lum*) et les Lao des montagnes (*lao sung*). Les différences existantes entre ces deux types « d'ethnies » pourraient remonter à la formation des premiers états et à des mouvements de populations (J. C. Scott, 2009), bien qu'aucune donnée ne vienne le confirmer. En effet, à la fin du premier millénaire ap. J.-C les populations de langue thaï, pratiquant l'agriculture du riz inondé et organisé en *Muang*[37], seraient arrivées au Laos. Ces populations avaient alors en grande partie adopté la religion bouddhiste et le système d'écriture *tham* (Y. Goudineau, 2008; G. Schlemmer, 2017). Scott (2009) décrit alors un potentiel lien entre organisation politique et les techniques de culture, donc entre la culture du riz inondé des *Lao Lum* et l'agriculture sur brulis des *Lao Sung*. La culture du riz inondé favoriserait alors une organisation et une centralisation plus élevées, d'après cet auteur. Ces observations rejoignent également les hypothèses pour l'âge du Fer où certains chercheurs trouvent un lien entre l'augmentation de la densité des sites de peuplements et leur complexification, avec un changement et une intensification des techniques d'agriculture (G. Scott et D. O'Reilly, 2015; C. C. Castillo et al., 2018). Encore de nos jours, les *Lao lum* s'approvisionnent en matières premières auprès des *Lao sung* et inversement, créant ainsi une forme d'interdépendance. Cette configuration des échanges entre les ethnies des hauteurs et des plaines existe également au Vietnam central actuel pour les Kantu, notamment dans la province de Quang Nam (T. K. Phương, 2019) où un proverbe vietnamien mentionne : « *Whoever goes to see the uplanders please remind them, (if) forest products are brought down, sea products are carried up* ». Dans les années 1980, des denrées en provenance des communautés Kantu dans les hauteurs de la province de Sekong au Laos étaient également acheminées vers les vallées de la province de Quang Nam (vallée du Thu Bon).

Olivier Evrard a mené ses recherches au nord du Laos, plus particulièrement au sein des communautés d'ethnies khmoues, il décrit en 2006 :

> « *Historiquement, les populations lao du nord se sont toujours approvisionnées en paddy auprès des montagnards, tandis qu'elles-mêmes se spécialisent davantage dans le commerce fluvial. Cette configuration particulière de l'économie a très directement influencé l'organisation et l'histoire politique de l'ancien royaume du Laos (Lan Xang) centré sur Luang Prabang, mais étroitement dépendant des réseaux fluviaux et des petits*

[37] Principautés

comptoirs établis sur les berges par les bateliers pour commercer avec les montagnards » (O. Evrard, 2006, p.23).

G. Sprenger mentionne également ces relations centre-périphérie pour les ethnies des montagnes, afin de décrire leurs relations avec celles des plaines (G. Sprenger, 2005, p.68-70, 2013) et ce qui pourrait s'apparenter aux *Muang* des populations Môn-taï. Les relations centre-périphérie ne seraient pas bâties selon les mêmes modèles en fonction des ethnies. Les Lao des plaines se retrouvent ainsi proches du centre, alors que les Lao des montagnes représentent la périphérie. Les anciens royaumes du second millénaire de notre ère, comme celui de Lan Xang autour de Luang Prabang ou à Chiang-Mai en Thaïlande, sont parfois nommés « *galactic polities* » ou « *Mandala* » (O. W. Wolters, 1982) car ils se composent d'un centre et de sous centres, qui eux-mêmes peuvent avoir leurs propres sous-centres (A. Turton, 2000; G. Sprenger, 2013). Dans ce modèle, les sociétés périphériques évoluent selon un modèle de sélection, afin de répondre à leurs propres organisations/société/idéaux. Ainsi, la hiérarchie centre/périphérie n'est pas nécessairement fixe. Un modèle hybride entre le « Mandala » et le modèle *upstream-downstream* (B. Bronson, 1978) a pu être proposé pour l'organisation de certaines proto-cités-États portuaires de la fin de la période préhistorique comme Khao Sam Kaeo/Khao Sek (B. Bellina, 2018 a) ou encore à Sumatra à la période historique (P.-Y. Manguin, 2002, 2009 b). Le centre peut être changeant et est relié aux périphéries par un réseau fluvial dont le contrôle peut s'étendre à plusieurs bassins fluviaux éloignés. Ces différents modèles permettent de définir les relations existantes, mais variables, entre différentes zones pratiquant des activités interdépendantes tout en conservant une identité qui leur est propre. Les témoignages coloniaux rendent également compte de la grande flexibilité et de la mobilité des villages antérieurement à la période coloniale, notamment au Myanmar : lorsque les communautés d'un village ne sont plus satisfaites de leurs conditions, elles se déplacent aisément vers d'autres lieux (J. C. Scott, 2009, p.195). Ces modèles d'organisations ont pu largement être proposés pour la protohistoire, mais peu de découvertes archéologiques ne permettent finalement de pleinement les démontrer (Bellina, 2018, p. 3).

Encore aujourd'hui, certaines communautés lao vivent dans un système d'interdépendance et d'échanges entre communautés des montagnes et des plaines. Chaque entité est dépendante de l'autre pour l'acquisition de certaines denrées. Malgré l'absence de données à ce jour, on pourrait envisager que cette organisation et ces relations plaines/montagnes puissent trouver une origine ancienne et être transposable en partie à notre période d'étude. Ainsi, elle pourrait refléter la spécificité du territoire lao ainsi que d'autres zones similaires d'Asie du Sud-Est.

Nous verrons que ces questions sont tout particulièrement importantes lorsqu'on aborde l'intégration du Complexe de Vilabouly dans les réseaux d'échanges ainsi que la question du contrôle de la matière première et/ou des relations que le site entretenait avec les régions voisines comme le Vietnam, le Cambodge ou la Thaïlande actuels (voir partie VIII.2). Vilabouly pourrait avoir été exploité par différentes communautés au cours du temps, avec des pratiques socioculturelles diverses[38]. Le principal objectif semble être l'exploitation et la production de la matière première du cuivre sous forme de lingot dont une partie pouvait ensuite être exportée vers d'autres régions. Les dernières dates pour KWPV (Higham et al, 2020) semblent montrer que c'est à la fin l'âge du Bronze et au début de l'âge du Fer que la production de KWPV s'intensifie. L'intensification de l'activité de KWPV serait liée à l'accroissement de la demande et aux développements des voies d'échanges. Si Vilabouly se situe dans la même dynamique, le rayonnement de ces productions aurait alors profité de ces réseaux d'échanges croissants.

On sait maintenant que dès l'âge du Fer, des autorités centralisées ou du moins l'émergence de centres proto-urbains hiérarchisés d'organisation plus complexe et intégrés dans un dynamique réseau d'échange, commencent à se mettre en place en Asie du Sud-Est dès la seconde moitié du premier millénaire av. J.-C. Ces évolutions ne peuvent bien sûr pas être généralisées pour l'ensemble de l'Asie du Sud-Est. Elles doivent être transposées à une échelle locale, mais elles permettent tout de même de montrer la mutation qui s'opère, particulièrement durant la seconde moitié de l'âge du Fer, au sein de certains peuplements. Ces communautés auraient pu étendre leur influence sur certains territoires et/ou certaines ressources, comme le cuivre, dans une recherche d'organisation et d'un contrôle plus accru. C'est dans cette dynamique qu'il faut également replacer le Complexe de Vilabouly afin d'expliquer comment et pour qui le cuivre était produit et exporté, mais également sur l'intégration et l'origine des communautés pratiquant cette métallurgie. La dernière partie va nous permettre d'aborder cette question des échanges, de la circulation et des potentiels lieux de consommations des productions de Vilabouly en Asie du Sud-Est.

VIII.2. Quelle(s) Implication(s) pour les communautés des montagnes dans les réseaux d'échanges : modes de diffusion des productions de Vilabouly

Le Complexe de Vilabouly se situe dans une région montagneuse et enclavée, à priori éloignée des voies d'échanges maritimes. L'actuel Laos se situe pourtant à un emplacement carrefour entre différents territoires actuels : le Vietnam à l'est, la Thaïlande à l'ouest, la Chine et le Myanmar au nord et le Cambodge au sud, où des communautés organisées avec des modèles complexes, intégrées dans les réseaux d'échanges, naissent durant l'âge du Fer (voir Chapitre

[38] Perçus par les contextes funéraires différents entre PBL et TNN mais restant à être démontré (cf. étude sur la poterie domestique).

I, partie I). Cette partie vise à fournir quelques hypothèses à l'intégration du Complexe de Vilabouly aux réseaux d'échanges régionaux via lesquels ses productions auraient circulé. Dans un premier temps, il va s'agir d'identifier les sites consommateurs du cuivre de Vilabouly au travers de l'isotopie du plomb, ainsi que les formes des objets en circulation. La présence d'objets avec une typologie importée, les *ge* et les tambours, signe ici des contacts directs ou indirects avec les cultures de Chine et/ou le Vietnam. Ils sont donc indicatifs des potentielles relations de Vilabouly avec les régions voisines. Dans un second temps, l'identification de potentiels lieux de consommations nous permettra de dresser des hypothèses sur les voies d'échanges empruntées par le cuivre de Vilabouly.

VIII.2.1. Provenance des matières premières

Avant de s'intéresser aux réseaux d'échanges et aux questions de circulation des biens/matières premières, il est important de regarder où se situent en Asie du Sud-Est les matières premières d'intérêts pour la métallurgie, particulièrement le cuivre, l'étain et le plomb. En effet, la disponibilité des matières premières va également conditionner notre appréhension des exploitations et de leur organisation.

Le Chapitre II nous a permis d'aborder la question du contexte géologique du Complexe de Vilabouly, révélant ainsi la présence abondante de minerais de cuivre de différents types (oxydes, carbonates et sulfures primaires/secondaires) associés également à des minerais de fer, présents dans les dépôts de surface d'altération, le gossan (principalement goethite et hématite). La présence d'une production de cuivre au Complexe de Vilabouly semble donc s'expliquer par la logique de l'abondance de ces minerais. L'étude du mobilier de Vilabouly a confirmé la pratique de la réduction de minerais de cuivre, visiblement au cours d'un procédé utilisant un mélange de minerais carbonates/oxydes et de minerais sulfurés variables. En revanche, il nous faut maintenant aborder la question de l'étain et du plomb. En effet, nous avons également vu qu'au sein du corpus d'objets finis de Vilabouly, les bronzes Cu-Sn sont bien représentés ainsi que l'alliage ternaire Cu-Sn-Pb. La question de l'origine de la/des sources d'étain et de plomb se pose alors. Cette question ne se pose pas seulement dans le cas de Vilabouly, puisque l'étain et le plomb (âge du Fer) sont les deux principaux éléments d'alliages employés à la fin de la période préhistorique en Asie du Sud-Est.

Les productions et les réseaux d'échanges d'étain et de plomb à la protohistoire sont encore peu connus pour l'Asie du Sud-Est (T. O. Pryce, 2012). Certains sites, pour le plomb, situés à l'ouest de la Thaïlande n'ont pas été fouillés : il ne va donc pas nous être possible d'en discuter. En revanche, à l'aide des prospections modernes avec pour but la mise en évidence des ressources minières exploitables, il nous sera possible de repérer l'emplacement des gisements d'intérêts actuels. Tout en prenant en compte que l'activité métallurgique que nous

étudions se situe il y a environ 2000 ans, il apparaît alors possible que les gisements utilisés par les anciens métallurgistes soient taris aujourd'hui ou qu'il soit difficile de les identifier au travers des critères de la métallurgie extractive moderne (dépôts de grande ampleur avec des taux faibles versus dépôts de faible ampleur avec des taux plus élevés). Il faut également prendre en compte les problèmes engendrés sur les études de provenance des matières premières du bronze (voir Chapitre III.2), par la pratique du recyclage ainsi que l'ajout d'éléments d'alliages, comme l'étain, qui peuvent fausser les données. La compréhension des réseaux d'échanges et d'exploitation des autres minerais utilisés pour la réalisation des principaux alliages utilisés en Asie du Sud-Est à la fin de la préhistoire, l'étain et le plomb (âge du Fer), apparaît alors d'un grand intérêt pour appréhender pleinement la complexité des productions et des réseaux d'échanges de métaux non-ferreux dans la région.

1. Ressources minières au Laos

L'identification de la localisation des gisements d'intérêts au Laos a été entreprise et référencée dès l'époque coloniale française. Comme nous l'avons déjà vue au Chapitre II, la recherche de ces gisements a donné lieu à la création de nombreuses sociétés pour leur exploitation. Beaucoup n'ont pas perduré (Mouscadet, 2013), mais leur recherche a laissé de nombreux témoignages sur la richesse du sous-sol laotien.

De nos jours, l'or et le cuivre sont les principaux minerais exploités et exportés du Laos (É. Mottet, 2013). En ce qui concerne le cuivre, durant la période coloniale, son exploitation ne semble pas avoir dépassé le stade de l'exploitation locale pour des besoins locaux. Le cuivre est extrait dans les provinces d'Attopeu, de Bassac au sud, « *sa métallurgie poserait de trop grandes difficultés pour les moyens primitifs dont disposent les laotiens* » (Mouscadet, 2013, p. 62). Actuellement, les principaux dépôts de cuivre exploités au Laos se retrouvent à Sepon (Vilabouly) et à Phu Kham dans la Province de Xiangkhouang au nord-est (Figure 205). De plus, la Province de Xiengkhoang autour de la ville de Phonsavan semble être une des régions actuelles les plus riches du Laos en termes de ressources minières, mais aucun signe d'une exploitation ancienne n'y est encore connu. Le cuivre se retrouve également dans la Province de Champassak (Figure 205) au sud (autour de la ville de Paksé), à la frontière avec le Cambodge, où se situe le site ancien de Vat Phu. Ces dépôts ne sont actuellement pas exploités par des entreprises minières, car ils sont de trop faible ampleur au vu des critères modernes.

Si on regarde pour la Province de Savannakhet, à proximité du Complexe de Vilabouly, durant la période coloniale, elle semble plus particulièrement connue pour ses ressources en or, plomb, alum, gypse et sel (Mouscadet, 2013, p.35). La géologie du Laos a été résumée en 1990 par les Nations Unies*, la Commission Economique et Sociale pour l'Asie et le Pacifique* ainsi

que par des prospections britanniques[39] qui nous apprennent également que des dépôts d'étain et de plomb sont identifiés dans la région du Complexe de Vilabouly (Figure 205). L'étude de la lithologie présente sur la concession de Sepon (Vilabouly) a en effet révélé que le minerai de plomb, la galène, se retrouve fréquemment en petite quantité, en veine, dans les dépôts (P. W. Cromie, 2010; P. Cromie et al., 2018). Les dépôts d'étain et de plomb semblent en revanche trop petits, selon les critères modernes, pour avoir attiré l'attention des compagnies, puisqu'aucune exploitation n'a été entreprise pour l'extraction de ce type de minerai à Sepon. Ensuite, hormis la concession exploitée actuellement par la compagnie minière Chifeng-LXML à Sepon, le restant de la province de Savannakhet ne semble pas comporter d'autres dépôts métallifères majeurs.

Concernant les ressources en étain, aussi bien durant la période coloniale, qu'actuellement, elles se situent principalement dans la province de Khammouane au dépôt de Ban Phontiou dans la vallée de la Nam Pathène, province limitrophe au nord de celle de Savannakhet (Figure 205). Actuellement, l'étain est toujours exploité dans la vallée de la Nam Patène, aux mines de Phontiou, Nadon, Nakham, Muangkhai et Noi notamment (Lahiri-Dutt et Invouvanh, 2010, p. 2). L'exploitation de l'étain par les locaux a également été répertoriée par les Français sous le protectorat dans la province de Khammouane, par M.L Gascuel (1905) qui décrit notamment l'exploitation autochtone dans la vallée de la Nam Patène (M. L. Gascuel, 1905). Aucun signe d'une exploitation ancienne n'est encore connu pour ce gisement d'étain.

[39] Atlas of Mineral Ressources of the ESCAP region, Volume 7, Lao PDR, 1990 ; Lao PDR geological and mineral occurrences map, Mineral exploration and development plan, 1990-91, British geological survey

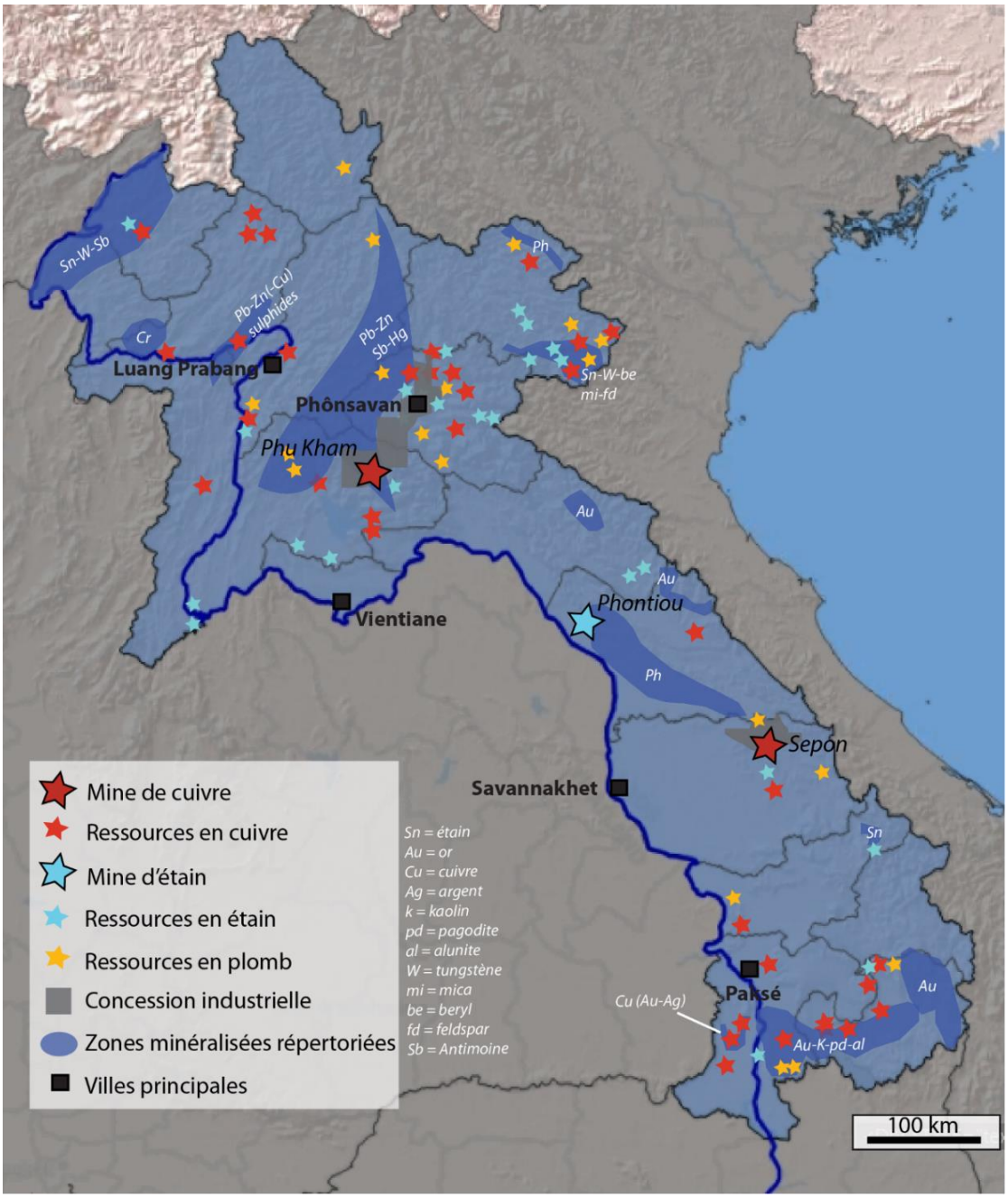


Figure 205 : Localisation des différentes mines et ressources en cuivre, étain et plomb identifiées au Laos (source : Lao PDR geological and mineral occurrences map, Mineral exploration and development plan, 1990-91; British Geological Survey et Department of Mines, Ministry of Energy and Mines, Lao PDR et Atlas of Mineral resources of the ESCAP region, volume 7,Lao PDR, United Nations, 1990; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations; 1979; carte de fond : ESRI).

Concernant les ressources en plomb, on les trouve dans le Bas-Laos sur les bords de la Nam Maï Phaï, affluent de droite de la Sékong (entre Siempang au Cambodge et Attopeu au Laos). Un autre gisement se trouverait sur la rive gauche du Mékong en face de Bassac. Le plomb est également réputé exister dans la partie supérieure de la rivière Dak Mout et près d'A Roc, ainsi qu'à Ban Kébo. En 1900 c'est au Tran Ninh (actuelle Province de Xiengkhouang) qu'on signale également du plomb, à Ban Tha Sala au-dessus de Van Muong, sur la Nam Ngoum (Mouscadet,

2013, p.34). Tout comme le gisement d'étain de la vallée de la Nam Pathène, aucun signe d'une exploitation ancienne de ces ressources en plomb n'est encore connu au Laos.

2. Ressources minières au Vietnam, au Cambodge et en Thaïlande

Afin d'avoir un panorama complet des ressources minières disponibles, nous allons maintenant nous intéresser aux territoires actuels de Thaïlande, du Vietnam et du Cambodge. En effet, ces territoires limitrophes au Laos pourraient également permettre d'expliquer la provenance de certaines matières premières ou au contraire expliquer l'approvisionnement de certaines régions en manque de minerais.

A. La Thaïlande

La géologie de la Thaïlande a également été résumée par les Nations Unies, *la Commission Economique et Sociale pour l'Asie et le Pacifique,* en 2001[40]. L'actuel territoire de Thaïlande est également riche en ressources minérales. C'est le sud de la Thaïlande qui a dans un premier temps attiré l'attention avec ses vastes dépôts d'étain, parmi les plus riches au monde. En effet, ces dépôts font partie de ce qui est nommé « *the southeast asian tin belt* » (M. O. Schwartz et al., 1995), dont les plus importants se trouvent dans la péninsule Thaï-malaise. C'est d'ailleurs dans la péninsule, au site de l'âge du Fer de Khao Sam Kaeo que le rare exemple de lingot de bronze à haute teneur en étain de la fin de la période préhistorique a été découvert en surface. Le contrôle des ressources en étain de la péninsule thaïlandaise a été proposé pour le site de Khao Sam Kaeo (M. Murillo-Barroso et al., 2010; T. O. Pryce et al., 2017), mais aucun site de production primaire n'y est à ce jour connu.

[40] Atlas of Mineral Ressources of the ESCAP region, Volume 16, Mineral resources of Thailand, United Nations, New York.

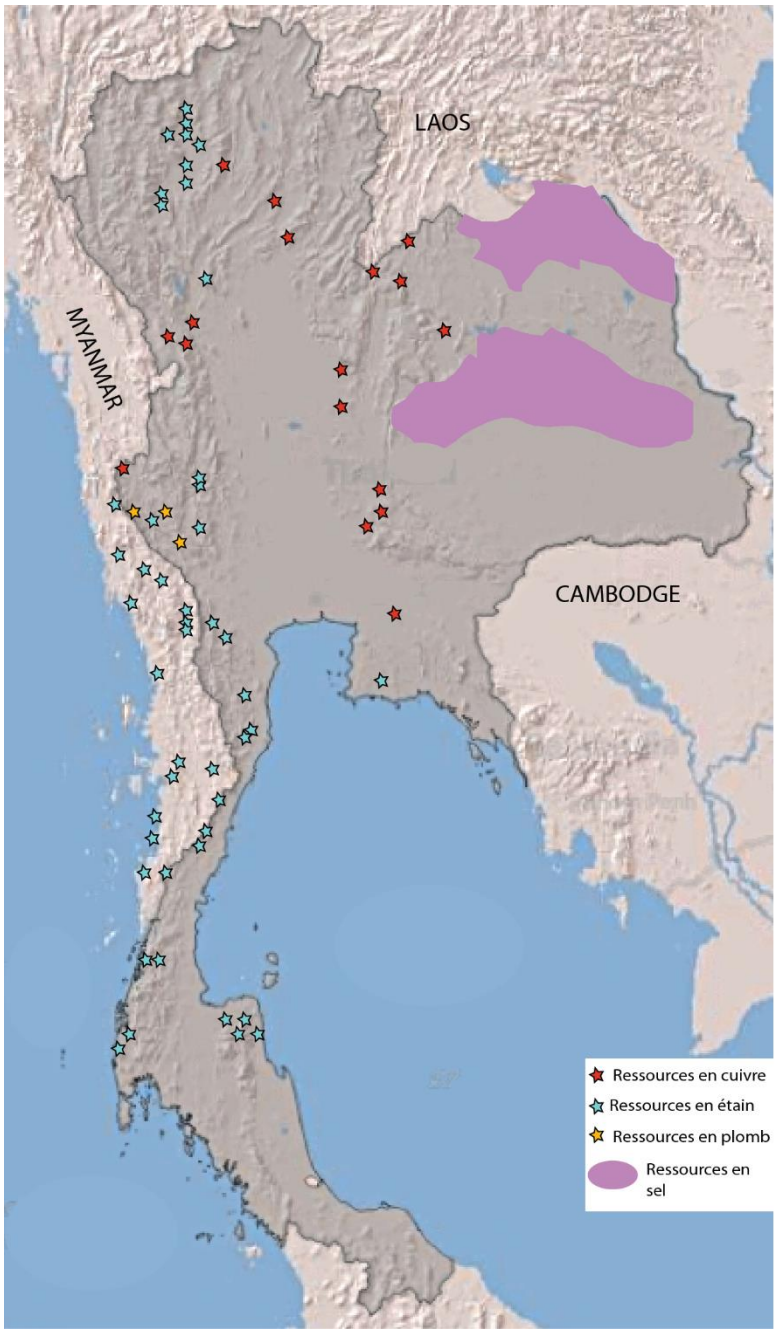


Figure 206 : Carte de la répartition des ressources en cuivre, plomb, étain et sel en Thaïlande (Source : Atlas of Mineral Resources of the ESCAP region, volume 16, Thailane, United Nations, 2001 ; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations ; 1979 ; crédit carte de base : ESRI).

La partie nord-est de la Thaïlande, qui nous intéresse ici plus particulièrement, car elle englobe le plateau du Khorat, possède une topographie avec une élévation en colline entre 140 et 200 m au-dessus du niveau de la mer. Cette région semble pauvre en minerais métalliques de base (Figure 206). En effet, le plomb et l'étain en sont absents, pour le cuivre de rares occurrences sont référencées. Les dépôts de cuivre se retrouvent au nord, à la frontière avec le Laos, à l'emplacement du site d'extraction ancien de Phu Lon, notamment. Ensuite le cuivre se concentre dans la ceinture de Loei, au centre de la Thaïlande, où se situe d'ailleurs le site de

la vallée de Khao Wong Prachan. En revanche, le plateau du Khorat est riche en sel, connu depuis la période préhistorique (P. Rivett et C. F. Higham, 2007; A. Halliwell, A. Yankowski, et N. Chang, 2016). Le sel pourrait donc constituer un intéressant moyen d'échange contre d'autres denrées, absentes, comme les minerais.

B. Le Vietnam



Figure 207 : Carte de la répartition des ressources en cuivre, étain et plomb au Vietnam (source : Atlas of mineral ressources of the ESCAP region, Volume 6, Vietnam, United Nations, 1990 ; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations, 1979 ; crédit carte de base : ESRI).

Des productions protohistoriques de cuivre sont fortement supposées pour le Vietnam, particulièrement au nord, mais aucune prospection/étude n'a encore été réalisée afin de les

mettre en évidence. De nos jours, les ressources d'intérêts (Cu, Pb et Sn) se concentrent principalement dans la partie nord du territoire qui est la plus riche (Figure 207). On retrouve quelques occurrences au centre, mais elles sont minimes. Les principaux dépôts de cuivre identifiés semblent être associés à des minerais de nickel. Le plus vaste dépôt de sulfures de cuivre/nickel se situe dans la région de Ta Khoa dans la province de Son La. Il se compose principalement de pyrrhotite, de pentlandite et de chalcopyrite. On retrouve également des dépôts de cuivre au centre du Vietnam (dépôt de Duc Bo) en marge nord-est du massif de Kontum.

L'étain se retrouve également dans la partie nord du pays, notamment à Vu Nong, montagne de Pia Oac (Province de Cao Bang) qui a été anciennement exploitée durant l'époque coloniale.

Le plomb se retrouve associé au zinc, distribué principalement aux marges des dômes Chiem Hoa et Ph Hoat, ainsi que pour les dépressions volcaniques des rivières Tu Le et Hiem ainsi qu'au sud à Da Lat.

Le centre du pays ne possède donc pas de dépôts de métaux de base identifiés par la métallurgie extractive moderne comme d'intérêt économique : les principaux dépôts sont identifiés au nord. [41]

C. Le Cambodge

Concernant le Cambodge, sa richesse géologique pour les dépôts métalliques de base (Cu, Sn et Pb) est moindre par rapport aux précédents exemples. Les dépôts sont de faibles ampleurs. Très peu de dépôts avec un intérêt économique moderne pour le cuivre, le plomb et l'étain ne sont connus sur l'actuel territoire (Figure 208)[42]. Récemment, une entreprise japonaise a mis en évidence une ceinture minéralisée de cuivre et de zinc dans la province de Stung Treng au nord du Cambodge à la frontière avec le Laos, mais elle n'est pas encore exploitée.

[41] Atlas of Mineral Resources of the ESCAP region, Economic and Social Comission for Asia and the Pacific in co-operation with the general department of mines and geology of Viet Nam, Volume 6, Viet Nam, United Nations, New York, 1990.
[42] Atlas of Mineral Resources of the ESCAP region, Volume 10, Cambodia, United Nations, 1993.

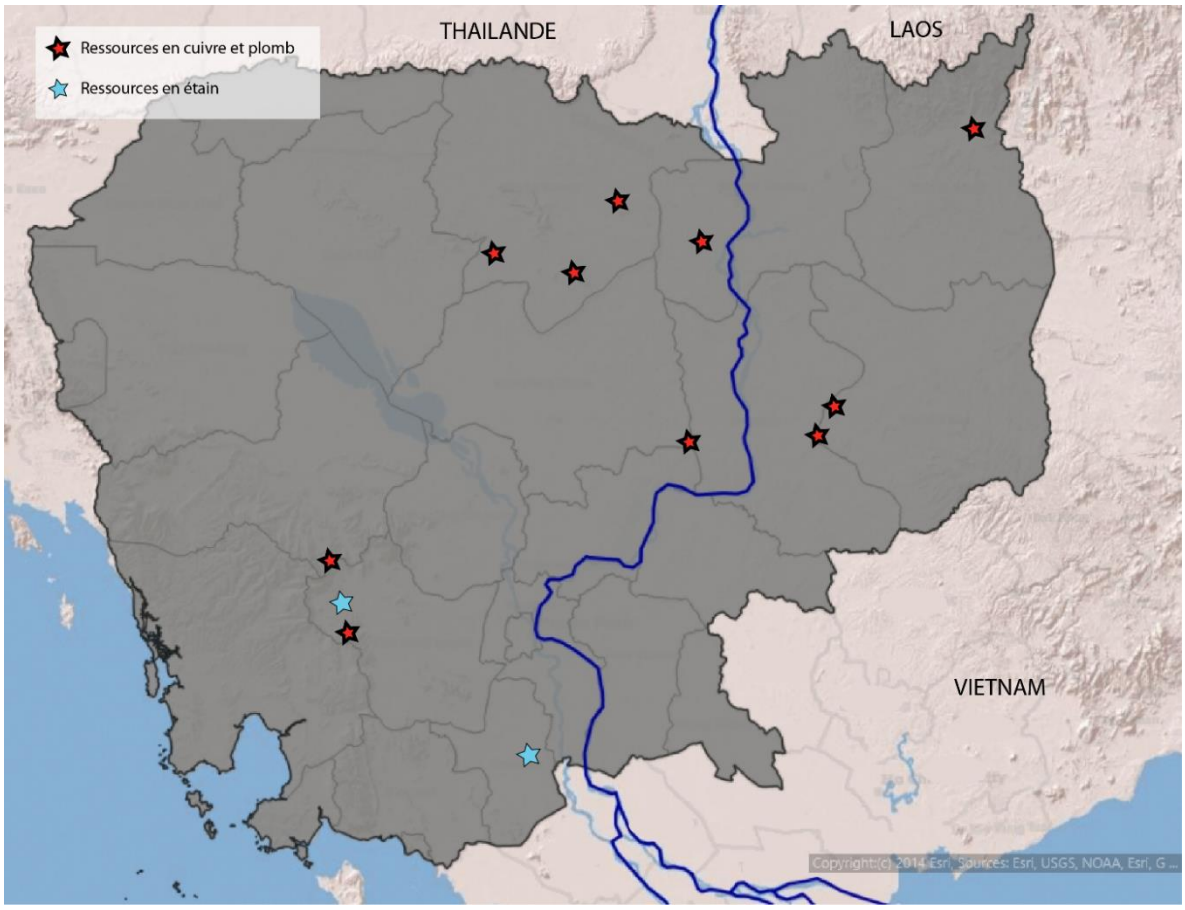


Figure 208 : Carte de la répartition des ressources en cuivre, plomb et étain au Cambodge (source : Atlas of mineral resources of the ESCAP region, Volume 10, Cambodia, United Nations, 1993 ; Mineral Distribution Map of Asia, United Nations; 1979 ; crédit carte de base ESRI).

En observant la répartition des différentes ressources minières citées au cours de cette partie, on remarque que l'actuel Laos est très riche en ressources minérales variées. On y retrouve notamment les trois principales ressources employées pour la métallurgie du cuivre/bronze à la fin de la préhistoire (cuivre, étain et plomb), alors que certaines zones, comme le plateau du Khorat en Thaïlande, une partie du Cambodge et du Vietnam, sont pauvres. L'abondance de ces gisements pourrait montrer l'attractivité du territoire lao actuel pour l'approvisionnement ancien en matières premières, dont le Complexe de Vilabouly ne serait que le premier témoin mis au jour.

VIII.2.2. Les sites/ateliers consommateurs du cuivre de Vilabouly

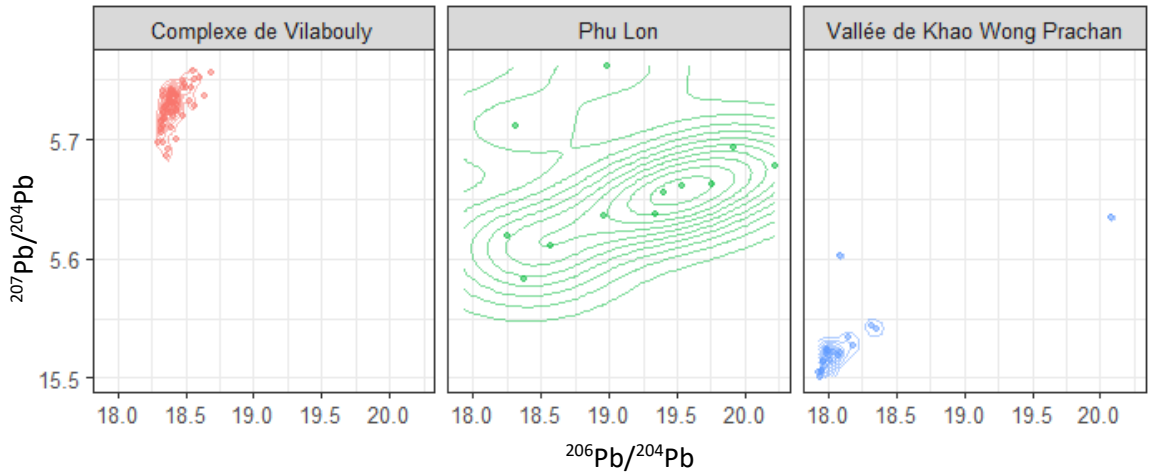
Dans le but d'identifier les potentiels lieux de consommation du cuivre de Vilabouly dans la région, ainsi que ses voies de circulation, les résultats des analyses isotopiques du plomb de SEALIP ainsi qu'une partie de celles de BROGLASEA ont été repris[43]. Le projet de BROGLASEA, dans le cadre duquel se déroule cette thèse, représente une recherche plus vaste, dirigée par

[43] Il faut également garder à l'esprit qu'une ou des sources inconnues, avec la même signature que Vilabouly, peuvent exister et que certaines des données présentées ici pourraient être remises en cause par de prochaines découvertes.

T.O Pryce, auxquelles appartiennent certaines données isotopiques présentées dans cette partie. Ces données vont être prochainement publiées par T.O Pryce et ne sont donc pas la propriété de cette thèse. J'ai été autorisée à utiliser certaines de ces données lorsqu'elles étaient pertinentes à la discussion des résultats de Vilabouly.

Les données isotopiques ont donc été reprises afin d'essayer de déterminer quels échantillons sont concordants avec la signature du cuivre de Vilabouly, ainsi que d'apporter un élément de réponse sur la forme des objets en circulation : les objets finis étaient-ils produits à Vilabouly puis exportés, ou est-ce le cuivre seul sous forme brute (lingot ?) qui était exporté vers d'autres lieux pour être alliée et/ou transformée en objets finis ?

La signature de Vialbouly étant bien définie, cela nous permet de lui comparer les autres données d'isotopie du plomb. Contrairement à la signature de Phu Lon, par exemple, dont la distribution est très étendue, et ne permet pas de fournir des résultats précis (Figure 209). La signature de la vallée de Khao Wong Prachan est également bien définie par les résultats d'isotopie du plomb, mais elle se différencie avec facilité de celle de Vilabouly. Pour ce faire, les données isotopiques ont été représentées dans des diagrammes binaires selon les ratios $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$.



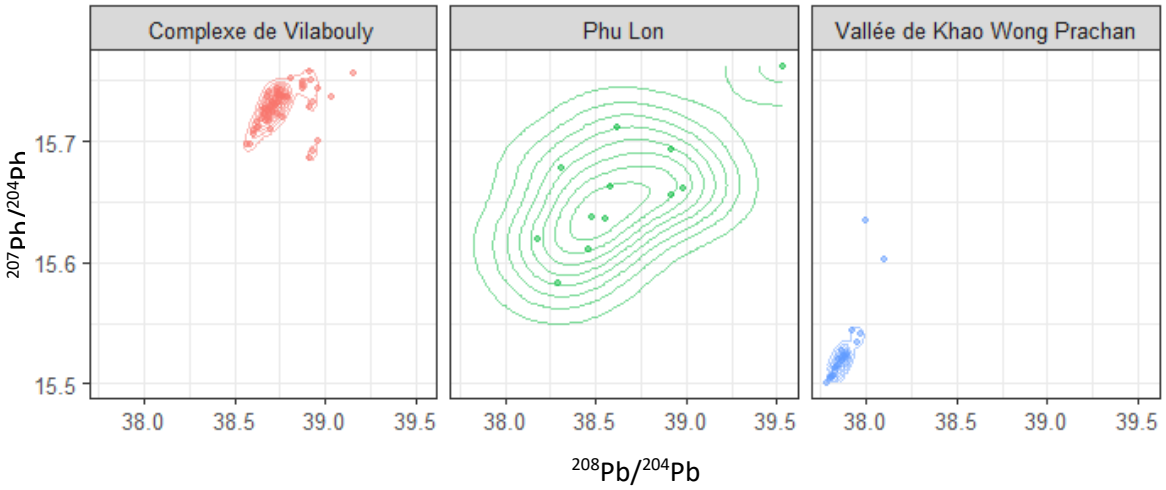


Figure 209 : Diagrammes bivariés montrant la distribution des échantillons de Vilabouly, Phu Lon et la vallée de Khao Wong Prachan en fonction de leur densité (les données ont été représentées à l'aide du logiciel Rstudio *et du package* ggplot *par l'application de la fonction* KDE *qui permet une représentation des données par densité).*

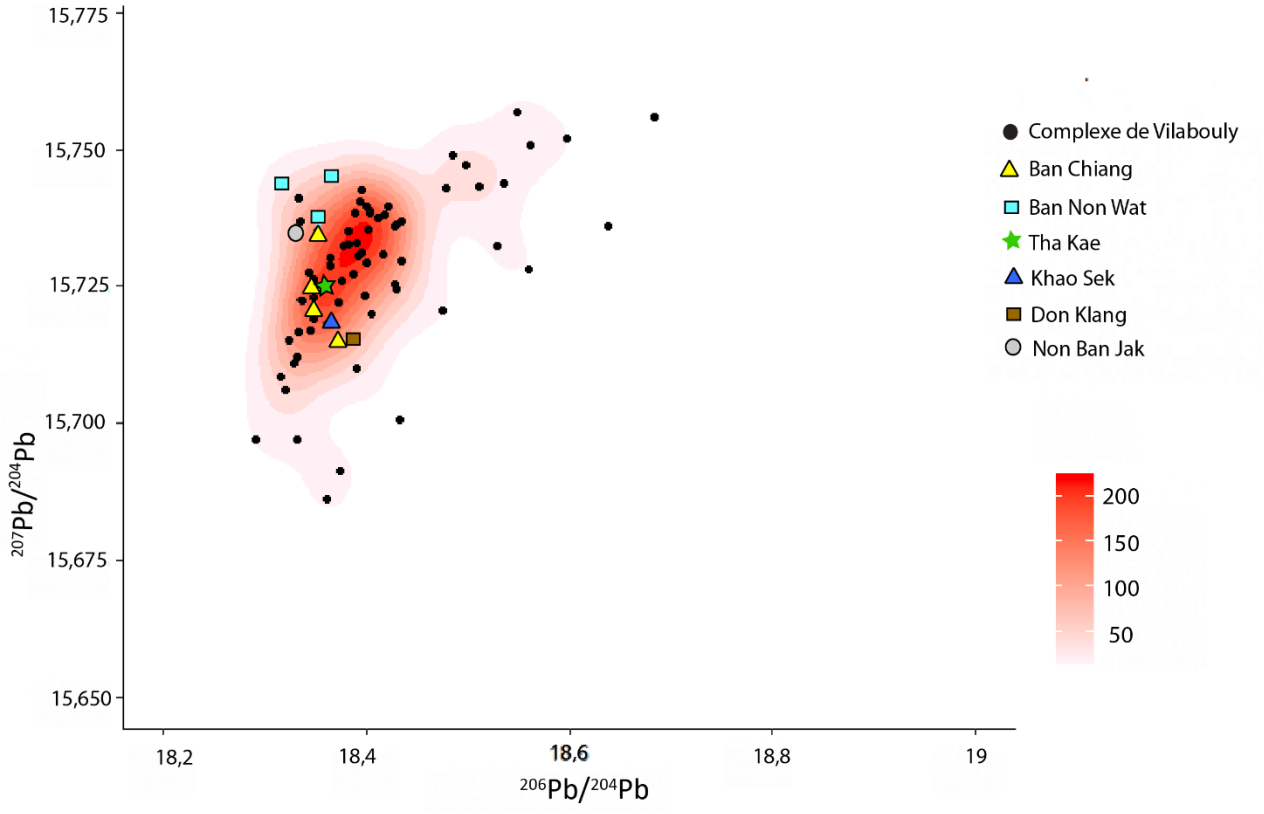
30 échantillons pour lesquels des taux de plomb significatifs ont pu être déterminés (1 %mass. et plus ; Pollard et al., 2017) sont écartés, car ils ne représenteraient pas la signature isotopique de la source de cuivre, mais celle du plomb, répondant ainsi à d'autres réseaux. Seuls les échantillons dont la signature se retrouve associée à la plus grande densité des données de Vilabouly, ont été déterminés comme concordants. 26 échantillons (SEALIP et BROGLASEA) répondent à ce critère (Figure 210, Figure 211 et Figure 212)[44]. Les autres ne concordent pas à la densité principale de la signature de Vilabouly. De plus, il faut également prendre en compte que les échantillons analysés à Vilabouly (scorie et objets) pour obtenir la signature isotopique ne rendent peut-être pas pleinement compte de la variabilité totale de la signature.

Les échantillons concordants concernent : cinq échantillons de Ban Chiang (BC/1, 4, 6, 11 et 12), un échantillon de Don Klang (DK/2), l'échantillon de tambour de Khao Sek (KS/2), un échantillon de Lovea (LV/13), trois échantillons de Oakaie 3 (OIA3/2, 3 et 4), cinq échantillons de Halin 29-1 (HL29-1/1-4, HL29-1/7), un échantillon de Mon Htoo (MHT/3), trois échantillons de Ban Non Wat (BNW/18, 19 et 20), un échantillon de Tha Kae (TK/1), un échantillon de Tham Than Nam Lot Yai (NSLY/3), un échantillon de Non Ban Jak (NBJ/7), un échantillon de Phu Lon (PL/12), un échantillon de Tam Pà Ping (TPP/1), un échantillon de Prohear (PH/2) et un de Prei Khmeng (PKM/9).[45]

[44] La représentation des données dans les diagrammes binaires a été faite par l'application de la fonction *KDE* (package *ggplot*) sur le logiciel *Rstudio* afin d'aider à une meilleure représentation des données. En revanche, la sélection des échantillons concordants a été faite signature par signature par l'auteure afin d'identifier les échantillons se recoupant avec la signature de Vilabouly.

[45] Une partie de ces résultats (Tha Kae, Tam Pà Ping, Halin 29-1, Ban Non Wat, Non Ban Jak) appartiennent aux dernières données de BROGLASEA qui seront prochainement publiées par T.O Pryce.

Parmi ces échantillons, on remarque que les objets de parures, bracelets et bagues, sont majoritaires avec cinq échantillons de bagues et onze de bracelets. Ils proviennent en particulier des sites de Non Ban Jak, Ban Non Wat en Thaïlande, Lovea, Prei Khmeng et Prohear au Cambodge, ainsi que d'Halin 29-1 et Oakaie 3 au Myanmar. Or, aucune évidence de la production d'objets de parures ni d'aucun autre type d'objets finis n'est présente au Complexe de Vilabouly. En revanche, la production de masse de bracelets est attestée pour le site de Ban Non Wat, pour lequel de nombreux moules ont été découverts (H. Cawte, 2012, p.460). Ces observations pourraient ici renforcer l'hypothèse d'une circulation des produits de Vilabouly sous forme brute, en lingot, transformé sur des sites secondaires, pour lesquels on pourrait même évoquer des spécialisations dans la fabrication de certains objets, comme cela semble être le cas à Ban Non Wat ou pour les sites de la région du Phu Wiang (Non Nok Tha). De plus, les lingots représentent la majeure partie du corpus d'objets en métal répertorié pour Vilabouly. La seconde représente des objets utilitaires (haches, pointe de lance, burin, etc.) qui auraient pu avoir été produits pour un usage local et non pour l'export.



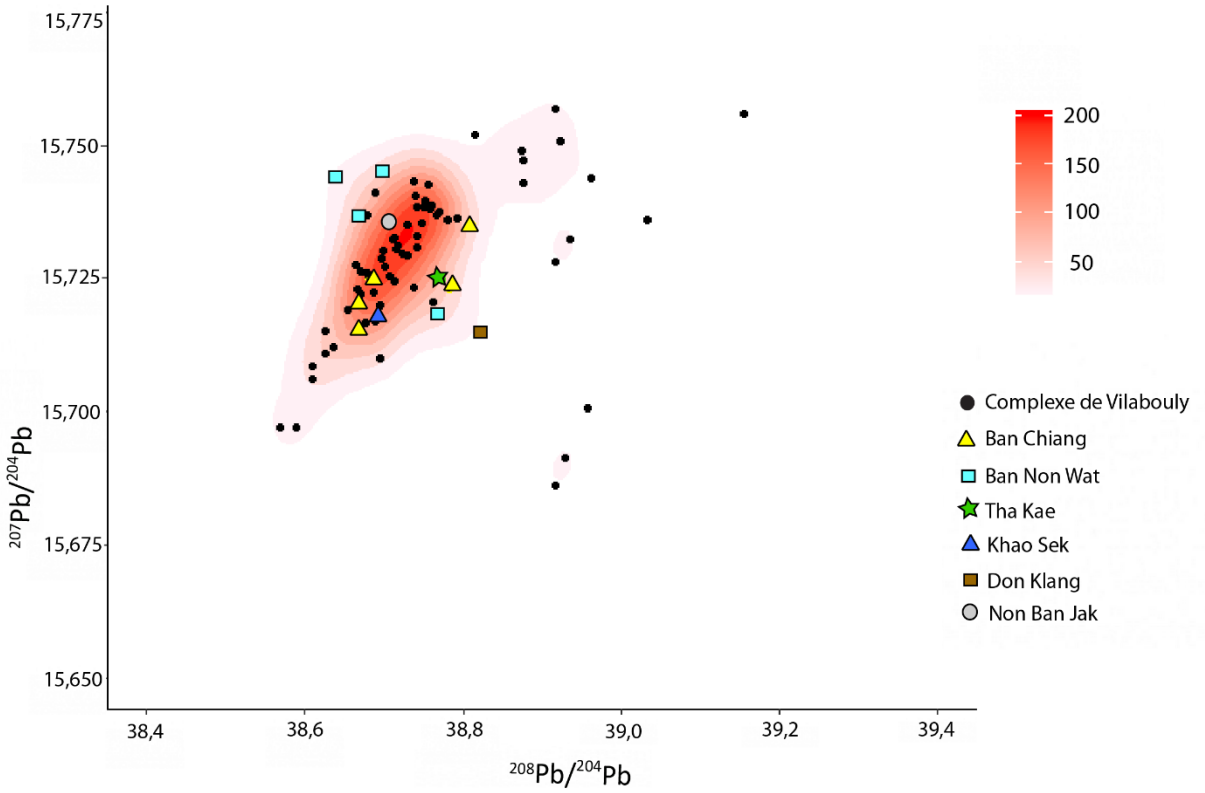
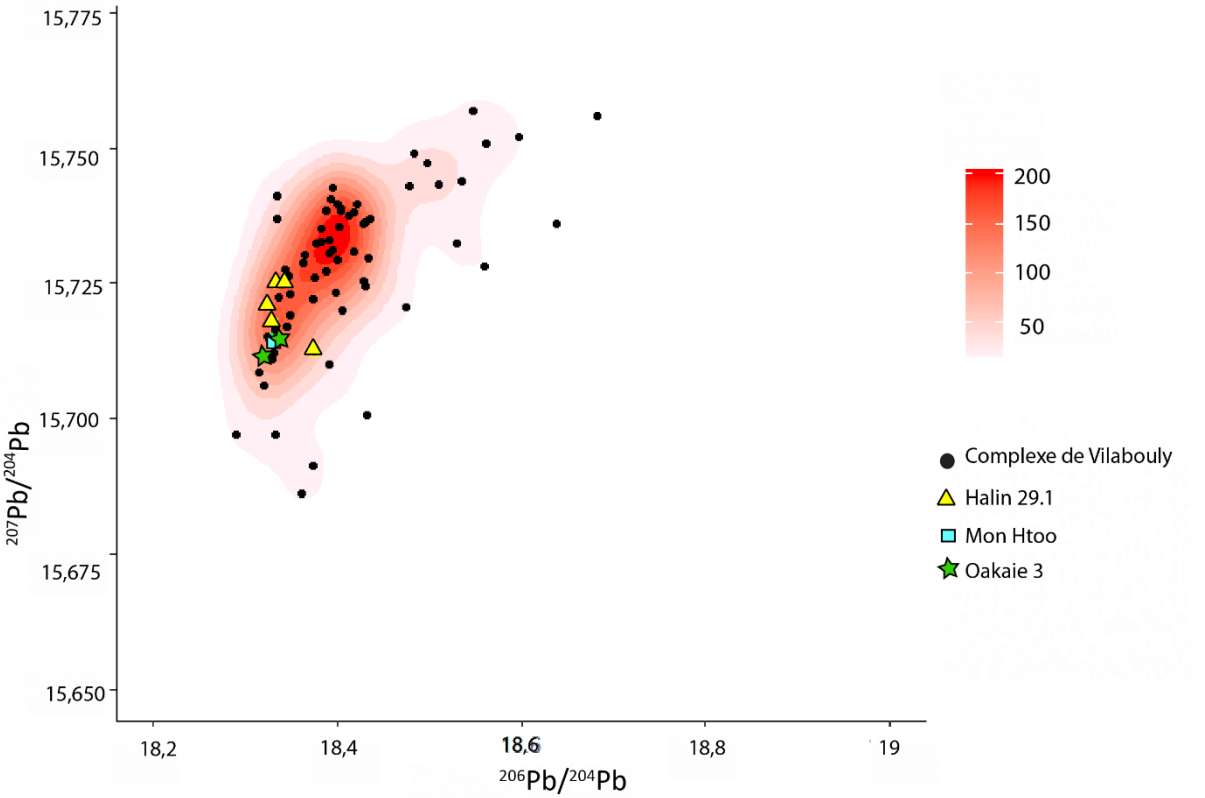


Figure 210 : Données isotopiques du plomb des objets de sites thaïs avec une signature concordante au Complexe de Vilabouly représentés selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$.



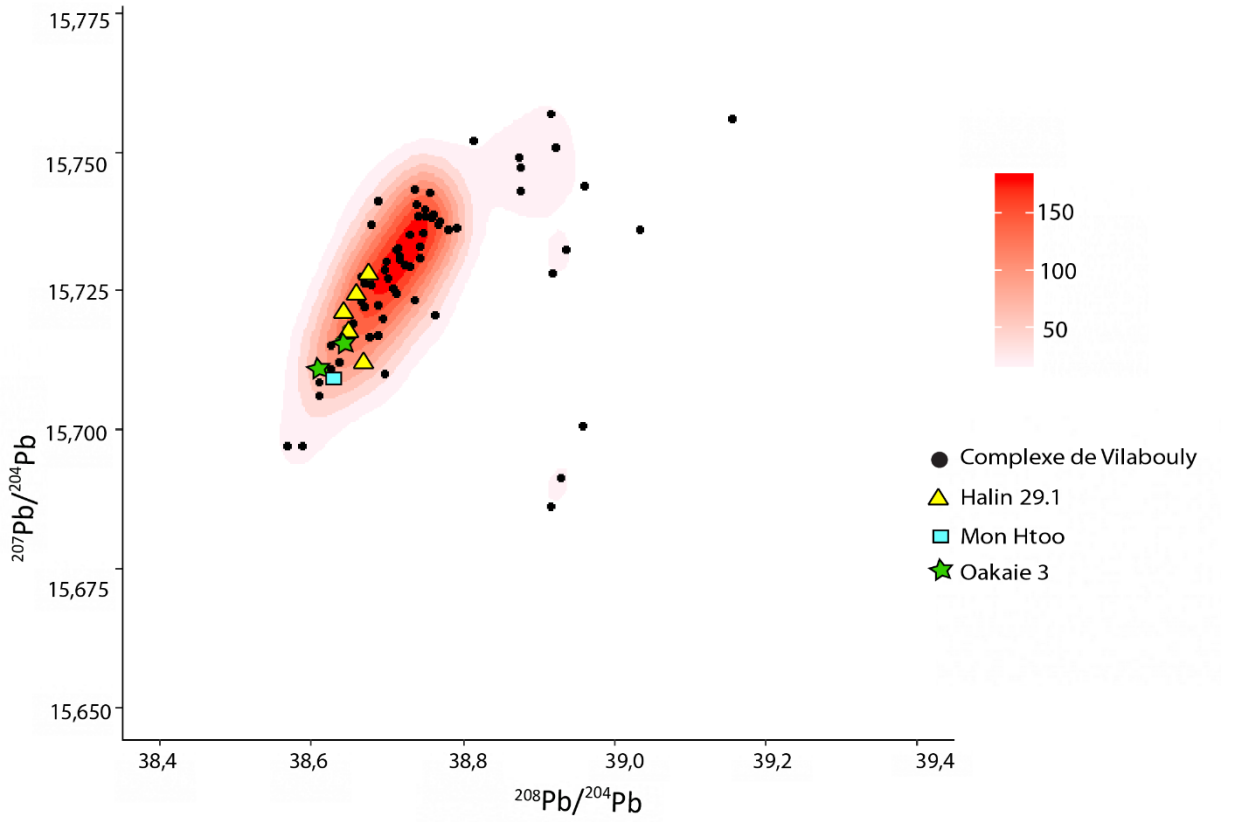
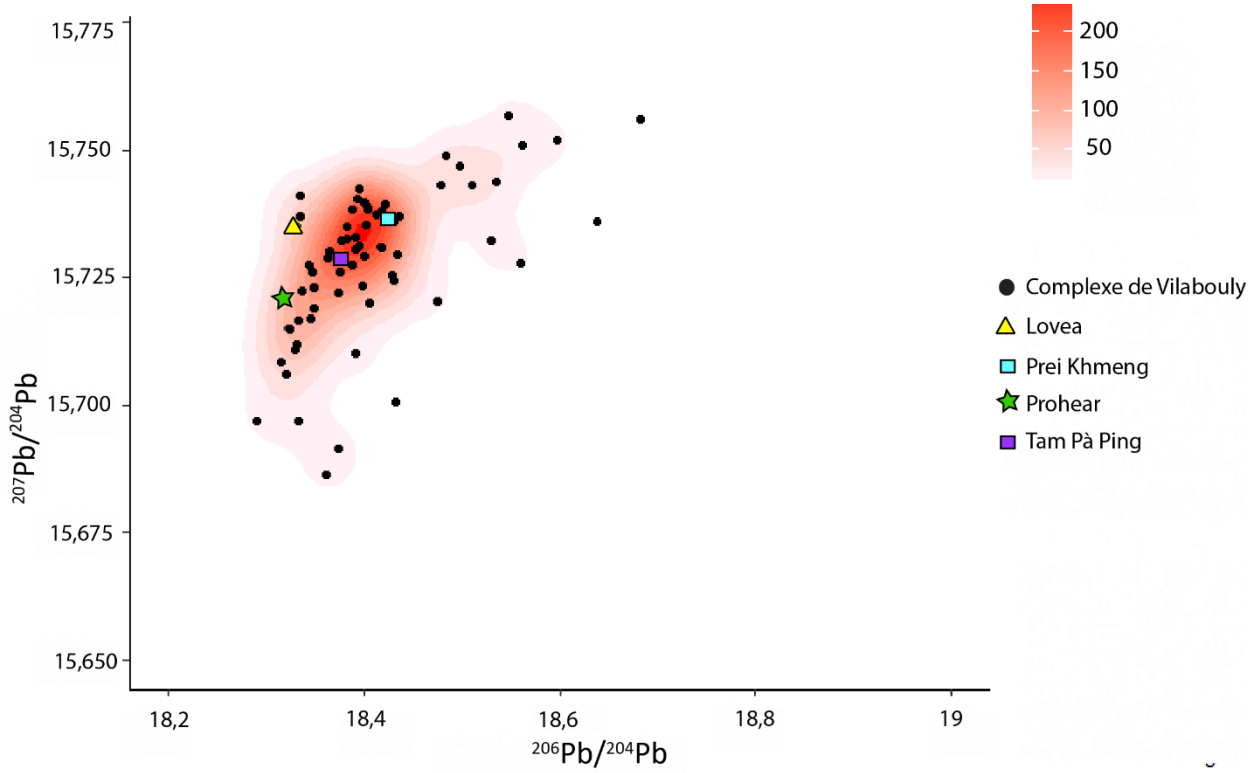


Figure 211 : Données isotopiques du plomb des objets de sites du Myanmar avec une signature concordante au Complexe de Vilabouly représentés selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$.



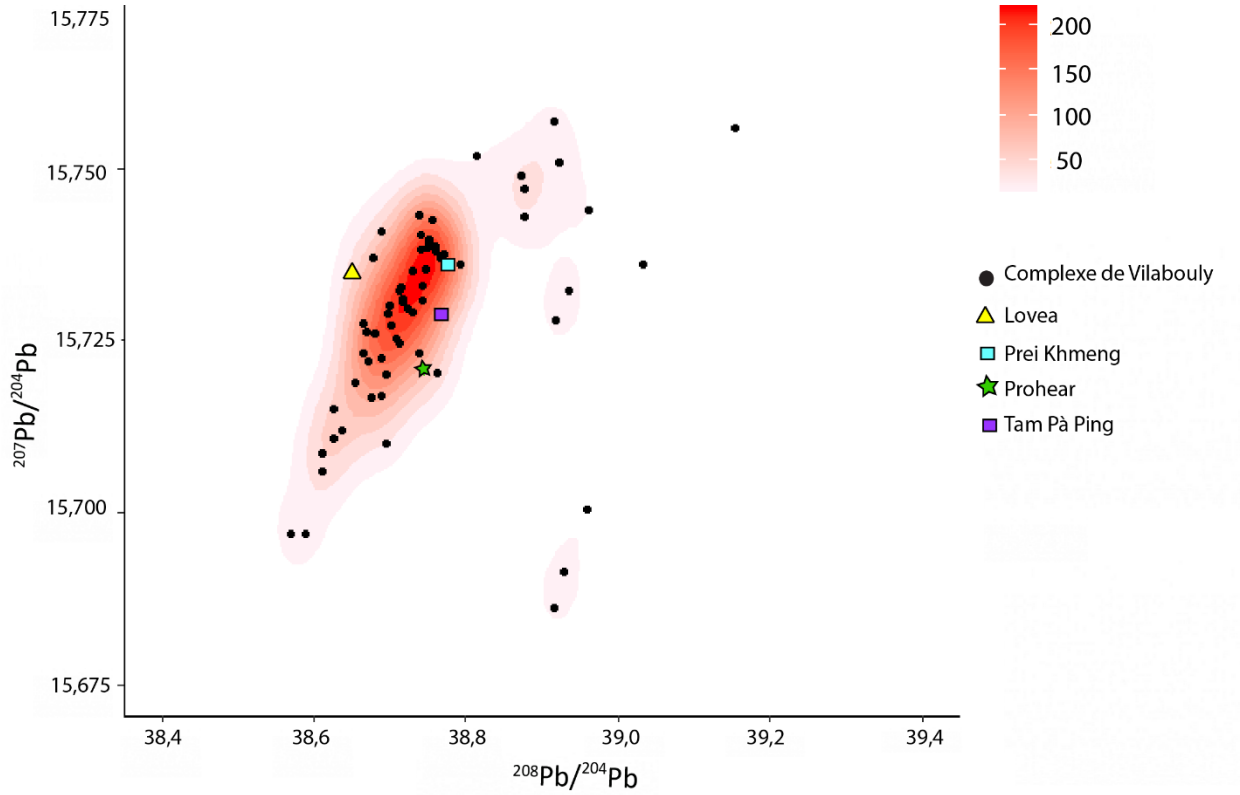


Figure 212 : Données isotopiques du plomb des objets d'autres sites avec une signature concordante au Complexe de Vilabouly représentés selon les rapports $^{206}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ et $^{206}Pb/^{204}Pb$.

En gardant à l'esprit que la sélection des échantillons répond à des limites archéologiques et à un accès au mobilier pouvant induire un biais dans les données, les objets avec une signature isotopique concordante au Complexe de Vilabouly (Figure 214) proviennent en majorité de Thaïlande (Non Ban Jak, Ban Non Wat, Tham Than Nam Lot Yai et Ban Chiang), du Cambodge (Lovea, Prei Khmeng et Prohear) et du Myanmar (Halin 29-1 et Oakaie 3). Au niveau des périodes d'activité associées aux sites de provenance de ces échantillons, la majorité sont contemporaine et donc concordante à la période d'exploitation du Complexe de Vilabouly (Figure 213), d'environ 300 av. J.-C pour Khao Sek à 700 ap. J.-C pour Prei Khmeng.

En revanche, certains échantillons concordants de Ban Chiang proviennent de contextes plus anciens, de l'âge du Bronze, datés d'environ 1000 av. J.-C (C. F. Higham, K. Douka, et T. Higham, 2015). Ces objets concordants au cuivre de VC renforceraient alors l'hypothèse que le site était actif dès l'âge du Bronze (T. O. Pryce, 2019). La majeure partie des preuves archéologiques pour les sites de production de VC suggère une période d'activité principale durant l'âge du Fer (voir Chapitre II). Comme nous l'avons déjà vu, certains éléments comme un type de tombe et des datations plus anciennes aux environs de 1000 av. J.-C (1071-922 calBC) obtenue pour des puits de mine, semblent venir progressivement introduire l'hypothèse d'une production, ou du moins d'une exploitation minière, dès l'âge du Bronze. Ces nouveaux éléments seraient alors en accord avec la concordance des signatures

isotopiques d'objets de l'âge du Bronze de Ban Chiang. Les zones de production identifiées à Vilabouly, PBL et TNN, sont datées de l'âge du Fer. L'activité minière aurait pu avoir lieu à Vilabouly durant l'âge du Bronze, en l'absence d'une activité de production qui aurait alors débuté plus tardivement, à l'âge du Fer. La matière première extraite à l'âge du Bronze aurait pu avoir été transformée sur d'autres sites. Ces hypothèses restent à être confirmées par de plus amples fouilles et campagnes de datations à Vilabouly.

Un seul autre objet à base de cuivre provenant du Laos a pu être analysé (TPP/1). Il s'agit de la hache en bronze du site de Tam Pà Ping, dans la Province de Houaphan évoquée au Chapitre I (T. O. Pryce et M. Cadet, 2018). Les résultats des analyses isotopiques font également partie de BROGLASEA et seront prochainement publiés. Les résultats montrent une forte concordance avec la signature du Complexe de Vilabouly (Figure 212). La sépulture d'où provient la hache a également pu être datée de l'âge du Bronze (aux environs de 1100-1000 av. J. -C). On identifie donc une nouvelle fois ici un objet de l'âge du Bronze, dont la signature correspond à celle de Vilabouly, venant ainsi renforcer l'hypothèse d'une activité durant cette période.

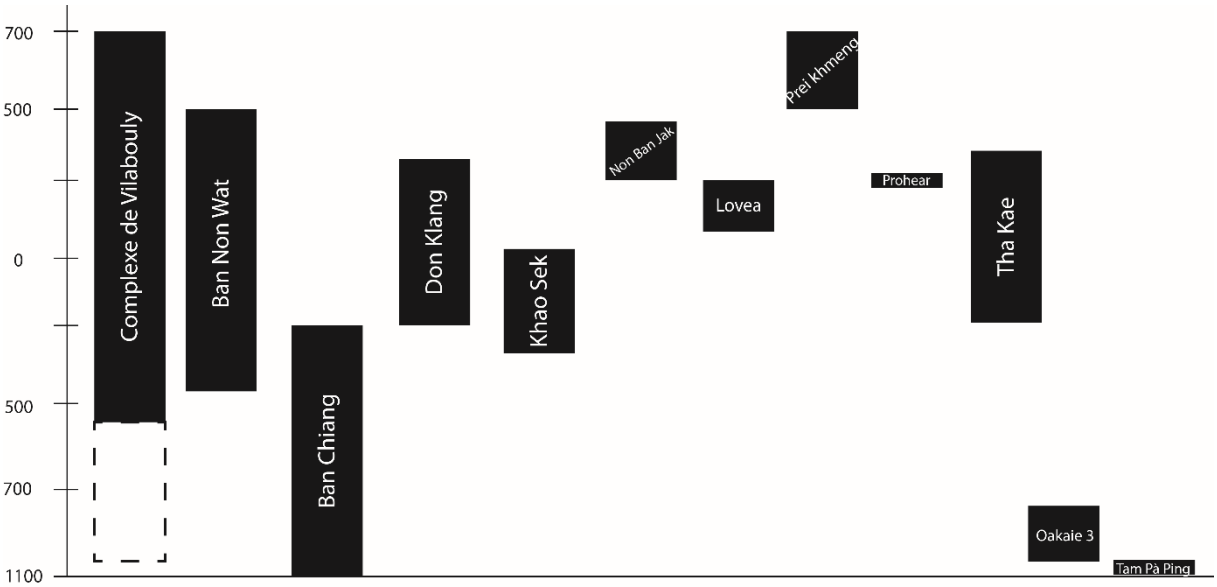


Figure 213 : Représentation des périodes chronologiques de sites pour lesquels des échantillons concordants à la signature de Vilabouly ont été identifiés. La zone en pointillé marque la période d'activité potentielle de l'âge du Bronze de Vilabouly.

Autres données intéressantes, le corpus d'objets en cuivre du centre du Myanmar a révélé des concordances avec la signature isotopique du Complexe de Vilabouly, suggérant que VC ait pu approvisionner des zones à priori aussi éloignées (Pryce et al, 2018). Les objets concordants à Vilabouly au Myanmar sont également associés à des datations de l'âge du Bronze. Les mêmes considérations que pour Ban Chiang et Tam Pà Ping doivent donc être prises en compte. L'étude d'un corpus d'objets de l'âge du Fer (Dussubieux et Pryce, 2016) du site de Nyaung Gon et Kan Gyi Gon a en revanche mis en avant une autre source de cuivre qui pourrait bien

se trouver au Myanmar ou dans une région voisine. Pour l'âge du Fer, aucun échantillon n'est concordant avec Vilabouly, ce qui pourrait indiquer un changement dans l'approvisionnement ou un approvisionnement différent pour le site de Nyaung Gon (J. P. Pautreau, A.-S. Coupey, et A. A. Kyaw, 2010) et Kan Gyi Gon (T. O. Pryce et al., 2016). Le corpus de Nyaung Gon se composait en partie d'objets qui pourraient s'apparenter à une forme de lingot ou de proto-monnaie, d'agglomérats de fils de cuivre non alliés, que nous avons déjà évoquée en partie VIII.1. Aux données de SEALIP, viennent maintenant s'ajouter celles de BROGLASEA, pour lesquelles les résultats semblent montrer des concordances entre la signature isotopique du site d'Halin 29-1 et celle de Vilabouly. Renforçant ainsi peut-être l'hypothèse d'un approvisionnement en provenance de l'actuel Laos ou d'une source de signature similaire. Ces données sont en cours d'étude et donneront lieu prochainement à des publications par T.O Pryce.

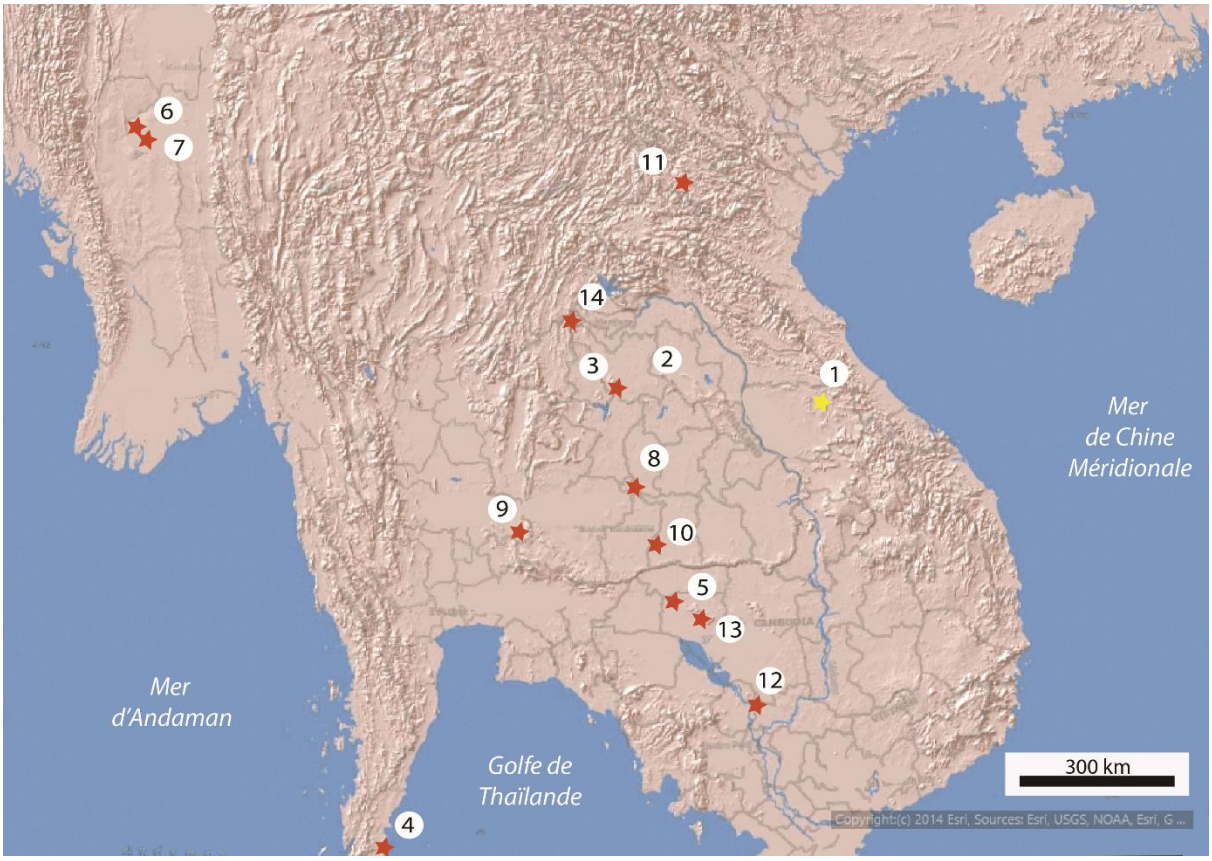


Figure 214 : Carte avec la localisation des sites pour lesquels la signature isotopique du plomb de Vilabouly a été identifiée : 1= Vilabouly, 2=Ban Chiang, 3=Don Klang, 4= Khao Sek, 5=Lovea, 6= Oakaie 3, 7= Mon Htoo, 8= Ban Non Wat, 9= Tha Kae, 10= Non Ban Jak, 11= Tam Pà Ping, 12= Prohear, 13= Prei Khmeng, 14= Phu Lon (crédit carte de base : ESRI).

De plus, il faut noter que la majeure partie des sites découverts sur le plateau du Khorat, au nord de la Thaïlande, comme les sites de Ban Chiang et Bon Non Wat se trouve dans des zones dépourvues en sources de minerais de cuivre. Les productions secondaires de cuivre identifiées à Ban Chiang et Ban Non Wat devaient donc s'approvisionner en cuivre dans des

régions quelque peu éloignées (V. C. Pigott, 2019, p.7). Dans leur article de 1996, Joyce White et Vincent Pigott proposent que Ban Chiang se soit approvisionné en cuivre dans des zones comme Phu Lon, au nord de la Thaïlande. Les données isotopiques semblent suggérer une autre hypothèse et l'existence de voies d'échange/contact vers l'actuel Laos (T. O. Pryce, 2019, p.62).

La signature isotopique des sites cambodgiens de Lovea, Prei Khmeng, Prohear et Phum Snay a été étudiée au cours de deux précédentes études (Y. Hirao et J.-H. Ro, 2013; T. O. Pryce et al., 2014; T. O. Pryce, D. O'Reilly, et L. Shewan, 2017). Ces sites sont des cimetières datés du milieu/fin de l'âge du Fer. La signature isotopique déterminée pour Lovea par Pryce et consorts offre une signature bien définie et proche de celle du Complexe de Vilabouly. La même constatation peut être faite pour la plus grande part des signatures de Prohear et Prei Khmeng. Le Cambodge et le Laos possèdent une voie de communication évidente via le bassin fluvial du Mékong, même si des obstacles comme des rapides le jalonnent, et qui aurait pu favoriser les échanges. Des études récentes de perles en pierre dures/verres et de la céramique de sites au Cambodge et en Thaïlande ont révélé la présence de réseaux intra-régionaux entre le delta du Mékong, le nord du Cambodge et la Thaïlande (A. K. Carter, 2015; M. T. Stark et S. Fehrenbach, 2019; A. K. Carter et al., 2020) dont nous reparlerons. De plus, comme nous l'avons vu dans la partie précédente, le Cambodge actuel possède peu de dépôts de minerais de base pour la métallurgie du cuivre. Une partie de son approvisionnement pourrait donc provenir d'ailleurs, comme pour le plateau du Khorat. On sait par la suite que durant la période angkorienne une voie de communication existait entre le centre de l'Empire angkorien et le sud du Laos dans la région du temple de Vat Phu (M. Hendrickson, 2007, 2010) où des dépôts de cuivre sont d'ailleurs connus. Cette voie de communication pourrait figurer des échanges déjà existants, antérieurs à la période angkorienne entre le sud du Laos et le Cambodge actuel.

Ces résultats montreraient en première approximation que les productions de Vilabouly se retrouveraient préférentiellement en Thaïlande et au Cambodge, ce qui serait en logique avec la géographie, alors que l'approvisionnement du Myanmar apparaît moins évident, mais serait à rapprocher des échanges maritimes (Pryce et al, 2018 ; voir partie VIII.2). Ces résultats sont également à rapprocher des campagnes d'échantillonnages qui ont donné particulièrement accès à des sites de Thaïlande et du Myanmar pouvant ainsi constituer un biais dans les résultats. Davantage de données sont nécessaires avant de pouvoir offrir une quelconque conclusion (Pryce et al, 2014), particulièrement pour le centre et le sud du Vietnam pour lesquelles les données sont encore absentes. Ces données seront prochainement complétées par les résultats de BROGLASEA, ainsi que nous l'espérons, par de futures recherches au

Vietnam, au Cambodge ou dans les îles de l'Asie du Sud-Est pour lesquels la production du cuivre est encore peu connue.

VIII.2.3. Comparaison avec d'autres réseaux d'échanges : les perles en verre

En plus des différents éléments liés à la production du cuivre à Vilabouly, un second type d'objet présent sur le site peut nous permettre d'appréhender les réseaux d'échanges. Il s'agit des perles en verre. En effet, un corpus de perles en verre a été mis au jour à TNN, en association aux jarres funéraires déjà évoquées (voir Chapitre II). L'analyse de perles en verre d'Asie du Sud-Est est également intégrée dans le cadre de BROGLASEA afin de comparer les réseaux d'échanges de métaux non-ferreux et de verre à la fin de la période préhistorique. Les réseaux de métaux et de verre sont directement comparables, car ils constituent des matériaux prisés, ayant largement circulé à la fin de la période préhistorique et dont les caractéristiques chimiques permettent d'appréhender les réseaux d'échanges par des analyses isotopiques et élémentaires. Ces données pour les perles lao s'insèrent également dans un travail plus large, conduit en grande partie par Laure Dussubieux, ayant permis la constitution d'une vaste base de données dont les résultats ont permis de fournir d'intéressantes caractéristiques sur les réseaux d'échanges de verre (L. Dussubieux, 2001; L. Dussubieux et B. Gratuze, 2003, 2010; L. Dussubieux et al., 2012; L. Dussubieux et T. O. Pryce, 2016; L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 a). D'autres études sur la composition et la circulation du verre sont également mises en place, notamment par Alison Carter (A. K. Carter et J. W. Lankton, 2012; A. K. Carter, 2016).

À la fin de la préhistoire, le verre sous forme transformée, mais également brute était exporté du sous-continent indien, puis transformé sur place en Asie du Sud-Est comme à Khao Sam Kaeo/Khao Sek, qui ont tous deux livré des preuves d'une fabrication secondaire locale (Dussubieux et Bellina, 2018). Les verres sodiques m-Na-Al sont caractéristiques des premiers réseaux d'échanges de verre entre le IVème et IIème siècle av. J.-C (Dussubieux et Gratuze, 2010), par exemple à Khao Sam Kaeo/Khao Sek, Ban Don Ta Phet (Thaïlande) et Giong Ca Vo (Vietnam) mais également dans la vallée de la Samon au Myanmar.

Le corpus comprend 16 perles en verre provenant du site de TNN qui a été analysé en laboratoire par Laure Dussubieux, par LA-ICP-MS au *Field Museum of Natural History* à Chicago (L. Dussubieux, *pers. comm.*)[46]. Les résultats apparaissent ici tout particulièrement intéressants, car ils constituent un des seuls autres matériaux étudiés et directement comparables à la production métallurgique de Vilabouly. Les résultats pour la poterie domestique devraient être disponibles également dans un futur proche (N. Chang, *pers.*

[46] Nous adressons ici tous nos remerciements au Dr. Dussubieux pour avoir partagé ces données non publiées qui sont d'un grand intérêt comparatif pour Vilabouly.

comm.). De plus, il s'agit du tout premier corpus de perles du Laos jamais étudié. Les perles sont toutes de couleur bleue, turquoise ou bleu foncé. Une corrélation certaine entre composition et couleur se distingue. Les perles bleues de cobalt sodique et potassique sont colorées avec un type très similaire de cobalt associé à du magnésium et du baryum. Malgré un nombre de perles étudié limité, deux principaux groupes de compositions semblent se détacher des résultats LA-ICP-MS. Quatre perles bleu foncé sont composées d'un verre sodique (Na_2O) et appartiennent au groupe défini comme m-Na-Ca-Al (Dussubieux et Gratuze, 2003 ; Dussubieux, 2001). Ce type de verre se retrouve largement distribué en Asie du Sud, du Sud-Est et au-delà, de 300 av. J.-C à 300 ap.-C, comme en Inde (Arikamedu), en Thaïlande (Phu Khao Thong, Khuan Lukpad, Ban Non Wat, Noen U-Loke), au Cambodge (Angkor Borei), au Vietnam (Lach-Truong), au Myanmar (Aw Gyi) ou en Indonésie (Ulu Leang, Gunung Wingo). Ce type de verre se retrouve principalement pour des sites côtiers ou des sites avec un accès à la baie du Bengale.

Ensuite, douze perles sont composées d'un verre potassique (K_2O) avec deux types : trois perles bleues de cobalt ont des teneurs faibles en oxyde de calcium, moyennes en aluminium (correspondant au groupe « *moderate Ca-Al-K* ») alors que les autres perles de couleur turquoise ont des teneurs faibles en oxyde de calcium, mais des teneurs plus élevées en aluminium (correspondant au groupe « *low Ca-high Al-K* »). Pour l'Asie du Sud-Est, du Sud et la Chine, les verres potassiques ont pu être divisés en trois grands groupes (L. Dussubieux et B. Gratuze, 2010; J. Lankton et L. Dussubieux, 2013) : « *high Ca-low Al-K* », « *low Ca-high Al-K* », « *moderate Ca-Al-K* ». La plupart des verres potassiques sud-est asiatiques appartient au groupe « *moderate Ca-Al-K* », alors que les verres potassiques en provenance de Chine ont une tendance à appartenir au groupe « *low Ca-high Al-K* ». Les verres potassiques sont généralement associés à des sites datés au plus tard du Vème siècle ap. J.-C.

Les deux types de verre identifiés à Vilabouly étaient donc en circulation durant la période de 300 av. J.-C à 300 ap. J.-C (L. Dussubieux, *pers.comm.*), donc durant la pleine période de la production métallurgique de Vilabouly. La présence de verre du groupe m-Na-Ca-Al à Vilabouly pourrait montrer que le site était intégré, de manière indirecte, aux mêmes réseaux d'échanges que la baie du Bengale, la péninsule thaï-malaise et également les côtes du Vietnam, et pourrait s'avérer intéressante pour appréhender la circulation du cuivre. Ces conclusions seront prochainement complétées par les résultats des analyses isotopiques de strontium-néodyme et de plomb qui sont en cours.

VIII.2.4. Modes de diffusion : le cuivre comme proxy aux interactions régionales

L'application des analyses isotopiques du plomb sur des corpus d'objets à base de cuivre d'Asie du Sud-Est a permis de mettre en avant la complexité des réseaux d'échanges de

métaux dans la région à la fin de la période préhistorique (Pryce et al, 2011 ;2014). Cette complexité reflète également celle, plus vaste, de diverses formes d'interactions entre les communautés présentes durant une période où la complexification socio-politique s'accroît pour donner naissance aux premiers sites hiérarchisés et complexes. La complexité des réseaux d'échanges de cuivre se perçoit notamment pour des sites proches comme Ban Non Wat et Ban Chiang pour lesquels les signatures isotopiques sont différentes, suggérant ainsi des sources de matières premières multiples (T.O. Pryce et al, 2014), même à l'échelle de micro-régions, ou encore la circulation de matières premières entre les sites de production primaire.

La période d'activité du Complexe de Vilabouly permet également d'étudier une période de transition d'un ensemble en mutation où chaque micro-région connaît des évolutions différentes, en fonction de sa géographie, de ses interactions, des communautés qui les occupent et où le Laos a reçu pour l'instant peu d'attention. L'étude des réseaux d'échanges peut alors permettre d'appréhender certaines facettes de ces mutations, car ils en sont partie intégrante, comme G. Condominas (1972, p.216) le mentionne :

> *« Exchange does not constitute a marginal activity, an occasional appendix to the functioning of the society but a strategic element of its structure. At the limit we can say that this society cannot subsist without exchanges. »*

Ainsi, la nature des interactions entre les différentes autorités socio-politiques passerait en partie par l'appréhension de la nature des réseaux d'échanges et de ce qu'ils reflètent de ces sociétés. Plus particulièrement quand les seuls témoins de cette période se retrouvent au travers de l'archéologie, principalement des objets en circulation. Différents types d'objets présents dans ces réseaux d'échanges ont déjà permis d'apporter des données déterminantes sur les formes d'interactions et d'échanges entre diverses zones géographiques d'Asie du Sud-Est, souvent sur de longues distances. Parmi ces types de biens, les perles en verre et les ornements en pierre dure sont ceux s'étant révélés les plus étudiés et les plus informatifs à ce jour. En effet, les données ont permis de définir des sphères d'interactions maritimes et terrestres, notamment celles de la mer de Chine méridionale et du Mékong au sein desquelles la place des métaux n'est pas encore pleinement comprise.

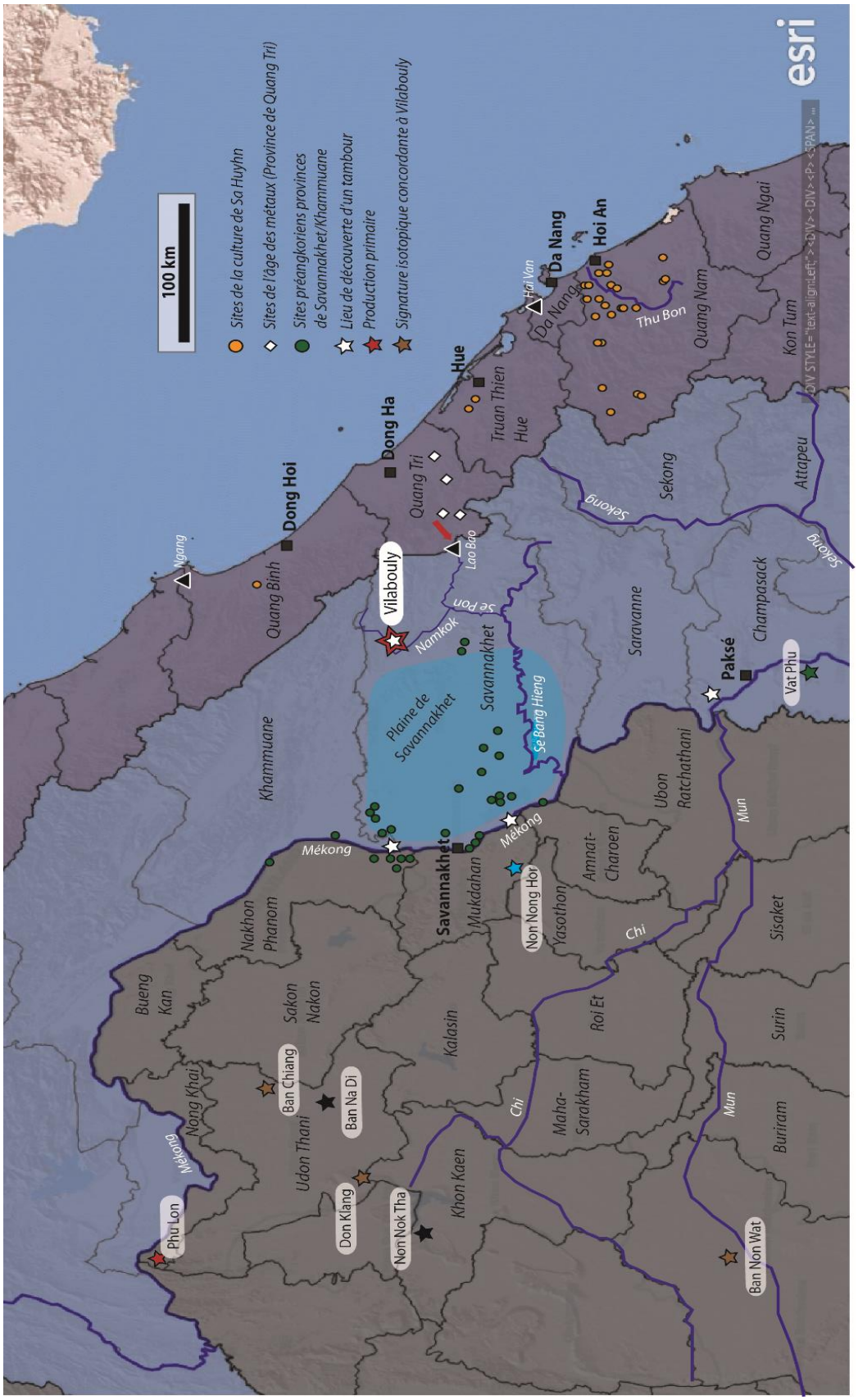


Figure 215 : Cartes localisant les sites archéologiques et lieux évoqués durant cette partie (crédit carte de base : ESRI).

1. Les ge et les tambours de Vilabouly : quelle(s) implication(s) ?

Les objets cuivreux découverts à Vilabouly sont presque tous d'un type utilitaire pouvant correspondre à un usage local, dont la plupart ont une typologie commune à de nombreux sites d'Asie du Sud-Est. Hormis deux types d'objets qui possèdent une typologie à priori non régionale : les *ge* et les tambours en bronze de type *Heger I*. Contrairement aux autres types d'objets, leur typologie nous permet de poser la question de leur origine. En effet, les tambours peuvent se rapprocher de la culture matérielle vietnamienne puisqu'ils sont généralement associés aux élites de la culture de *Dong son,* au nord du Vietnam d'où cette typologie est originaire. Les tambours se retrouvent également pour la culture de *Dian* dans le Yunnan, au sud de la Chine (D. Heger, 1902; A. J. Bernet Kempers, 1988; A. Calo, 2014; A. Yao, 2017).

La typologie des hallebardes *ge* a une origine chinoise : il s'agit d'un type d'arme qui était l'un des plus employés durant l'âge du Bronze et le début de l'âge du Fer chinois (1600-200 av. J.-C, Chiang, 2010; Lorge, 2012, p. 18-22), progressivement abandonné durant la période Han (206 av. J. C – 220 ap. J.-C). Ce type d'objet se retrouve largement dans des contextes funéraires, parfois avec des décors très élaborés, laissant penser qu'il s'agissait également d'objets rituels de prestige (Figure 216).

Avec l'accroissement des échanges, les tambours se retrouvent largement distribués en Asie du Sud-Est, avec parfois une adaptation locale des styles, particulièrement dans des contextes insulaires comme l'Indonésie et Sumatra (A. Calo, 2009). Le type de tambour *Heger I*, retrouvé à Vilabouly, semble le plus largement distribué en Asie du Sud-Est. La majorité des tambours dits de *Dong son* découverts se retrouve au Vietnam. Les tambours sont très fréquemment découverts en contexte funéraire comme à Prohear (Reinecke et al, 2009) ou des sites de la culture *Sa Huynh*, parfois enfouis à l'extérieur des sites de peuplement comme à Khao Sam Kaeo et à Vilabouly (VC/13). Les études ethnographiques ont montré que dans certains contextes les tambours de bronze étaient enterrés à l'extérieur des sites de peuplement encore récemment, et seulement déterrés pour des cérémonies, comme pour l'ethnie kantou au sud du Laos (Y. Goudineau, 2000).

Il ne faut pas exclure que ces types d'objets puissent également résulter de productions locales et non nécessairement d'imports (Ex : Non Nong Hor et Khao Sek). Dans ce dernier cas, une diffusion des répertoires stylistiques, et peut-être des techniques, doit être envisagée (T. O. Pryce et B. Bellina, 2017). Des tambours de type *Dong son* ont notamment été découverts au Cambodge, à Prohear daté de 400-150/100 av. J.-C jusqu'à 100 apr. J.-C (A. Reinecke, V. Laychour, et S. Sonetra, 2009), également au centre du Vietnam pour des sites de la culture *Sa Huynh,* et au sud de la Thaïlande (Khao Sam Kaeo/Kao Sek, Ongbah).

Le rayonnement des *ge* est moins vaste, mais on les retrouve tout de même jusqu'au sud du Vietnam (Hang Gon et Long Giao dans la province de Dong Nai) dont les datations absolues manquent, mais l'étude du mobilier les place à la fin du premier millénaire av. J.-C (E. Nitta, 2005). Eiji (2005) souligne que l'apparition des tambours en bronze de type *Heger I* et des hallebardes en bronze (*ge*) en Asie du Sud-Est serait concordante à l'émergence de chefferies puisqu'ils représenteraient des objets d'un statut économique et social élevé.

Les *ge* et les tambours ne doivent pourtant pas être seulement perçus en leur qualité de « biens de prestige » afin d'expliquer leur distribution. En effet, les tambours à base de cuivre font toujours partie de la culture matérielle sud-est asiatique de nos jours. Les tambours sont toujours présents pour certaines communautés, comme les kantou au Laos où ils revêtent un caractère cérémoniel pour l'ensemble d'un village, « *les tambours en bronze sont perçus par les villageois, et reçus (legs d'une transcendance) comme l'expression de la mise en place d'une totalité organisée* » (Y. Goudineau, 2000, p.555). Les tambours pouvaient également servir de « *prestations matrimoniales* » entre familles au nord du Laos. Au sud du Laos, les tambours peuvent être la possession d'un village, non d'une famille ou d'une seule personne. Bien plus qu'un bien de prestige associé à une « élite », on perçoit alors la forte symbolique, même immatérielle, toujours attachée à ce type d'objet.

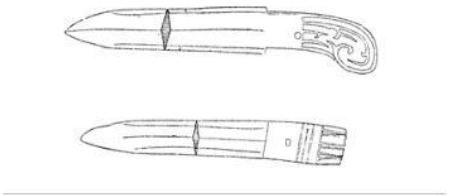


Figure 2. Two ge *from Erlitou (reproduced from Erlitou Working Team 1976).*

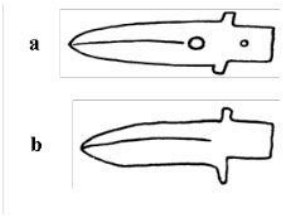


Figure 3. (a) Typical ge *of the middle Shang Dynasty. (b) Typical* ge *of the late Shang Dynasty.*

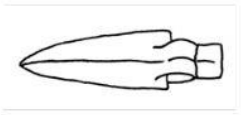


Figure 4. Bronze ge *with shaft tube.*

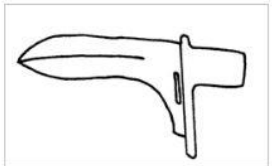


Figure 5. Typical bronze ge *of the early Western Zhou Dynasty.*

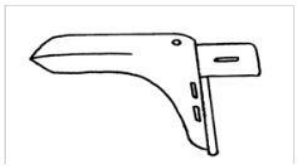


Figure 6. Typical bronze ge *of the late Western Zhou and early Spring and Autumn periods.*

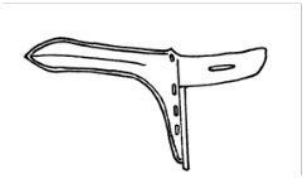


Figure 7. Typical bronze ge *of the Warring States period.*

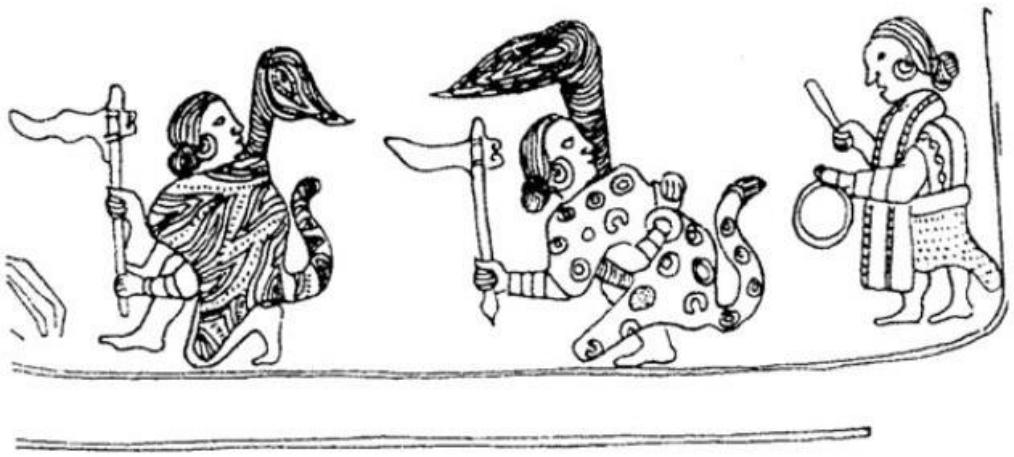


Figure 216 : En haut, les différents types de ge répertoriés par (P. Chiang, 2010). *En bas, représentation iconographique de dagues ge dans le décor d'un tambour en bronze type Heger I découvert à Shizhaishan, Yunnan (d'après Yi Xuezhong, 1993).*

Rappelons également que les chefferies du sud de la Chine (dont *Dian* et *Yelang*) ainsi que le nord du Vietnam, la région de Bac Bo où se situe la culture de *Dong son,* sont progressivement intégrées dans l'Empire Han à la fin du premier millénaire av. J.-C et au tout début du premier millénaire ap. J.-C. Dans cette partie de l'Asie du Sud-Est, des groupes Han se sont donc implantés durablement et ont progressivement mis en place leur administration. Le cas du nord du Vietnam est à part, car il est le seul territoire d'Asie du Sud-Est qu'on sait avoir été envahi et sous influence chinoise durable, par des sources textuelles notamment (Allard, 2005). En revanche, il est encore difficile d'établir jusqu'où l'influence chinoise prenait part dans le restant de l'Asie du Sud-Est. Les signes de contacts, du moins indirects, avec la Chine sont nombreux durant l'âge du Fer avec l'intensification de la route maritime de la soie, reliant notamment l'Asie du Sud à la Chine. La découverte d'objets chinois sur les côtes du Vietnam et la péninsule Thaï-malaise atteste également de ces contacts (L. T. M. Dzung, 2009; T. O. Pryce et al., 2017; B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019). On retrouve ces signes jusqu'à l'intérieur des terres, notamment au centre du Vietnam et jusqu'au Cambodge puisqu'une pièce de monnaie Han (Période de Wang Mang, 7-23 ap. J.-C) a été découverte pour le site de Lovea (D. J. O'Reilly et L. Shewan, 2015). Ces échanges impliquaient donc la circulation, tout du moins de biens, et peut-être de marchands, ayant apporté avec eux ces objets importés en Asie du Sud-Est.

Une étude de la répartition des tambours de type *Dong son* en Asie du Sud-Est a été entreprise par Ambra Càlo et publiée lors de deux ouvrages en 2009 et 2014. Précédemment, ce type d'objet avait déjà reçu beaucoup d'attention (e.g. D. Heger, 1902; A. J. Bernet Kempers, 1988). L'étude de A. Càlo s'est particulièrement concentrée sur l'étude des tambours dans les parties insulaires (Indonésie), mais elle avait pour objectif de fournir une carte de la répartition des

tambours de type *Dong son,* qui servirait ainsi de proxy à l'identification de potentielles routes d'échanges entre les différentes communautés d'Asie du Sud-Est.

Une forte concentration de tambours se retrouve au centre du Vietnam et à proximité du Mékong. Dans la région centrale du Vietnam, Càlo (2009, 2014) identifie la présence d'environ 40 tambours à base de cuivre de type *Dong son* dont la majorité a été découverte le long des côtes. Certains proviennent également de sites de l'intérieur des terres, dans les provinces de Gia Lai, Dac La et Lam Dong, dans la région de Binh Tri Thien. Pour la chaîne annamitique, le Laos et le nord de la Thaïlande, une distribution de tambours *Dong son* peut être identifiée le long ou à proximité des rivières.

Des tambours de type *Heger-I* ont été découverts à différentes localisations le long du fleuve Mékong comme noté par Eiji (2005), Lorrillard (2014), Càlo (2014). Dix tambours ont été découverts dans le bassin du Mékong selon Eiji (2005), dont quatre au Laos (Figure 215). La majorité des tambours cités ici n'est pas associée à un contexte archéologique, et n'a jamais été analysée. Les tambours découverts à Vilabouly sont donc les seuls associés à un contexte archéologique précis au Laos. Selon Eiji, les zones de découvertes des tambours le long du fleuve Mékong se retrouveraient également à des points stratégiques où des caractéristiques géographiques (rapides, chutes d'eau, embouchures de rivière) interrompent le transport fluvial et pourraient donc permettre un certain contrôle. Selon Càlo (2014), en suivant la distribution des tambours à base de cuivre au Laos (dont seuls ceux de Vilabouly proviennent d'un contexte défini), leur concentration nous mène dans la région où le Mékong rejoint les systèmes des rivières du Mun et du Chi dans la province actuelle d'Ubon Ratchanie (Figure 215) en Thaïlande. Dans cette région, à la fin de l'âge du Fer, des sites importants se développent, où d'autres sont déjà présents.

La situation géographique de certains sites anciens peut s'expliquer par la présence de ces emplacements privilégiés, permettant un contrôle des biens, mais pouvant également pour les marchands/voyageurs, constituer des points de passages importants, des « comptoirs » :

> *« We can for instance observe a fairly high degree of correspondence between the location of the first historic sites in the Mekong middle valley and the places where the bronze drums […] have been discovered. A significant number of these ceremonial objects have been found in the Se Bang Hieng basin (Phin, Phalanxai and Xonburi districts), not far from the Annamite range, but also on the banks of the Mekong up to the confluence with the Mun, and its basin. »* (M. Lorrillard, 2014, p.205)

Le contrôle des voies de communication et d'échanges est alors d'une grande importance, car une position géographique favorable offre un avantage pour le commerce et peut offrir une grande concentration de biens de différentes origines. Bien qu'on se situe dans un contexte différent, l'importance de la position géographique a tout particulièrement été démontrée pour des sites côtiers comme Khao Sam Kaeo (B. Bellina, 2014) ou les sites à l'embouchure du Mékong (A. Carter et N.C. Kim, 2017 ; Manguin, 2009 ; Manguin, 2000). La même caractéristique pourrait être vraie pour des sites de l'intérieur des terres dont la situation géographique, proche d'un réseau fluvial ou d'une zone propice à la circulation des biens/personnes, ainsi qu'un accès aux ressources, offre un avantage privilégié.

Un tambour de type *Dong son* a été déterminé concordant avec la signature isotopique de Vilabouly. Il s'agit du tambour de Khao Sek. Le site de Khao Sek a été présenté durant le premier chapitre. Nous ne reviendrons que brièvement ici sur les éléments intéressants à ce développement. Le site de Khao Sek, associé également au site plus vaste de Khao Sam Kaeo, est tout particulièrement intéressant, car son emplacement géographique lui offre une ouverture importante sur le commerce maritime et une grande concentration d'artisanats et de biens. De plus, les sites de KS et KSK étaient en activité durant une période contemporaine à Vilabouly, permettant ainsi une comparaison directe. L'étude du tambour mis au jour à KS a permis de démontrer que malgré une typologie typiquement *Dong son*, son alliage composé seulement de cuivre et sa microstructure ne correspondent pas aux exemples de tambours *Dong Son* déjà étudiés (T. O. Pryce et al., 2014). L'alliage généralement identifié pour les tambours correspond à des bronzes contenant du plomb. Ce tambour pourrait être attribué à un ancien faux, reprenant le répertoire stylistique des tambours de *Dong son* mais avec une technique de fabrication différente démontrant des compétences moins élevées (T. O. Pryce et B. Bellina, 2017).

Même si la signature isotopique du tambour de KS indique une forte concordance avec celle du Complexe de Vilabouly, signifiant que le cuivre employé pour sa production pourrait provenir de cette source, le lieu de fabrication de cet objet est difficile à déterminer en l'absence de preuves pour la réalisation de tambours à KS, mais également à Vilabouly. Le tambour aurait pu être produit à Vilabouly puis exporté à KS, produit sur un autre site, ou bien produit à KS avec du cuivre de Vilabouly (T. O. Pryce et B. Bellina, 2017). Il faut tout de même noter que l'exemple de tambour de Vilabouly ne possède pas le même alliage, car il se compose d'un alliage ternaire (Cu-Sn-Pb). Toutefois, cette observation revêt une implication intéressante pour la production de cuivre de Vilabouly. La présence d'un objet avec la signature isotopique de Vilabouly à KS montre la grande distribution du cuivre de Vilabouly en Asie du Sud-Est, de même que la grande distribution des tambours et de leur répertoire stylistique. De plus, il est présent pour un site dont la situation géographique le place au

carrefour de voies maritimes et regroupe divers types de biens et d'artisanats, pouvant ainsi avoir contribué à la diffusion de la matière première du cuivre.

Une influence nord-vietnamienne ?

La production d'un type d'objet appartenant à la culture matérielle chinoise (*ge*), évoquée en partie VI.5, potentiellement avec du cuivre de Vilabouly renvoie à des implications fortes pour l'histoire des communautés locales sur les questions de transmissions techniques et de mouvements de population. En effet, la présence de ces objets, dont au moins un produit avec du cuivre de Vilabouly, pourrait indiquer la présence de contacts indirects avec le Vietnam ayant amené à la production locale d'un type d'objet appartenant à la culture matérielle chinoise. La production de *ge* locale à Vilabouly impliquerait alors des transferts techniques et stylistiques au Laos, bien plus que des échanges d'objets. Pour aller encore plus loin, la présence d'artisans et/ou de communautés non locales provenant de l'actuel Vietnam et/ou de Chine dans la région de Vilabouly est également à considérer, bien que d'autres études soient nécessaires afin de conforter cette hypothèse.

De plus, nous avons mentionné les différences de « qualité » observées entre le *ge* de Puen Baolo (plus riche en étain, martelé/recuit) et les *ge* (musée de Vilabouly) découverts hors contexte de fouille (brut de fonderie, plus pauvre en étain). Cela pourrait être indicatif de niveaux de compétences différents : le *ge* de Puen Baolo d'un artisan expérimenté maîtrisant la technique et les *ge* du musée d'un savoir-faire technique moins élevé. Ainsi, les *ge* du musée pourrait résulter d'un transfert technique, un apprentissage encore non maîtrisé ou non recherché. Nous y reviendrons, mais c'est sur ces niveaux techniques de compétences difficiles à acquérir pour les pierres dures que Bérénice Bellina a pu proposer la présence d'artisans indiens à Khao Sam Kaeo (B. Bellina, 2001, 2007)

Une étude typologique des *ge* de Vilabouly a également été menée (Livingston. C, 2014) montrant, peut-être sans surprise, une association aux *ge* vietnamiens. Un autre exemple d'étude typologique de *ge* a été mené par Eiji (2005) sur un corpus de hallebardes du site de Long Giao au Vietnam, indiquant qu'elles pourraient avoir été produites localement, ou du moins avec un style local, inspiré des hallebardes *ge* chinoises. Les *ge* étudiés par Eiji ne correspondent pas aux *ge* mis au jour à Vilabouly.

Le même décor utilisé sur les hallebardes se retrouverait également pour les tambours en bronze de type *Heger I,* toujours selon Eiji, mais un travail de typologie comparative n'a jamais été mené de manière globale pour le *ge* et les tambours d'Asie du Sud-Est, ni même du Vietnam. La présence de *ge* se retrouve pour des sites au Vietnam de la culture *Sa Huynh*, dans des contextes funéraires associés à des élites, comme c'est le cas par exemple à Hang Gon ou Long Giao (Eiji, 2005). La présence de ces objets à Vilabouly montre au minimum

l'existence de contacts entre ces communautés, l'appropriation locale de typologies et/ou de techniques appartenant à la culture matérielle chinoise, attestant donc au minimum de contacts indirects.

L'hypothèse d'un contact et de transfert technologique depuis le Vietnam trouve des limitations dans le manque de données disponibles. De plus, durant l'âge du Fer, les découvertes archéologiques et les recherches ne permettent pas encore de définir la nature exacte des contacts entre les deux grandes cultures connues que sont *Dong son* au nord et *Sa Huynh* au centre, tout comme l'étendue de leurs réseaux vers l'intérieur des terres. Après la conquête Han et l'établissement des trois commanderies au nord du Vietnam (*Jiuzhen*, *Jiaozhi* et *Rinan*) qui auraient été stimulés par une volonté d'accès aux réseaux maritimes vers l'Asie du Sud, la nature de ces contacts n'est pas davantage connue. Hormis par la présence d'objets de style chinois pour des contextes de la culture *Sa Huynh* déjà évoqué (M. Yamagata, D. Manh Pham, et B. Chi Hoang, 2001; M. Yamagata, 2007) comme des miroirs ou des céramiques Han. Le peu de données empêche de discuter pleinement leurs potentielles relations avec la région du Complexe de Vilabouly, mais il apparaît pertinent d'évoquer certains aspects.

La présence de groupes d'immigrés d'origine chinoise/indienne en Asie du Sud-Est, ou du moins d'artisans et/ou de marchands a déjà été proposée pour différents contextes, avec plus ou moins de signes forts. Par exemple, à Khao Sam Kaeo, qui comme on l'a vu durant le Chapitre I, occupait une place stratégique donnant lieu à un foisonnement d'échanges et à la mise en place de certaines productions organisées en quartier, comme le verre ou le métal. L'étude de ce site a permis de montrer que la qualité technique de certains objets lithiques retrouvés (agate et cornaline) pourrait impliquer, au minimum, la présence d'artisans spécialisés provenant d'autres régions, ayant apporté leurs savoir-faire à Khao Sam Kaeo (B. Bellina, 2001, 2014, 2017, 2018 a; B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019).

La même hypothèse a été soulevée par Hung et consorts par l'étude d'ornements en néphrite attestant de liens entre l'Asie du Sud-Est et Taïwan. Contrairement à l'agate et à la cornaline de KSK, les données techniques sont manquantes pour la néphrite afin d'en attester. En effet, c'est également la présence d'analogues éthographiques en Inde qui ont permis ces conclusions pour la péninsule Thaï-Malaise (V. Roux et J. Pelegrin, 1989; V. Roux, B. Bril, et G. Dietrich, 1995). La tracéologie est impossible pour la néphrite à cause des caractéristiques de la pierre. Les études se basent donc uniquement sur des analyses microstructurales et compositionnelles. Deux formes caractéristiques d'objets en néphrite se retrouvent distribuées autour de la mer de Chine méridionale durant l'âge du Fer (H. C. Hung et al., 2007). Des études ont montré qu'une grande partie de ces objets a été façonnée à partir d'une néphrite originaire de Taïwan. Des groupes d'artisans restreints seraient à l'origine de cette

production, car la forme standard de ce type d'objets ne semble pas montrer de productions distinctes et nécessite un savoir-faire précis (H. C. Hung et al., 2007, p.19749). Ces groupes d'artisans spécialisés auraient également pu être itinérants afin de produire ces objets dans les lieux où la demande se trouvait. En effet, certains de ces objets en néphrite originaire de Taïwan ont été mis au jour à Khao Sam Kaeo, mais également sur les côtes centrales du Vietnam, à Go Ma Voi par exemple. A Khao Sam Kaeo, des débris liés à la fabrication d'objets en néphrite ont été découverts, mais l'absence de données techniques ne permet pas de démontrer la présence d'artisans originaires de Taiwan (ou d'un autre lieu), qui seraient à l'origine de cette production d'objets en néphrite. Les cas évoqués ici pour illustrer la potentielle mobilité des artisans et/ou de groupes de populations ne doivent pas être isolés et doivent prendre plusieurs formes en fonction des contextes.

Les deux tambours *Dong son* de type *Heger I* découverts à Vilabouly enrichissent également ce débat. Leur signature isotopique ne correspond pas à celle du complexe, l'un d'eux contenait du plomb. Pour le second la détermination de l'alliage n'a pas été possible à cause de son état d'altération. Néanmoins, leur découverte sur le site pose la question de leur(s) origine(s), du moins stylistique. La plupart des tambours d'Asie du Sud-Est analysés jusqu'alors sont composés d'un alliage contenant du plomb (T. O. Pryce et al., 2014). Les résultats isotopiques correspondent alors aux réseaux d'échanges de plomb. Cependant, les données de composition ou de microstructure sont variées et ne semblent pas présenter un ensemble homogène signifiant que ce type d'objet pourrait être produit à divers endroits et pas nécessairement seulement au nord du Vietnam (C. Le Meur et al., 2021). Les tambours en tant qu'objet ne seraient donc pas les seuls à circuler, les techniques nécessaires à leur fabrication également, dont la transmission varierait (ex. : le tambour de Khao Sek, T. O. Pryce et B. Bellina, 2017). À Vilabouly, aucune trace de la fabrication locale de tambour n'a été mise en évidence à ce jour, bien que l'étendue de la zone archéologique laisse penser que certaines zones n'ont pas encore été découvertes ou sont détruites. En première approximation, l'origine de ces objets peut donc être perçue comme extérieure à Vilabouly.

L'étude de Càlo offre d'intéressantes hypothèses sur l'existence des anciennes voies d'échanges, tout particulièrement entre le Vietnam, le Laos et la Thaïlande actuels même si davantage de données seraient encore nécessaires. En effet, une ancienne voie de communication entre le centre du Vietnam et le nord de la Thaïlande, en passant par la chaine annamitique et le Mékong au Laos, a déjà été proposée par plusieurs chercheurs (C. F. Higham, 1996, 2002; A. Reinecke, L. D. Son, et L. D. Phuc, 1999), en se basant notamment sur la géographie, mais également sur la culture matérielle. Ces voies d'échanges pourraient s'étendre jusqu'au sud du Cambodge et du Vietnam actuels dans le delta du Mékong. En effet, l'étude du mobilier de cette région a révélé la présence de réseaux d'échanges intrarégionaux

pour le bassin du Mékong, du sud du Vietnam jusqu'en Thaïlande (A. K. Carter, 2015; M. T. Stark et S. Fehrenbach, 2019; A. K. Carter et al., 2020).

Higham (1996, p. 151) évoque des comparaisons stylistiques entre des moules de fonte du site de Dong Dau (proche de Hanoï) au Vietnam et des moules découverts sur le plateau du Khorat en Thaïlande. Il parle alors d'échanges possibles entre la vallée du fleuve rouge au nord du Vietnam et le plateau du Khorat, via la chaine annamitique. Les préhistoriens avaient déjà supposé un rapprochement entre la concentration des sites de l'âge du Bronze et du Fer des plaines de Hûe et Dong Hoï au centre du Vietnam (Figure 215), avec un ensemble de sites du plateau du Khorat, via une communication par la province de Savannakhet (C. F. Higham, 2002, p.117,157,168).

Les échanges entre le Vietnam et le nord du Laos ont également été évoqués par l'étude des sites de la Plaines des Jarres dans la Province de Xieng Khouang (voir Chapitre I) ainsi que d'autres sites où des inhumations en jarres ont été mises au jour autour de la ville actuelle de Luang Prabang et à Lao Pako (proche de Vientiane). En effet, certaines découvertes, notamment des ornements en pierre et en verre, avaient permis à Colani (1940) de suggérer un lien entre les sites de la Plaine des Jarres et la culture *Sa Huynh* avec sa tradition d'inhumation/crémation en jarres. Avec les nouvelles datations de la Plaine des Jarres, il apparaît maintenant que ces sites puissent être finalement plus récents que l'âge du Fer, puisque les datations principales se situent entre le Xème et XIIème siècle ap. J.-C (D. O'Reilly et al., 2019; L. Shewan et al., 2021), avec quelques dates durant l'âge du Bronze pour une zone, mais sans culture matérielle associée.

Reinecke et consorts évoquent ces mêmes voies d'échanges entre le nord du Vietnam, le centre du Vietnam et le plateau du Khorat (A. Reinecke, L. D. Son, et L. D. Phuc, 1999, p.31-35). Les auteurs proposent une route de communication reliant le nord et le centre du Vietnam entre les collines de Hoan Son (Province de Ha Tinh), au col de Ngang dans le nord et les collines de Bac Ma, au col de Hai Van (Province de Thua Thien Hue) au sud (Figure 215), principalement via une observation des voies logiques de communications géographiques. En revanche, cette hypothèse souffre du peu de données concrètes disponibles pour le moment. Reinecke et consorts appuient leur discours sur la découverte d'un type particulier d'objets, qui selon eux illustre la présence de ces contacts entre les communautés des côtes centrales du Vietnam et du plateau du Khorat : il s'agit de bracelets dont les décors avec des boutons n'appartiennent pas au répertoire stylistique de la culture de *Dong son*. Cette hypothèse, reposant uniquement sur des comparaisons stylistiques, nécessite davantage de données afin d'être confortée, mais elle constitue une intéressante piste.

La zone située entre ces deux passes, plus particulièrement la province de Quang Tri, serait également un potentiel lien vers le sud-ouest, au travers de la chaine annamitique. Dans cette zone, aux environs de la ville actuelle de Dong Ha, la chaine annamitique peut être traversée plus facilement qu'ailleurs au Vietnam, par l'existence de passes, plus particulièrement à Lao Bao ou Aï Lao (A. Pavie, 1902). Dans la province de Quang Tri, quatre sites attribués à l'âge des métaux ont pu être identifiés par l'équipe de recherche (A. Reinecke, L. D. Son, et L. D. Phuc, 1999) *:* les sites de Ba Löng, Bän Väng, Huyen Cü et Nhü Le. De plus, cette région donne ensuite accès à la plaine de Savannakhet au Laos, permettant un accès au Mékong et au plateau du Khorat à l'ouest. Le réseau de rivières de cette région centrale du Vietnam aurait alors facilité les échanges entre la côte et l'intérieur des terres dès la fin de préhistoire, et peut-être même antérieurement. Nous avons également vu, par un exemple ethnographique dans la province de Quang Tri, que des échanges entre les communautés des côtes et des montagnes avaient toujours lieu dans cette région (T. K. Phương, 2019).

Ainsi, ces hypothèses manquent pour l'instant de données, par un manque de sites archéologiques découverts et étudiés notamment, afin d'être confortées. L'étude du Complexe de Vilabouly, dans la province de Savannakhet, frontalière à celle de Quang Tri au Vietnam, pourrait constituer un premier maillon à cette hypothèse de voie de communication terrestre entre les côtes du Vietnam, le plateau du Khorat et le Cambodge au sud (voir figure 215). De ce fait, elles pourraient expliquer la position géographique de Vilabouly et le rayonnement de ses productions perçues au travers de certaines données isotopiques.

2. Le plateau du Khorat et le site de Non Nong Hor

En suivant cette hypothèse d'une voie de communication et d'échange entre les côtes du Vietnam et le plateau du Khorat via la chaine annamitique au Laos, il nous faut évoquer le nord de la Thaïlande et plus particulièrement le plateau du Khorat. Le plateau du Khorat occupe le nord-est de la Thaïlande, bordé au nord et à l'est par le fleuve Mékong (et le Laos), à l'ouest par les chaines Phetchabun et au sud par les montagnes Dangrêk (E. Moore, 1988). Il contient deux bassins versants majeurs : le Sakon Nakhon au nord et le bassin du Khorat au sud. Le bassin du Khorat est alimenté par les rivières Mun et Chi, rejoignant le Mékong. Comme nous l'avons évoqué, le plateau du Khorat est une région pauvre en dépôts métalliques. Les matières premières employées par les différents sites de métallurgie de l'âge du Bronze et du Fer identifiés dans cette région doivent donc principalement provenir d'ailleurs.

En effet, le plateau du Khorat compte une concentration de sites de la fin de la période préhistorique (voir Chapitre I) pour lesquels des activités métallurgiques secondaires ont été identifiées et dont certains objets sont concordants avec Vilabouly (voir partie VIII.2). Le cuivre

de Vilabouly aurait donc circulé et approvisionné certains sites du plateau du Khorat, confortant ainsi l'idée de voies d'échanges entre les deux zones géographiques. Le cuivre de Vilabouly a donc circulé du centre du Laos vers le plateau du Khorat, peut-être via les bassins versants des rivières Chi et Mun qui rejoignent le Mékong au centre du Laos. Comme nous le verrons, le Complexe de Vilabouly est également relié au Mékong via le réseau de rivières, mais également par un accès de la plaine de Savannakhet a seulement 135 km.

Un autre site du plateau du Khorat, que nous avons déjà évoqué au Chapitre I, mérite une attention particulière : Non Nong Hor (Figure 215). En effet, les sites attestant de la production de tambours sont très rares en Asie du Sud-Est, et même quasi absents au nord du Vietnam qui semble pourtant être un des lieux privilégiés pour la production des tambours, mais pour lequel seul un fragment de moule a été découvert (C. Le Meur et al., 2021). La fonte à la cire perdue pourrait avoir été utilisée pour les tambours, ce qui rend généralement des moules brisés et fragiles pouvant expliquer pourquoi ils sont absents.

Le site de Non Nong Hor a livré des signes intéressants d'une production secondaire de cuivre et notamment de tambours, la première pour la Thaïlande. Le site présente également une similitude avec le Complexe de Vilabouly. En effet, des lingots coniques similaires à ceux mis au jour à Vilabouly (S. Baonoed, 2016; T. O. Pryce et B. Bellina, 2017) ont été découverts à Non Nong Hor (Figure 217). On pourrait envisager que Vilabouly ait pu fournir en cuivre, avec les lingots coniques, le site de Non Nong Hor sur le plateau du Khorat, situé à 160 km, à la frontière avec la province de Savannakhet. De plus, le site de Non Nong Hor a également livré un corpus de creusets complet avec différentes dimensions, dont certains sont similaires aux creusets déjà mentionnés en partie VIII.1 pour les sites de productions secondaires du plateau du Khorat, à savoir de petits creusets ouverts avec un bec de coulée. En revanche, d'autres types de creusets, plus profonds avec un fond plat, ont également été découverts, et semblent davantage appropriés à la fonte de tambours qui nécessitent de larges volumes de métal fondu.

Le mobilier de Non Nong Hor est en cours d'étude, mais à notre connaissance aucune analyse en laboratoire n'a encore été effectuée. Jusqu'à ce que davantage d'informations soient disponibles, la comparaison se base donc uniquement sur la typologie. Autre fait intéressant, Non Nong Hor serait un site de production de tambours. On pourrait donc envisager que les tambours de type *Heger-I* de Vilabouly et de sa région aient été produits à Non Nong Hor, en l'absence pour l'instant de signe d'une production à Vilabouly. Cette hypothèse nécessiterait d'être vérifiée par de plus amples études du mobilier de Non Nong Hor, notamment des lingots, mais elle constitue une potentielle piste à poursuivre.





Figure 217 : Haut, les lingots coniques découverts à Non Nong Hor (11ème FAD regional office, 2010, p. 94 ; Lertlum et al, 2010, p. 211). Bas, exemples de lingots coniques de Vilabouly.

3. Le centre du Laos et le Mékong

Les recherches au Laos (M. Lorrillard, 2010, 2011, 2014) sont maintenant concentrées sur la compréhension des périodes préangkorienne (500-800 ap. J.-C) et de leur organisation sur le territoire, en lien au phénomène « d'indianisation » (I. C. Glover, 1990; B. Bellina et I. C. Glover, 2004; B. Bellina, 2014) qui se fait percevoir par l'émergence de l'Empire khmer et de l'influence Môn-thaï au Laos. Comme nous l'avons mentionné (voir Chapitre I), très peu de

données sur le Laos à la protohistoire sont disponibles. Nous avons alors étendu nos recherches vers des périodes plus récentes et qui semblent pouvoir ouvrir d'intéressantes pistes. Des sites de la période préangkorienne ont pu être identifiés jusque dans la province de Khammouane (Figure 215), alors que le nord du pays offre davantage d'évidences de l'implantation de la culture Thaï-Lao durant le second millénaire ap. J.-C. Dans les zones centrale et sud du Laos, environ 80 sites de la seconde moitié du premier millénaire ap. J.-C ont pu être identifiés. Il s'agit de sites de langue khmère et Môn, dont l'implantation semble suivre une logique liée aux voies fluviales (M. Lorrillard, 2010).

Le rôle joué par le Mékong et ses affluents apparaît décisif pour le développement des entités locales. Dans la province de Savannakhet, deux affluents principaux du Mékong sont identifiés : le Se Bang Hieng au sud et le Se Bang Fai au nord (Figure 218). La Province de Savannakhet possède une large plaine comparable à celle de Vientiane, ce qui en fait donc une zone attractive de peuplement, car le développement des cultures y est propice. La Se Bang Hieng possède également de nombreux affluents, conférant à la plaine de Savannakhet, sa fertilité. De plus la plaine s'ouvre sur les bassins inférieurs des rivières Chi et Mun en Thaïlande, sur le plateau du Khorat.

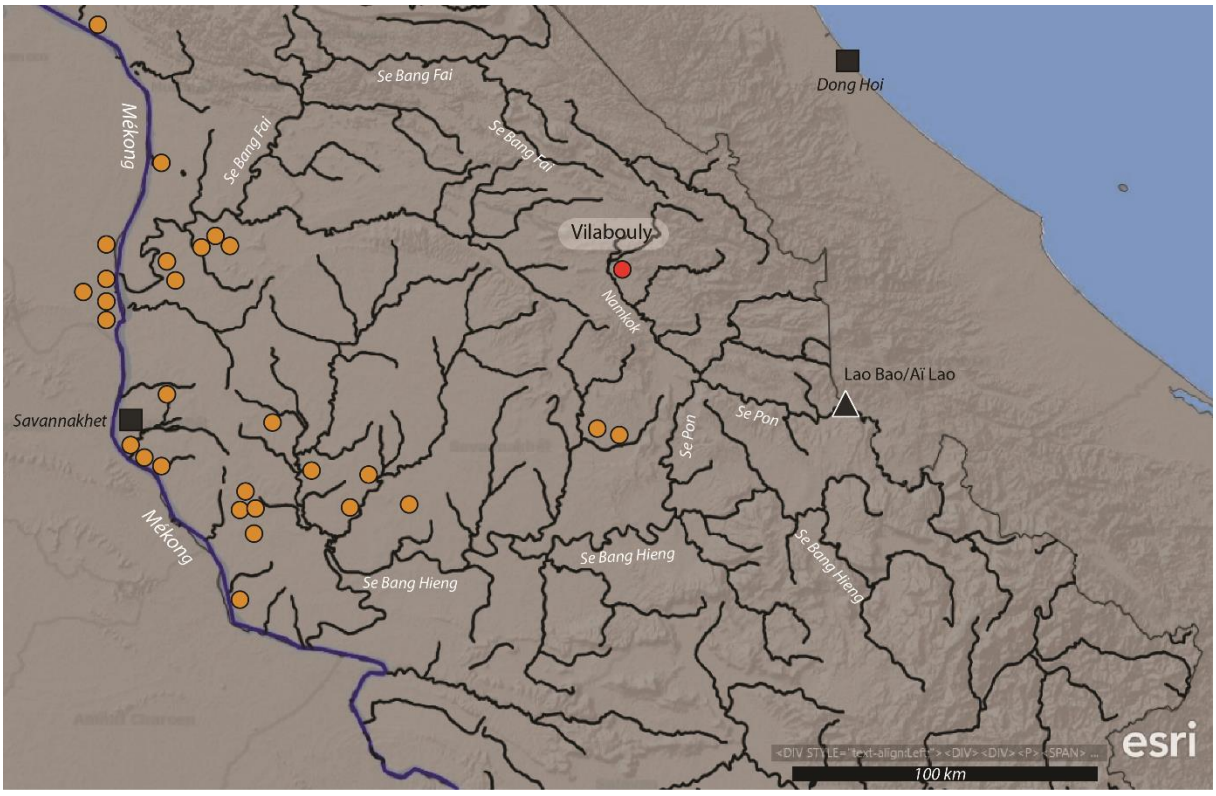


Figure 218 : Le réseau de rivières de la province de Savannakhet avec la localisation des rivières mentionnées dans le texte. En rouge, la zone du Complexe de Vilabouly et en orange les sites préangkoriens et angkoriens répertoriés dans la région par l'EFEO de Vientiane (données d'après Lorrillard, 2010 ; crédit pour la carte de base : ESRI).

24 sites, dont 15 datés typologiquement de la seconde moitié du premier millénaire de notre ère ont été identifiés dans la province, ce qui en fait l'une des plus fortes concentrations de sites préangkoriens au Laos. Les sites se situent principalement dans la partie ouest de la province (M. Lorrillard, 2010, p.223). La plaine de Savannakhet est plate, les réseaux terrestres devaient donc s'en trouver simplifiés en comparaison aux autres provinces, plus montagneuses. Même si aucune découverte préhistorique ne vient le confirmer, Michel Lorrillard mentionne que durant les premiers siècles ap. J.-C, le Mékong, en tant que lien majeur de communication a pu être propice aux développements d'entités, antérieures aux sites préangkoriens déjà identifiés. Il rajoute :

> « *It would be no surprise if the pre-Angkorian temples (or the simpler structures that preceded them) – in addition to being stopping places on popular routes – had indeed been erected along much older exchange routes, especially those used to transport prized merchandise*. »(M. Lorrillard, 2014, p.205).

Deux sites préangkoriens ont notamment été identifiés dans le district de Muang Phin, Province de Savannakhet, plus éloigné du Mékong, à 80 km (les deux points au centre de la figure 218). Les vestiges de Muang Phin sont situés à égales distances de la rivière *Sé pon* (ou *Tchépone*) et de la *Sé Thamoak*, tous deux affluents de la *Se Bang Hieng.* Les vestiges se présentent sous la forme d'un tertre (*earthwork*) rectangulaire comportant un *sema* caractéristique de la culture Môn, ainsi que de pièces de grès et un piédestal se rapportant à la culture khmère.

Le Complexe de Vilabouly se situe entre les deux principaux affluents du Mékong de la province de Savannakhet, le *Se Bang Hieng* et le *Se Bang Fai*. La rivière *Nam kok* qui coule à proximité du Complexe de Vilabouly, va s'écouler dans la *Se Pon,* qui ensuite s'écoule dans la *Se Bang Hieng*, reliant donc le site au Mékong (Figure 218). De plus, la *Se Pon* prend sa source à proximité de *Lao Bao* qui aurait été une des passes empruntées par les communautés vers le Vietnam, et ce depuis des périodes anciennes (voir Chapt. VIII partie 2.1).

Ce passage entre le Laos et le Vietnam a également été emprunté par un membre de la Mission Pavie, M. de Malgaive, à la fin du XIXème siècle, entre 1879 et 1895, lorsque l'Indochine était sous protectorat français. Les membres de la mission avaient principalement pour but d'identifier les voies de communication propices à l'établissement de routes ou de voies de chemin de fer, ainsi que la mise en place d'études scientifiques. Le volume III de ces explorations, publié en 1902, relate donc les itinéraires empruntés par M. de Malgaive au Laos et au Vietnam. M. De Malgaive a notamment emprunté le passage de Lao Bao ou Aï-Lao (Figure 219), qui est commenté comme suit par Auguste Pavie :

« *Il avait franchi cinq fois la ligne de partage et reconnu que la trouée d'Aï-Lao est l'un des meilleurs passages entre le Mékong et la côte à Tourane [...]. Nulle part, rien de comparable à l'affaissement de Lang-Ho, à Ta Riep, cette trouée où la nature n'a pas réservé plus d'obstacles […], c'est la percée rêvée, la brèche idéale qui mène au cœur de l'Indochine par Aï-Lao. Au Nord, elle se relie, elle aboutit aux plaines du Tchépône, du Sé Bang-Hien, du Kemmarat ou à Ban-Mouc […] Aï-Lao, c'est pour M. de Malgaive l'isthme entre le haut et le bas Laos, entre les calcaires du Nord et les grès du Sud, entre les races indo-chinoises et le point de jonction des trois principales : Laos, Khas et Annamites. C'est la clef économique et politique de l'Indo-Chine, pouvant être mise, sans difficulté, en liaison avec Tourane, le meilleur port de la côte d'Annam.* » (A. Pavie, 1902, p.23-24)

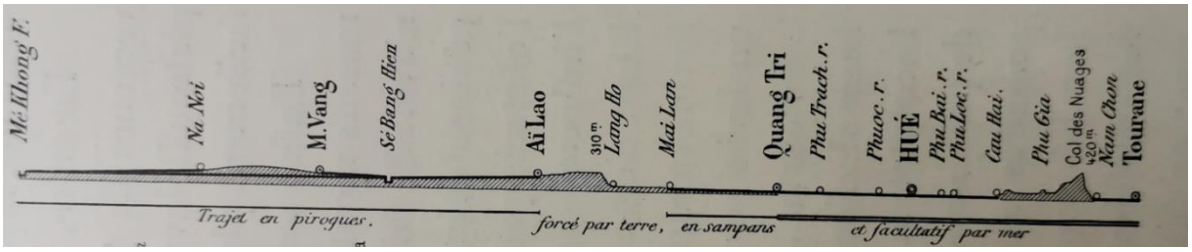


Figure 219 : Profil d'une des voies les plus courtes empruntées par De Malgaive pour relier la mer d'Annam au Laos central en passant par Aï-Lao (A. Pavie, 1902).

Tourane est ici le nom donné par les Occidentaux durant l'Indochine, à l'actuelle ville de Da Nang dans la province du même nom, au Vietnam (Figure 215). Les itinéraires de M. de Malgaive l'ont également mené dans la région du Complexe de Vilabouly, où les autochtones ont fait mention d'une exploitation locale de fer et de la présence de sables aurifères, particulièrement sur les berges de la *Nam Kok* qui coule à proximité de Vilabouly. Les liens et les potentiels échanges entre les empires angkoriens et le Champa au centre du Vietnam, en passant par le sud du Laos sont également aujourd'hui un point d'intérêts des recherches. Encore de nos jours, des récits oraux existent dans ces régions sur l'existence de voies anciennes de communications (T. K. Phương, 2013).

On a vu au Chapitre III que Vilabouly était toujours occupé durant la période de *Lane Xang*, notamment par la présence de céramiques aux horizons variés (Chine, Vietnam, Thaïlande et Japon). La présence de ces différentes céramiques implique que Vilabouly était à l'époque encore actif dans les réseaux d'échanges initiés durant la période préhistorique (N. Shimizu et al., 2016). Shimizu s'interroge également sur les potentielles routes d'échanges de ces céramiques. Pour cette auteure la voie d'accès via le Vietnam semblerait la plus probable, car elle est géographiquement la plus proche, avec les côtes situées à 100 kilomètres à vol d'oiseau. Même si de plus amples recherches sont encore nécessaires, l'identification des

voies empruntées par ces céramiques pourrait permettre de mettre au jour certaines voies d'échanges anciennes.

L'identification de sites préangkoriens par l'Ecole Française d'Extrême Orient (EFEO) le long du Mékong, jusque dans la Province de Khammouane, montre que les territoires du sud et du centre du Laos, du moins à proximité du Mékong, étaient occupés dès la période préangkorienne (M. Lorrillard, 2014). L'étude de Michel Lorrillard et de l'EFEO de Vientiane pose également l'hypothèse que l'implantation des sites préangkoriens à partir de la seconde moitié du premier millénaire ap. J.-C suivait potentiellement un schéma d'occupation déjà établi à la fin de la préhistoire (Lorrillard, 2010), donnant ainsi un panel de réflexions sur l'occupation antérieure du territoire lao.

Comme proposer par Michel Lorrillard (2014) pour les sites préangkoriens le long du Mékong, le site de Vilabouly aurait pu profiter des voies d'échanges pour exporter ses productions et se procurer d'autres denrées sans forcément être intégré dans une entité plus vaste. Vilabouly aurait tout même partager quelques traits techniques et sociaux similaires, apportés via les contacts et les échanges offerts par sa position géographique et son activité. Comme mentionné au Chapitre I, les connaissances archéologiques de la fin de la préhistoire sont de nos jours très minces pour le Laos, ce qui nous mène seulement à des spéculations qui devront être confortées par de prochaines études sur l'occupation protohistorique du territoire. Ces études devront prendre en compte le lien fort existant entre la géographie, les échanges, l'implantation des sites et le développement des communautés. Chaque lieu indépendamment possède ses propres spécificités techniques ou sociales, inhérentes aux caractéristiques évoquées, mais partage également des traits communs avec un ensemble plus vaste, appartenant lui-même à un maillage dont chaque élément est dépendant d'un autre.

Il est très délicat pour l'instant de dire si ces sites étaient déjà intégrés dans un ensemble plus vaste ou s'ils se présentaient comme lieux indépendants, peut-être interdépendants et exploitants la voie fluviale majeure apportée par le Mékong, ainsi que les voies naturelles d'échanges offertes par la géographie de la province de Savannakhet. De plus, l'identification d'objets cuivreux avec des signatures isotopiques concordantes à celle de Vilabouly semble montrer que ces productions ont également circulé au Cambodge actuel. Le Mékong et son bassin fluvial auraient ainsi pu servir de voie d'acheminement pour une partie de ces productions.

4. Une sphère d'interaction autour du Mékong ?

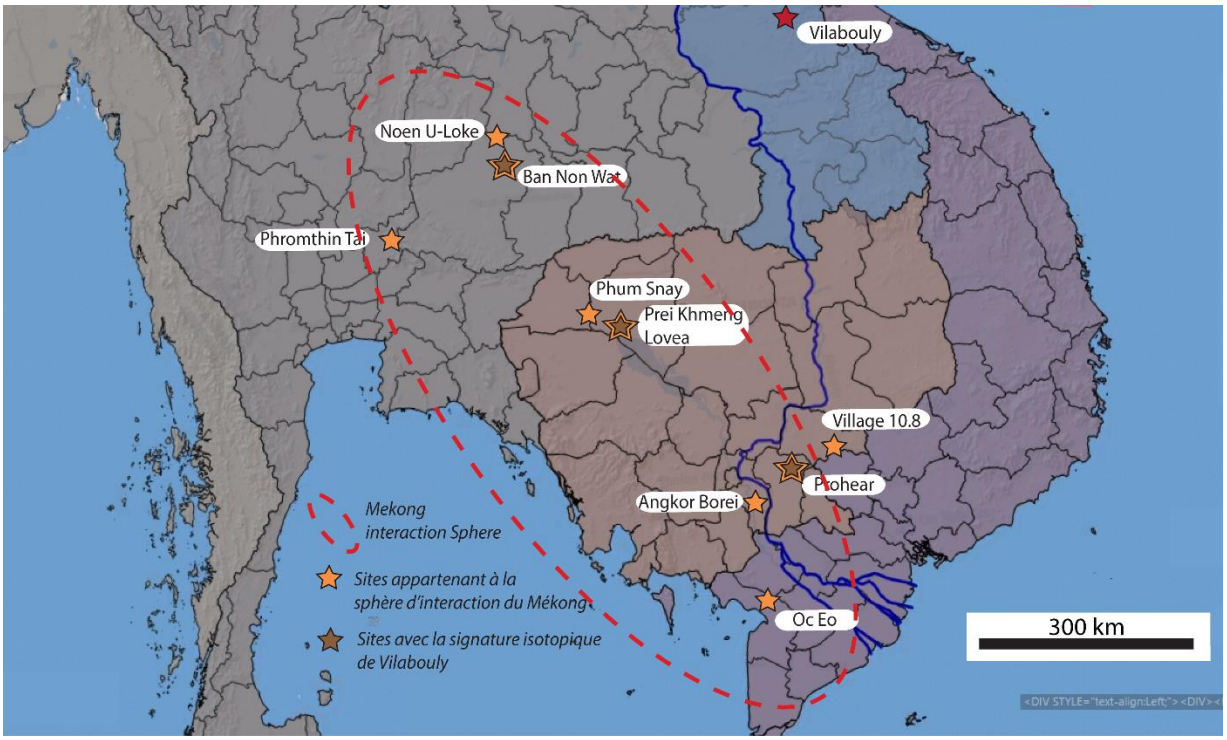


Figure 220 : Localisation des sites pour lesquels le partage de réseaux d'échanges a pu être identifié entre le delta du Mékong, le nord du Cambodge et la Thaïlande (d'après Carter et al, 2020 ; Carter, 2015 ; Stark et Fehrenbach, 2019).

Le bassin fluvial du Mékong et la géographie de la province de Savannakhet pourraient donc avoir participé à la circulation des productions de Vilabouly. Nous avons vu au Chapitre I que le delta du Mékong, au sud du Cambodge et du Vietnam actuels, est occupé par une des premières formes d'organisations pré-étatiques d'Asie du Sud-Est, impliqués dans les réseaux d'échanges maritimes, mais également terrestres : le royaume nommé *Fu nan*. Angkor Borei et Oc Eo sont les principaux sites connus (Figure 220). Les sites du *Fu nan* ont livré des assemblages de mobiliers variés sous la forme d'ornements en verre et en pierre dures, de céramiques, ainsi que d'objets cuivreux et autres métaux précieux témoignant de ces échanges. Dès la fin du premier millénaire av. J.-C, une organisation complexe se distingue des sites du *Fu nan* par la présence de peuplements entourés de murs et de fossés, un contrôle des terres agraires ainsi qu'un réseau de canaux reliant certains sites entre eux, notamment Angkor Borei et Oc Eo (E. Bourdonneau, 2003).

L'étude de perle en pierre et en verre ainsi que de céramiques du Cambodge et de Thaïlande a relevé la présence de mêmes réseaux intrarégionaux entre le delta du Mékong, le nord du Cambodge et certains sites de Thaïlande (A. K. Carter, 2015; M. T. Stark et S. Fehrenbach, 2019; A. K. Carter et al., 2020). Ces données ont amené Alyson Carter à proposer l'existence d'une sphère d'interaction pour le Mékong (« *Mekong Interaction Sphere* ») reliant les sites du delta comme Angkor Borei, aux sites du nord-ouest du Cambodge et en Thaïlande au

travers de l'échange de biens de prestige. Cette sphère d'interaction terrestre serait également reliée à celle, maritime, de la mer de Chine méridionale. Le contrôle de certains biens de prestige aurait permis aux peuplements du *Fu nan* d'entretenir des relations d'alliances avec les communautés de l'intérieur des terres. La présence du réseau de canaux pourrait avoir participé à la mise en place de ces voies d'échanges. Les données disponibles à ce jour proviennent d'Angkor Borei, Oc Eo, Prohear, Phum Snay, Village 10.8 et Prei Khmeng au Cambodge ainsi que Noen U-Loke, Ban Non Wat ou encore Phromthin Tai en Thaïlande (Figure 220).

Les élites du *Fu nan* auraient également accès aux voies d'échanges de la mer de Chine avec l'Asie du Sud, intensifiée durant la seconde moitié de l'âge du Fer, et certains sites seraient également reliés à la sphère d'interaction de la mer de Chine méridionale (« *South China Sea Interaction Sphere* », H. C. Hung et al., 2013; B. Bellina, 2018 a). Les perles en pierre dure ont également permis de proposer l'existence de deux phases dans ces réseaux : une première d'environ 400 av. J.-C à 100 ap. J.-C incluant la circulation de divers objets (poterie, bronze, ornements en verre et en pierre, etc.) et une seconde d'environ 100 à 300 ap. J.-C avec une intensification des échanges et la présence de type d'objets moins divers, avec pour certains sites des perles de qualité inférieure (B. Bellina, 2001, 2003). La seconde période d'échanges identifiée semble également correspondre à une intensification des échanges du delta du Mékong vers l'intérieur des terres (A. K. Carter, 2015; A. K. Carter et al., 2020). Le type de perle en verre et en pierre identifié pour les sites appartenant à cette sphère d'interaction appartient au type de qualité inférieure et se distingue de certains sites côtiers intégrés dans les réseaux de la mer de Chine méridionale. Cette étude montre alors la présence de réseaux distincts, parallèles entre les réseaux maritimes et terrestres. Ces réseaux semblent révéler la circulation de biens différents entre les sites côtiers et ceux de l'intérieur des terres suggérant des productions à destination différentes (A. K. Carter et al., 2020) qui nécessitent d'être davantage exploré. Ces réseaux parallèles ne sont pour l'instant connus qu'au travers des perles en verre et en pierres dures, mais nous avons peu d'informations concernant les formes qu'ils prenaient pour les échanges de métaux. Le changement observé entre les deux phases d'échanges de l'âge du Fer n'a pas encore pu être distingué pour les échanges de métaux. D'autant plus que les échantillons prélevés pour cette zone sont faibles, voir absents pour le sud du Vietnam.

Certaines régions de l'actuel Laos pourraient être intégrées dans cette sphère d'échanges, mais les données sont à ce jour mineures notamment par le manque d'études et de sites connus au Laos. Les données du Complexe de Vilabouly ont permis d'apporter certains éléments à ces hypothèses, par les résultats obtenus sur les perles en verre et les analyses isotopiques du plomb. En effet, comme nous l'avons mentionné, l'étude des perles en verre a

révélé que des perles de composition similaire à Vilabouly se retrouvent pour le site d'Angkor Borei dans le delta, mais également pour Noen U-Loke et Ban Non Wat (L. Dussubieux, *pers. comm*) qui feraient partie de cette même sphère d'interaction définit par A. Carter. Certains objets à base de cuivre des sites de l'âge du Fer de Prohear, Prei Khmeng et Lovea au Cambodge et de Ban Non Wat en Thaïlande possèdent également la signature isotopique de Vilabouly. Ces éléments viennent conforter l'existence d'un partage de mêmes voies d'échanges entre l'actuel Laos, le Cambodge et la Thaïlande. La nature exacte de ces échanges reste à être déterminée. Le rôle joué par le Mékong et son bassin fluvial reste à considérer afin de discuter des interactions entre les différentes communautés de la région. L'accès de Vilabouly à cette sphère d'interaction aurait également pu permettre une ouverture aux échanges maritimes par le delta du Mékong qui est connu pour avoir été intégré dans les réseaux de la mer de Chine méridionale et permettre ainsi l'acquisition de certains autres biens, comme les perles en verre.

5. Le centre du Vietnam

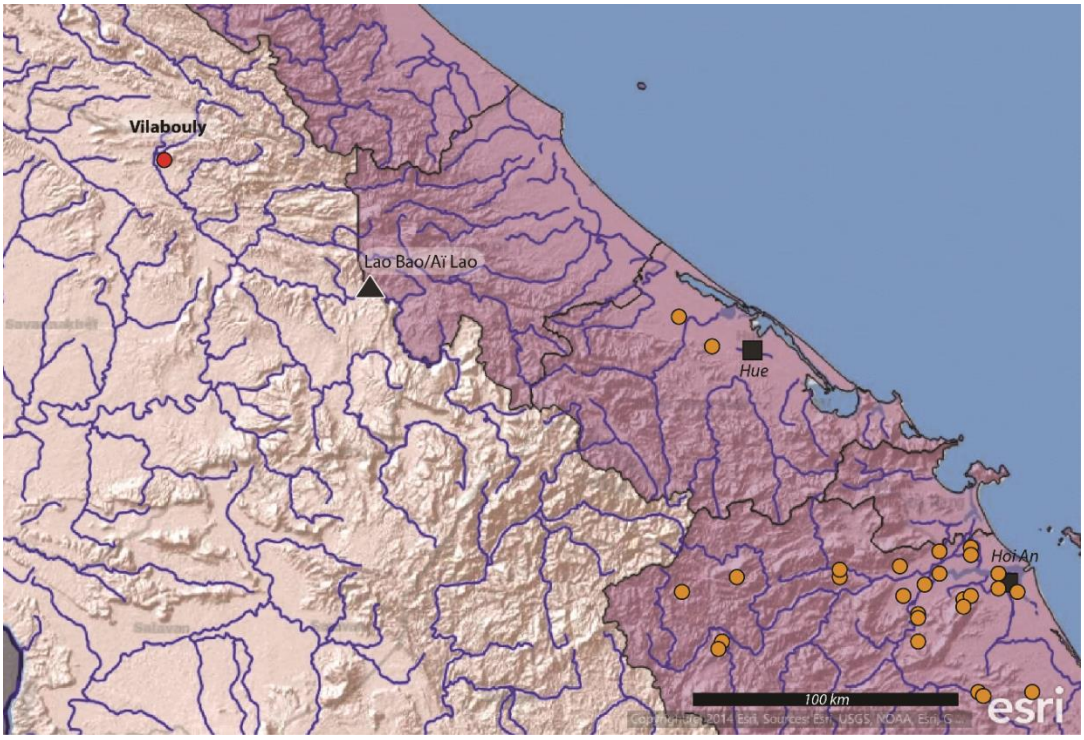


Figure 221 : Réseaux de rivières entre le centre du Laos et du Vietnam ainsi que la localisation des sites de la culture Sa Huynh dans la vallée du Thu Bon au Vietnam (point orange), d'après Dzung 2009 et Reinecke, 2018 ; crédit carte de base : ESRI).

Les deux précédentes parties nous ont permis d'aborder la question des voies terrestres et fluviales de communication auxquelles Vilabouly aurait pu avoir un accès direct. Tout comme nous venons de le faire pour le delta du Mékong, nous allons maintenant tenter d'aborder la question de l'ouverture de Vilabouly sur le monde maritime au travers de potentiels contacts avec les côtes centrales vietnamiennes et les cultures qui s'y établissent durant l'âge du Fer.

En effet comme nous l'avons mentionné au Chapitre I, les communautés de la culture *Sa Huynh* établies sur les côtes centrales du Vietnam sont connues pour avoir été intégrées dans les réseaux d'échanges de la mer de Chine méridionale (H. C. Hung et al., 2007, 2013; A. Favereau, 2015). Des voies de communication évidentes existent entre la région montagneuse du Complexe de Vilabouly et les côtes centrales du Vietnam, notamment la passe de Lao Bao/Aï Lao, reliant la province actuelle de Savannakhet au Laos, à celle de Quang Tri au Vietnam. De plus, l'identification de contextes funéraires en urne et potentiellement la crémation à Vilabouly (TNN et Khanong A2) offre un autre parallèle intéressant avec les régions centrales du Vietnam puisque la culture *Sa Huynh* est tout particulièrement connue pour sa tradition d'inhumation en jarre. La présence de hallebardes *ge* à Vilabouly montre également ce potentiel lien avec le Vietnam puisque les *ge* sont principalement identifiés dans des contextes vietnamiens et chinois. La période d'activité de la culture *Sa Huynh* est contemporaine à celle du Complexe de Vilabouly et permet d'aborder la question de l'occupation au centre du Vietnam durant cette période.

La culture *Sa Huynh* était au départ perçue comme une culture côtière (L. T. M. Dzung, 2009) orientée vers les réseaux d'échanges maritimes, mais nous avons également vu (voir Chapitre I.1) que des biens importés se retrouvent à l'intérieur des terres, plus proches de la chaine annamitique, en suivant les vallées des rivières (M. Yamagata, 2006). La culture *Sa Huyhn* aurait donc pu entretenir des relations avec les communautés situées dans les hauteurs, dans les régions montagneuses.

La rivière du Thu Bon (Figure 221), près de Hoi An, où se retrouve la plus grande concentration des sites de la culture *Sa Huynh*, a une position privilégiée, permettant un accès à la chaine annamitique, puis à la vallée du Mékong. La concentration de sites dans cette région suggère qu'elle était un centre important de la culture *Sa Huynh*. Les sites découverts pour cette culture sont principalement associés à des contextes funéraires, avec des inhumations en jarre, accompagnées d'objets importés dénotant des contacts avec la Chine, notamment avec la découverte de miroirs et de vaisselles (voir Chapitre I). Parmi les objets avec une typologie non régionale se trouvent notamment des tambours *Dong son,* ainsi que des hallebardes *ge*, rejoignant ce que nous avons évoqué en partie VIII.2.2. La distribution de biens importés se retrouve jusque dans les sites situés à l'intérieur des terres à plus de 70 km de l'embouchure de la rivière Thu Bon. M. Yamagata propose pour principale raison à l'installation de communautés à l'intérieur des terres, l'exploitation des ressources offertes par la chaine annamitique, comme l'ivoire ou les essences aromatiques, très prisées des Chinois, ou encore les ressources minières. Ces produits seraient ensuite acheminés vers la côte via le réseau de rivières dont les entrepôts devaient contenir les biens importés issus des échanges maritimes.

Ce schéma pourrait expliquer la découverte de biens importés pour des sites situés à l'intérieur des terres et les relations entretenues avec les sites côtiers. La culture *Sa Huynh* apparaît alors majoritairement côtière, mais elle semble également exploiter les ressources offertes par la chaine annamitique. Le même schéma pourrait s'appliquer pour Vilabouly puisque tout comme les sites qui auraient entretenu des contacts avec la culture *Sa Huynh* à l'intérieur des terres, le Complexe de Vilabouly a livré la présence de tambours *Dong son* et de hallebardes *ge,* ainsi que de contextes funéraires en jarre.

Les mêmes relations d'interdépendance, entre des sites côtiers qui étaient impliqués dans des échanges maritimes et des sites de l'intérieur des terres avec un accès à un panel de ressources, ont également été proposées par Bérénice Bellina pour le site de Khao Sam Kaeo dans la péninsule Thaï-malaise (B. Bellina, 2014, p.371; B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019). À partir d'un modèle hybride défini selon « *the hierarchic upstream-downstream system model* » (B. Bellina, 2018 a, p.3) en suivant la proposition initiale de Bronson (1977) et le « Mandala » (O. W. Wolters, 1982). Le modèle de Bronson a également été proposé pour la période historique dans les îles de l'Asie du Sud-Est, notamment à Sumatra pour la période de *Srivijaya* (VIIème-XIVème siècles ap. J.-C) et potentiellement plus ancienne durant la protohistoire (P.-Y. Manguin, 2002, 2009 b). Dans ce modèle, une cité portuaire centrale (« *downstream* ») construit un réseau complexe d'échanges suivant un bassin fluvial avec d'autres centres secondaires à l'intérieur des terres (« *upstream* ») ayant accès aux ressources. Ce modèle « *usptream-downstream system* » pourrait s'avérer plus complexe. En effet, les sites de l'intérieur des terres, ainsi que d'autres cités plus éloignées du centre, pourraient être également perçus comme des entités en partie autonomes, inscrites dans un système d'alliances devant se référer à la cité portuaire centrale (P.-Y. Manguin, 2002; B. Bellina, A. Favereau, et L. Dussubieux, 2019). Ce système se définirait alors comme un centre et par ses relations avec la périphérie. Le « Mandala » décrit alors une confédération de royaumes subordonnée à un centre dominant. Le centre ne serait pas fixe, mais changeant en fonction des alliances. Ainsi, les sites vassaux pourraient se trouvaient dans plusieurs systèmes d'alliances (B. Bellina, 2018 a). Dans ce modèle, KSK entretient des relations et peut-être une certaine forme d'autorité avec les sociétés de l'intérieur des terres afin d'avoir accès aux ressources, ainsi qu'à un réseau de transport du golfe de Thaïlande à la mer d'Andaman. KSK serait également relié à des sites « vassaux » situés dans d'autres bassins fluviaux (Khao Sek). En échange, les centres secondaires bénéficieraient des échanges maritimes en ayant accès à d'autres types de biens encore à définir. Cette hypothèse amène également Bérénice Bellina à se demander quels types de biens et peut-être même quelles techniques étaient échangés avec ces populations de l'intérieur des terres. Est-ce que les artisans des sites côtiers comme KSK adaptaient leurs productions pour ces communautés ? Est-ce que les artisans circulaient

entre ces sites ? De plus, la péninsule Thaï-malaise est connue pour ces vastes dépôts d'étain. Le site côtier de KSK, pour lequel un lingot en bronze à haute teneur en étain a été découvert ainsi qu'un creuset et des moules, aurait pu avoir un contrôle de cette ressource et l'exporter en Asie du Sud-Est, via le réseau maritime (M. Murillo-Barroso et al., 2010; T. O. Pryce et al., 2017).

On aurait alors un schéma similaire à celui des côtes centrales du Vietnam, dont l'arrière-pays de la chaine annamitique est riche en ressources, notamment les minerais, dont le Complexe de Vilabouly est un exemple. Pour la culture *Sa Huynh*, très peu de ports ont été étudiés comme les sites de la péninsule Thaï-malaise. Comparer leur organisation apparaît alors difficile. La proximité du Complexe de Vilabouly avec les côtes du Vietnam (100 km à vol d'oiseau) et donc des sites de la culture *Sa Huynh*, fait de cette région du Vietnam un potentiel passage pour les produits du Complexe de Vilabouly, ainsi que pour les marchands et/ou communautés. Bien plus encore, selon le modèle proposé pour Khao Sam Kaeo, le Complexe de Vilabouly, pour ses ressources en cuivre, aurait pu être intégré dans le réseau des sites de la culture *Sa Huynh* à l'âge du Fer et permis d'y acheminer des biens non régionaux comme les *ge* ou les tambours. L'étude de Cameron sur la poterie domestique de Vilabouly (K. Cameron, *pers. comm*.) n'a pour l'instant pas révélé de lien avec les poteries caractéristiques de la culture *Sa Huynh* (B. Bellina, G. Epinal, et A. Favereau, 2012), et très peu de données ne sont disponibles à l'heure actuelle pour les sites de la culture *Sa Huynh* afin de conforter ces hypothèses. Les liens potentiels avec la culture *Sa Huynh* n'excluent bien évidemment pas l'intégration de Vilabouly à la sphère d'interaction proposée pour le bassin du Mékong. Il suggèrerait alors l'existence de divers réseaux parallèles et inter-connectés dont la nature reste encore à être définie.

6. Une ouverture sur les échanges maritimes

Ainsi, les contacts avec les communautés des côtes centrales du Vietnam et du delta du Mékong pourraient permettre aux productions de Vilabouly d'être incorporées aux échanges maritimes. Des réseaux d'échanges maritimes autour de la mer de Chine méridionale sont connus pour avoir existé dès la période Néolithique, période durant laquelle des biens circulent déjà, particulièrement la néphrite (H. C. Hung et al., 2007, 2013; H. Hung et Y. Iizuka, 2013).

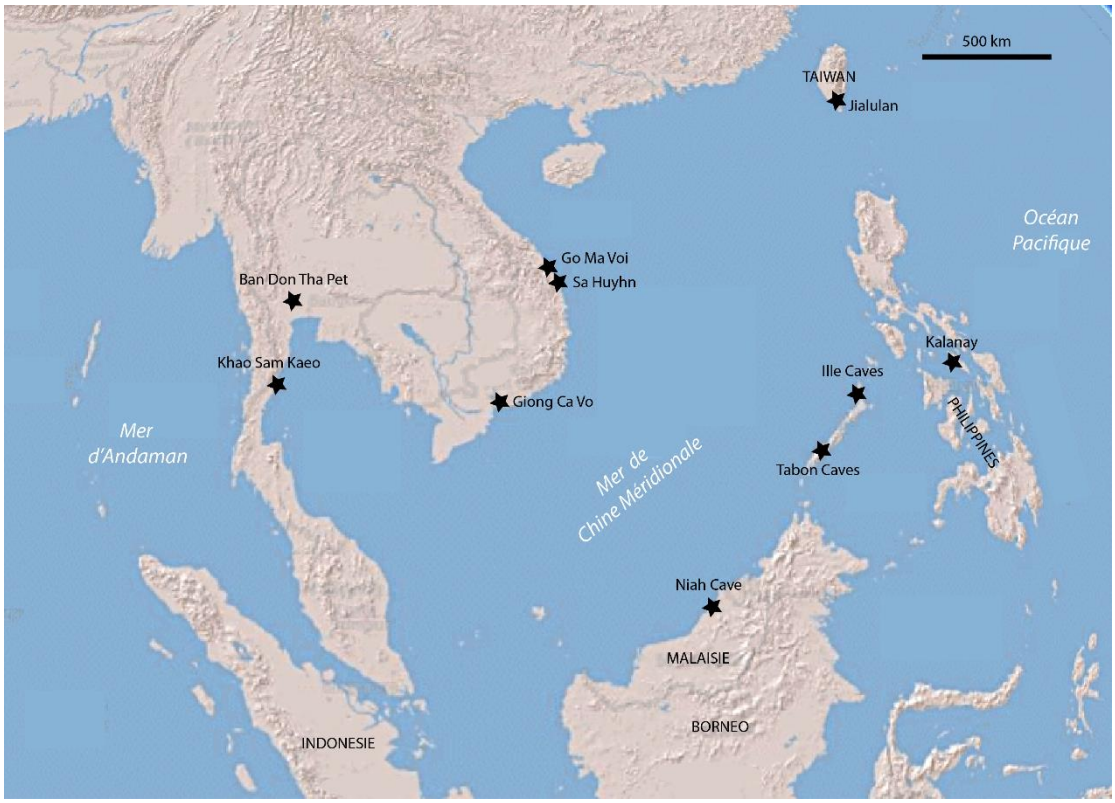


Figure 222 : Localisation des principaux sites inclus dans les échanges maritimes de la mer de Chine méridionale, notamment par la présence d'objets attestant du partage de sphères culturelles et matérielles proches (crédit carte de base : ESRI).

Les sites des côtes du Vietnam et du delta du Mékong sont donc impliqués dans ces échanges maritimes via la mer de Chine méridionale. L'étude de perles en verre a notamment permis de montrer une connexion entre le Vietnam et la Thaïlande (L. Dussubieux et B. Gratuze, 2010; L. Dussubieux et B. Bellina, 2017 a). En effet, l'étude des perles de Giông Cà Vo a permis de montrer des correspondances avec celles de Ban Don Tha Phet, Khao Sek et Khao Sam Khaeo. Plus récemment, l'étude des perles en verre a également montré des similarités avec certains sites de la vallée de la Samon au Myanmar (L. Dussubieux et T. O. Pryce, 2016) qui répondrait à d'autres réseaux d'échanges que la culture *Sa Huyhn* mais illustre la grande distribution des biens. Parmi ces sites, seuls Khao Sam Kaeo et Khao Sek possèdent des preuves d'une fabrication locale de perles en verre et de bracelets.

Ce lien entre les cultures matérielles des côtes centrales du Vietnam, du delta du Mékong et de la péninsule Thaï-malaise pourrait également expliquer pourquoi un objet avec la signature isotopique de Vilabouly s'y retrouve (le tambour de Khao Sek). En effet, tout comme les objets en verre ou en néphrite semblent avoir circulé, le cuivre de Vilabouly aurait pu emprunter les mêmes voies pour se retrouver dans la péninsule Thaï-malaise. Ainsi, les côtes centrales du Vietnam, le delta du Mékong et la péninsule Thaï-malaise (L. Dussubieux et T. O. Pryce, 2016) pourraient être intégrés aux mêmes réseaux d'échanges maritimes profitant de la route maritime de la soie reliant la Chine à la baie du Bengale, en passant par les côtes de l'Asie du

Sud-Est au milieu du premier millénaire av. J.-C (Bellina, 2014 ; 2011) avec des échanges antérieurs. La mise en place de la route maritime de la soie participe ainsi à l'intensification des réseaux d'échanges. Elle a permis la circulation de marchands, d'artisans et de biens entre la baie du Bengale et la mer de Chine méridionale, ainsi que de répertoires stylistiques et de cultures matérielles. Les sites des côtes de la mer de Chine méridionale partageraient alors des matrices culturelles proches soumises à de multiples réseaux entrelacés. Le partage d'un style pan-régional, incluant les céramiques, mais également d'autres types d'artéfacts comme des ornements en pierres dures ou en verre, a permis de définir la Sphère d'interaction de la mer de Chine méridionale (« *South China Sea Interaction Sphere* », B. Bellina, 2018).

La signature isotopique de Vilabouly a également été identifiée au centre du Myanmar, à Halin 29-1 (Pryce et al. *forthcoming*) et Oakaie (T. O. Pryce et al., 2016, 2018). Contrairement à l'exemple du tambour de Khao Sek, la présence de cuivre potentielle de Vilabouly au Myanmar ne peut pas être expliquée par les réseaux d'échanges de la culture *Sa Huynh.* En effet, ces derniers se limitent aux côtes de l'Asie du Sud-Est dans la mer de Chine méridionale. La distribution du cuivre de Vilabouly au Myanmar doit donc répondre à d'autres réseaux d'échanges parallèles.

Les échanges maritimes relieraient les côtes de l'Asie du Sud-Est continentale à celles des contextes insulaires aux Philippines, mais également en Indonésie. L'étude des céramiques de la culture *Sa Huynh* a tout particulièrement attiré l'attention et permis de montrer la forte ouverture de cette culture aux échanges maritimes (A. Favereau, 2015), attestant de contacts anciens (dès la période Néolithique) avec les iles de l'Asie du Sud-Est. Les caractéristiques stylistiques de ces céramiques trouvent des correspondances avec les poteries d'un autre site, celui de Kalanay à Masbate (Figure 222) aux Philippines. Ce style de poterie a donc pu être nommé *Sa Huynh-Kalanay* par Wilhem Solheim (Solheim, 1964), perçu comme caractérisant les échanges de poteries, avec des répertoires décoratifs, peut-être même de populations, entre l'Asie du Sud-Est continentale et insulaire (B. Bellina, G. Epinal, et A. Favereau, 2012; A. Favereau et B. Bellina, 2016). De plus, le site de *Kalanay* où des poteries avec le style de *Sa Huynh-Kalanay* ont été découvertes présente également des inhumations en jarres, tout comme la culture *Sa Huynh*. Des liens semblent exister entre la culture *Sa Huynh* et les populations insulaires des Philippines. En revanche, le terme de poterie *Sa Huynh-Kalanay* se base principalement sur une approche typologique et décorative. Ce type de poterie se retrouve plus particulièrement pour des sites côtiers. L'étude d'Aude Favereau et Bérénice Bellina en 2016, a permis de montrer que des poteries associées au style de *Sa Huynh-Kalanay*, nombreuses dans la péninsule Thaï-malaise, semblent en majorité correspondre à une fabrication locale, dont la variété stylistique suggère des centres de production variés et des adaptations locales.

Un autre élément ornemental matérialise les contacts/échanges entre les côtes de l'Asie du Sud-Est et les sites insulaires, des Philippines, mais également de Taïwan (Figure 222). Il s'agit d'objets lithiques ornementaux avec des formes particulières, comme des boucles à doubles têtes d'animaux (pendants d'oreille bicéphales et *Linging-O*) découverts au sud du Vietnam notamment (H. C. Hung et al., 2007; H. Hung et C. Chao, 2016). La néphrite de Taïwan est connue pour avoir été échangée dès la période Néolithique, dans un premier temps vers les Philippines (de 2000 à 500/400 av. J.-C) puis de manière plus vaste autour de la mer de Chine méridionale (après 500/400 av. J.-C). Les pendants d'oreilles *linging-O* sont les plus dispersés en Asie du Sud-Est (Hung et al, 2007). En effet, on les retrouve à Taïwan, aux Philippines, mais, encore une fois au sud/centre du Vietnam, plus particulièrement pour des sites de la culture *Sa Huynh,* et au sud/centre de la Thaïlande pour le site de Khao Sam Kaeo et Ban Don Ta Phet. Ces sites sont également connus pour leur implication dans les réseaux d'échanges, par leur situation géographique favorable et par le nombre élevé de biens importés qui y ont été découverts (verre, pierres dures, céramiques, objets cuivreux, etc.). Ces différentes données offrent diverses perspectives à l'étude des productions de cuivre qui auraient potentiellement pu circuler jusque dans ces contextes insulaires suivant les voies de diffusion du verre, des pierres dures ou des céramiques.

Concernant l'application des analyses isotopiques par SEALIP/BROGLASEA pour les iles de l'Asie du Sud-Est, elles sont minces à ce jour, ce qui nous empêche de discuter davantage des interactions entre l'Asie du Sud-Est continentale et insulaire d'un point de vue de la métallurgie du cuivre. De plus, les formes et les développements de la métallurgie du cuivre dans les iles d'Asie du Sud-Est souffrent encore d'un manque d'études.

VIII.3. Synthèse

La chaine opératoire de production du cuivre au Complexe de Vilabouly nous a permis d'aborder des questions plus vastes sur la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale, au travers d'une étude comparative, nous amenant ainsi à discuter de la place de Vilabouly au sein des techniques régionales. Les références et données citées tout au long de cette thèse référencent principalement des études de l'âge du Fer d'Asie du Sud-Est continentale, car il s'agit de la période d'activité de production du Complexe de Vilabouly. En effet, les datations radiocarbones disponibles pour le Complexe de Vilabouly placent son activité de production durant l'âge du Fer, avec une activité minière débutant à l'âge du Bronze jusqu'aux environs de la seconde moitié du premier millénaire ap. J.-C.

Or, les résultats des données isotopiques du plomb sont venus apporter une information supplémentaire qui pourrait permettre de donner une autre dimension au Complexe de Vilabouly. Ces résultats ont démontré que certains objets provenant de contextes datés de

l'âge du Bronze possèdent une signature isotopique concordante à celle du complexe (Pryce, 2018 ; Pryce et Cadet, 2018). Les sites en question sont Ban Chiang (nord de la Thaïlande), Oakaie (T. O. Pryce et al., 2016), Halin 29-1[47] et Tam Pà Ping[48]. Ces résultats semblent donc suggérer que le Complexe de Vilabouly avait une activité de production dès l'âge du Bronze.

Comme nous l'avons vu, certaines autres données comme les contextes funéraires de Puen Baolo et des datations de l'âge du Bronze obtenues sur des structures d'étaiement dans les puits de mine permettent de renforcer cette hypothèse et laissent fortement supposer cette activité plus ancienne. Le Complexe de Vilabouly aurait donc pu être actif pour une période où les premières formes d'une métallurgie du cuivre/bronze font leur apparition en Asie du Sud-Est continentale. Si des échantillons de l'âge du Bronze sont disponibles, ils participeraient donc à la discussion des transmissions techniques depuis l'actuelle Chine. Notre corpus intègre potentiellement ces échantillons de l'âge du Bronze, mais la faible résolution chronologique ne nous permet pas d'en discuter. De plus amples recherches et datations sont bien sûr nécessaires, cependant ces données constituent un premier pas.

La principale comparaison avec la vallée de Khao Wong Prachan ne semble pas démontrer de différences majeures, mais des variations locales. Les deux sites de production possèdent un procédé employant un mélange de minerais (moins marqué dans le cas de Vilabouly). La réduction avait lieu dans des creusets et donnait lieu principalement à la production de lingots, dont les formes varient à Vilabouly, ainsi qu'entre Vilabouly et KWPV. Le site de Vilabouly semble employé des minerais plus riches menant à une production plus faible de scories. La production d'objets en bronze à Vilabouly est supposée, mais nécessite d'être démontrée. Les deux sites de KWPV et Vilabouly possèdent également des objets avec une typologie dénotant des contacts avec d'autres régions. Pour KWPV, un objet allié semble en partie avoir été produit sur un autre site ou avec des matières premières externes à la vallée.

KWPV et Vilabouly ont également livré des contextes funéraires en étroite association aux aires de production. Pour les deux sites de KWPV et Vilabouly deux zones de productions principales ont été identifiées : Non Pa Wai et Nil Kham Haeng pour KWPV ; Puen Baolo et Thong Na Nguak pour Vilabouly. Dans les deux cas, les différentes zones possèdent une partie de leurs activités durant une période contemporaine. Pour KWPV, les procédés de production semblent évoluer à NKH (fin de l'âge du Bronze) pour devenir plus homogènes et plus intenses. Pour Vilabouly, les datations trop peu nombreuses, ne permettent pas d'appréhender si les deux sites de TNN et PBL ont toujours été en activité parallèle ou si l'un a été abandonné. En revanche, les analyses ont révélé des différences dans les productions des deux zones et

[47] (Pryce et al. forthcoming).
[48] (Pryce et al. forthcoming).

notamment dans les matières premières employées pour la charge de réduction. De plus, les contextes funéraires mis au jour à TNN et PBL pourraient également démontrer la présence de communautés aux pratiques différentes.

L'étude comparative de KWPV et Vilabouly semble donc montrer un même schéma de production, qui pourrait révéler une tendance régionale dans la production du cuivre à la fin de la période préhistorique. L'utilisation d'un mélange de minerais pour deux des trois sites de réductions actuellement connus en Asie du Sud-Est pourrait également suggérer que la période d'exploitation exclusive et plus complexe des minerais sulfurés intervient plus tard dans la région, même si nous ne disposons actuellement d'aucune donnée. Est-ce que cette tendance est révélatrice des techniques transmises et de leurs évolutions parallèles dans la région ? Cette question ne sera pas résolue ici, par un manque de données notamment, mais elle constitue une piste intéressante à poursuivre afin de comprendre les caractéristiques et le développement de la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est.

Un autre élément semble commun aux sites de production primaire et secondaire d'Asie du Sud-Est continentale connus jusqu'alors : il s'agit des creusets. En effet, nous avons vu que les creusets ont été identifiés pour tous ces sites avec des variations de composition et de forme en fonction de leur usage et des sites, mais partageant des traits communs. La présence des creusets pourrait indiquer que les productions de cuivre de l'âge du Bronze/Fer utilisaient ces vaisselles pour les opérations métallurgiques, de la réduction aux opérations de fonderie, en passant par la réalisation d'alliages. Trop peu de sites de production de cuivre sont encore étudiés en Asie du Sud-Est afin d'appréhender l'évolution de ces productions et nous n'avons pour l'instant accès qu'à une fenêtre restreinte pour laquelle de nombreuses inconnues demeurent encore. L'étude du Complexe de Vilabouly s'insère dans la tradition métallurgique régionale dans le sens où elle possède de nombreux traits communs avec les autres sites connus et étudiés notamment en Thaïlande, mais elle révèle également des spécificités, des variantes, inhérentes au Complexe de Vilabouly. Dont la forme des lingots dits nœuds papillon est un exemple. En 2014, en évoquant la production de Vilabouly, Pryce *et al* écrivaient :

> *"Seeing as all are agreed that Southeast Asian metallurgy derives, by some means, from foreign influence from the north, we need to establish whether Xepon metal technologies follow a comparable evolutionary sequence to those in Khao Wong Prachan local innovation in mining and smelting after exchange networks bring exposure to foreign casting techniques and artefacts (Pryce et al., 2011b, Pryce, et al., 2010). An alternative is that early Xepon metallurgy was practiced as a competent and complete technological package by foreign metalworkers or local people apprenticed by them (White*

> *and Hamilton, 2009). The former model requires a phase of initial experimentation by pre-existing upland populations, the latter model only an adaptation for local resources by experienced new- comers. "*(T. O. Pryce et al., 2014, p.292).

Pour tenter de répondre à ces questionnements, nous disposons maintenant d'un ensemble de nouvelles données sur la production de cuivre de Vilabouly. Notre corpus correspond principalement à l'âge du Fer, mais nous avons vu qu'une activité durant l'âge du Bronze était plus que probable. Les données ne semblent pas montrer de traces d'une évolution locale, mais la présence d'une production homogène, sans changements majeurs sur l'ensemble des séquences archéologiques étudiées. Cette observation reviendrait alors à dire que la métallurgie du cuivre provient d'une source externe et a été introduite à Vilabouly sous une forme déjà développée. Seule la typologie de certains objets, notamment les lingots, semble symboliser un changement. En effet, les contextes identifiés comme des tombes à Puen Baolo montreraient une différence entre les contextes les plus profonds, associés aux lingots dits nœud papillon, et les contextes les plus proches de la surface avec des lingots coniques, ainsi que la présence d'objets ferreux. Ces deux types de contextes funéraires pourraient alors signifier une évolution dans le répertoire stylistique du complexe et l'introduction d'objets ferreux. En revanche, rien ne vient à ce jour montrer une évolution majeure dans les procédés de production de cuivre en eux-mêmes.

Si on reprend alors les questionnements de T.O Pryce, les datations dont nous disposons ne nous permettent pas de discuter de l'origine de la métallurgie et d'y répondre. En revanche, si on rapproche ces questionnements aux interactions de l'âge du Fer, alors les caractéristiques du Complexe de Vilabouly se rapprocheraient davantage de la seconde hypothèse, celle de l'introduction de communautés exogènes à Vilabouly pour des périodes encore non déterminées. La présence d'objets témoins d'échanges avec le Vietnam et/ou la Chine, comme les *ge* et les tambours, témoigne au minimum de contacts indirects avec les populations de l'actuel Vietnam. L'identification d'une hallebarde *ge* avec la signature isotopique de Vilabouly renvoie à des questionnements encore plus forts. En effet, elle pourrait être le signe de la présence d'artisans vietnamiens et/ou chinois dans la région de Vilabouly, ainsi que de transferts techniques et de la production locale d'objets appartenant à la culture matérielle vietnamienne/chinoise.

Les communautés de Vilabouly pourraient être implantées dans plusieurs sphères d'interactions et réseaux d'échanges parallèles reliant le Vietnam, la province de Savannakhet, la Thaïlande et le Cambodge. Ces réseaux auraient permis la distribution des productions de Vilabouly, tout en contribuant à l'introduction de répertoires stylistiques/objets non

régionaux, comme les *ge*, les tambours *Dong son* et les perles en verre. Le cuivre de Vilabouly aurait potentiellement été échangé jusqu'au Myanmar actuel, suivant des réseaux encore mal définis.

L'étude de la culture matérielle du delta du Mékong ainsi que d'autres sites au Cambodge et en Thaïlande (A. K. Carter, 2015; A. K. Carter et al., 2020) a également démontré la présence de plusieurs réseaux parallèles et interconnectés n'impliquant pas les mêmes biens. Ces études regroupent des données pour les perles en verre et en pierres dures, mais les mêmes questionnements seraient intéressants concernant les réseaux d'échanges de métaux. Précédemment, les données pour les ornements en pierres dures avaient également permis de montrer la présence de deux périodes d'échanges successives pour l'âge du Fer (B. Bellina, 2001, 2003) avec un accroissement des échanges durant la seconde phase (100-300 ap. J.-C). La faible résolution chronologique disponible pour Vilabouly ne nous permet malheureusement pas de distinguer ces périodes dans les échanges.

Les données isotopiques démontrent que loin d'être une zone en marge comme on pourrait à priori le penser, le Complexe de Vilabouly, serait alors pleinement intégré dans les voies d'échanges, en démontrant la place qu'occupaient les communautés des montages dans un schéma impliquant des relations directes ou indirectes avec les communautés des plaines et des côtes. Les denrées échangées contre le cuivre sont en revanche mal définies et nous ne disposons d'aucun élément afin d'y répondre. La localisation des matières premières d'intérêts comme le cuivre apparaît alors fondamentale pour comprendre l'organisation du territoire durant une époque où les premières autorités politiques et sociales se mettent en place et cherchent à accroître leurs influences.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'Asie du Sud-Est continentale est une région qui souffre encore d'un manque de données archéologiques, particulièrement pour les sociétés protohistoriques qui ont longtemps été laissées de côté au profit de celles de la période historique. Le développement et les caractéristiques de la métallurgie du cuivre n'échappent pas à ce constat. Cette thèse avait pour principal objectif d'étudier et de placer dans le contexte régional d'Asie du Sud-Est, le site de production de cuivre du Complexe de Vilabouly, au centre du Laos actuel, daté de la fin de la période préhistorique. L'étude du Complexe de Vilabouly avait pour but d'identifier de potentiels transferts techniques et les développements de la métallurgie au Laos, pouvant ainsi servir de proxy aux déplacements et interactions des communautés dans la région. Dans cette perspective, les différents éléments en lien avec la production du cuivre, découverts pour le Complexe de Vilabouly, ont été étudiés en laboratoire afin de proposer une reconstitution de la chaine opératoire et de ses potentielles variations.

Afin de répondre à ces objectifs, différents types d'artéfacts que nous pensons en lien avec la production métallurgique ont été sélectionnés afin d'être étudiés en laboratoire, suivant une méthodologie archéométrique adaptée, nous permettant ainsi d'avoir accès à des données structurales, compositionnelles et de microstructure. En l'occurrence, le corpus d'étude se composait de fragments de minerais, de scories, de céramiques techniques ainsi que de différentes typologies d'objets en cuivre et alliage cuivreux.

L'application des analyses isotopiques du plomb, une comparaison avec une base de données déjà établie, ainsi que des comparaisons techniques, chimiques, isotopiques et typologiques, nous ont ensuite permis d'aborder la question de la place et de la circulation des productions de Vilabouly en Asie du Sud-Est.

La chaine opératoire du Complexe de Vilabouly

Les différentes données ainsi acquises nous ont permis de proposer une chaine opératoire de production du cuivre pour le Complexe de Vilabouly, qui va de l'extraction des minerais perçue par la présence abondante de puits de mine, la fonderie et la potentielle réalisation d'alliages, en passant par la réduction. Les résultats suggèrent une production utilisant des creusets comme vaisselles de réactions au cours d'un procédé en une étape réductrice, avec une charge principalement composée de malachite et occasionnellement d'un mélange de minerais (très probablement malachite/chalcocite), en fonction des minéralisations exploitées. Les minerais employés étaient relativement riches, menant à une faible production de scories. Le creuset était probablement associé à un foyer dont la forme et les dimensions

sont difficiles à déterminer, car une multitude de fosses différentes a été mise au jour. Les niveaux archéologiques perturbés n'ont pas permis de mettre en avant des évolutions dans ces types de fosses en fonction de la stratigraphie. Le procédé de Vilabouly était efficace et maîtrisé résultant en des sous-produits (scories) homogènes avec peu d'inclusions qui n'ont pas réagi et peu de cuivre résiduel. La majorité des scories correspondent au type des *plattenschlacke* déjà largement connues pour la métallurgie du cuivre en Europe à l'âge du Bronze.

Le Complexe de Vilabouly semblait principalement orienté vers la production de lingots en cuivre qui sont majoritaires dans les niveaux archéologiques. Les objets finis, de typologies variées (haches, pointe de lance, burin, épingle, tambours, cloches), correspondent en grande majorité à des bronzes à taux variables d'étain, ainsi qu'à des bronzes au plomb. La pratique de l'alliage pourrait être attendue pour le Complexe de Vilabouly. Cette dernière n'est observée que par les résultats isotopiques du plomb, démontrant des correspondances de certains objets en bronze à la signature de Vilabouly. Aucun élément ne vient cependant à ce jour confirmer la pratique de l'alliage sur le site (moules, traces d'étain, etc.).

Différentes typologies de lingots ont ainsi été découvertes (nœud papillon, conique et bol), mais les données disponibles ne nous permettent pas de statuer sur l'origine de ces différentes typologies. Des évolutions techniques et/ou des répertoires stylistiques au cours du temps pourraient être une explication, bien que les datations ne permettent pas le dire. Des variations techniques ou chronologiques n'ont pas été observées. En effet, les artéfacts étudiés se présentent comme un ensemble relativement homogène, et parce que les contextes archéologiques et les datations, peu nombreuses, ne permettent pas de définir des séquences chronologiques précises.

Malgré tout, des différences ont été observées entre les deux sites de production principaux du Complexe de Vilabouly, Puen Baolo et Thong Na Nguak. En effet, l'étude des scories a principalement permis de montrer que des différences dans les matières premières employées dans la charge existaient et peut être des changements au cours du temps des minéralisations exploitées. Ces variations ont été reliées à deux zones de minéralisations différentes, qui sont actuellement exploitées par la mine moderne : Thengkham pour Puen Baolo et Khanong pour Thong Na Nguak. Cette observation est renforcée par les résultats isotopiques sur les lingots des deux sites qui semblent montrer de petites, mais claires distinctions. De plus, Puen Baolo et Thong Na Nguak se différencient également par les contextes funéraires : en fosse à Puen Baolo et en urne à Thong Na Nguak/Khanong. Les différences présentent entre Puen Baolo et Thong Na Nguak pourraient, soit provenir de la

présence de différentes communautés et/ou de variations au cours du temps. Encore une fois, cette dernière hypothèse demeure difficile à vérifier en l'absence de datations bien définies.

Comparaisons en Asie du Sud-Est continentale

Les données du Complexe de Vilabouly comparées aux connaissances régionales en matière de métallurgie permettent de montrer une récurrence régionale pour l'utilisation de creusets pour la production du cuivre à la fin de la période préhistorique (env. 1000 av. J.-C- env. 500 ap. J.-C). En effet, les creusets se retrouvent pour tous les sites liés à des signes d'une production de cuivre. Ils semblent être employés pour des activités primaires, mais également secondaires, pour l'alliage, l'affinage ou la fonderie.

L'étude comparative la plus pertinente correspond à celle avec la Vallée de Khao Wong Prachan (KWPV) au centre de la Thaïlande, un des deux autres sites de production primaire connus et largement étudiés pour l'Asie du Sud-Est de la fin de la préhistoire. Les données obtenues pour le Complexe de Vilabouly permettent pour la première fois cette comparaison entre deux sites majeurs de production du cuivre dans la région. Cette comparaison révèle de fortes correspondances, malgré quelques variations locales liées aux matières premières. En effet, les deux sites emploient des creusets comme vaisselle de réaction, l'utilisation d'un mélange de minerais ainsi que la production majoritaire de lingots en cuivre. On identifie également une proche association des zones de production avec des contextes funéraires pour les deux zones.

Les principales différences entre KWPV et le Complexe de Vilabouly résident dans leur période d'activité puisque les datations récentes de KWPV placent l'activité principale des deux sites de Non Pa Wai et Nil Kham Haeng durant l'âge du Bronze (début de l'âge du Fer) alors que le Complexe de Vilabouly aurait principalement été actif durant l'âge du Fer. Ensuite, les quantités de matériel mises au jour différencient également KWPV de Vilabouly, car un seul sondage de KWPV donnait plusieurs tonnes de matériels, comparé à la quantité totale en contexte archéologique fouillé pour le Complexe de Vilabouly qui se compte en kilogrammes. Cette différence pourrait provenir des fouilles de sauvetage et de l'activité minière moderne à Vilabouly qui conditionne les fouilles et mène dans certains cas, à la destruction de zones archéologiques. De plus, les matières premières employées entre les deux zones sont également différentes avec des minerais plus riches à Vilabouly qui pourraient également expliquer une partie de la différence en termes de quantité de scories découvertes.

Ce travail vient également conforter l'existence de différentes zones qui produisaient et exportaient le cuivre à la fin de la préhistoire, dont Vilabouly, Phu Lon et KWPV sont trois représentants. Leurs modes de production partagent également des traits similaires que nous

avons listés. Ces derniers semblent pouvoir être liés à une évolution commune des pratiques (avec des variantes et des choix locaux) liées à des adaptations conditionnées par la pratique métallurgique (réduire, contenir le métal, puis le couler pour obtenir un objet, obtenir une forme pratique pour les échanges, etc.).

Les choix techniques identifiés pour les sites de production d'Asie du Sud-Est continentale apparaissent « simples », sans investissements de grande ampleur, mais leur permettent d'aboutir à la production de cuivre qui est leur but premier. Ce type de production étudiée en Asie du Sud-Est rejoint celui de nombreux autres sites des débuts de la métallurgie connus pour d'autres régions du monde.

En revanche, les discussions sur les modèles spécifiques d'organisations socio-politiques et d'échanges sont ici limitées. Les données ont permis de mettre en avant que les sites de productions primaires semblaient en majorité orientés vers la production de cuivre sous forme de lingots. Ce cuivre pourrait ensuite avoir été transformé en objets sur d'autres sites situés à plus de 100 km, principalement au sein d'habitats où d'autres types d'artisanats se retrouvent également. Les types d'objets produits demeurent simples et sont utilisés à l'échelle de ses habitats et potentiellement dans la région environnante.

L'étude du Complexe de Vilabouly avec les données actuelles ne remet pas en question le modèle d'organisation de production précédemment proposé par White et Pigott (1996) selon lequel la métallurgie était pratiquée selon un mode de production à l'échelle communautaire[49]. À l'âge du Bronze et particulièrement à l'âge du Fer, les premières formes de complexification sociale font leur apparition pour certains sites d'Asie du Sud-Est continentale et sont variables en fonction des zones géographiques (côtes/bassins fluviaux versus intérieur des terres/montagnes). Ces premières formes de complexification ne concordent pas nécessairement à la naissance des premiers « états ». Ces communautés semblent davantage influencées par des modèles d'échanges complexes pour l'acquisition de denrées, comme le cuivre, bâtis selon un maillage de sites interdépendants, sans une forme d'autorité pour certaines régions au sens où elle peut être perçue dans la formation d'un état.

Production et réseaux d'échanges

Les résultats des mesures isotopiques du plomb permettent de montrer que les produits de Vilabouly circulaient activement dans la région et jusqu'à des zones éloignées, puisque des objets potentiellement concordants ont pu être distingués en Thaïlande, au Cambodge et jusqu'au Myanmar actuels. Ces résultats ont alors permis d'amorcer une discussion sur les potentielles voies de circulation de ces objets et la forme qu'ils pouvaient prendre. La seconde

[49] *Community-based mode of production organisation* (White et Pigott, 1996, p. 151).

question sur la forme des objets n'a malheureusement pas pu être pleinement abordée, car très peu de données sont disponibles.

La majorité des objets concordant avec la signature du Complexe de Vilabouly correspond à des bracelets et des bagues, mais la présence majoritaire de lingots à Vilabouly laisse fortement suggérer que le cuivre pouvait circuler sous cette forme. De plus, la majorité des objets étudiés pour des sites de consommation proviennent de contextes funéraires, ce qui pourrait introduire un certain biais dans les résultats. Les objets avec une signature concordante représenteraient alors une forme transformée et finie du cuivre de Vilabouly sur d'autres lieux de production secondaire/consommation.

Quant aux potentielles voies de circulation, des réseaux d'échanges semblent envisageables entre le Vietnam, le Laos et la Thaïlande, jusqu'au Cambodge actuel. Des objets avec la signature isotopique du plomb de Vilabouly ont ainsi été identifiés pour le nord du Laos, le plateau du Khorat et le Cambodge. De plus, la géographie entre ces zones géographiques est assez propice aux échanges, car elle est traversée par de nombreux axes fluviaux. Les réseaux d'échanges maritimes auraient également pu permettre l'acheminement de cuivre de Vilabouly jusqu'à des zones éloignées, comme le Myanmar et la péninsule Thaï-malaise où des objets sont concordants.

Les données des perles en verre et en pierres dures du Cambodge et de Thaïlande ont permis de proposer l'existence d'une sphère d'interaction autour du Mékong (*Mekong Interaction Sphere*, A. K. Carter, 2015; A. K. Carter et al., 2020) dont le Laos pourrait faire partie. Cette sphère d'interaction relierait des sites du delta du Mékong, avec un accès aux échanges de la mer de Chine méridionale, aux sites de l'intérieur des terres au nord du Cambodge et de la Thaïlande. Des réseaux d'échanges parallèles et interconnectés ont ainsi été mis en avant permettant la circulation de certains biens comme les perles en verre et en pierres dures. L'implication de la matière première du cuivre et de ses dérivés dans ses réseaux n'est encore pas définie, mais pourrait se révéler intéressante pour discuter des différentes interactions de la région.

Comme nous l'avons vu, durant l'âge du Fer, une culture fortement ouverte aux réseaux d'échanges maritimes voit également le jour sur les côtes centrales du Vietnam, celle de *Sa Huynh*. Le Complexe de Vilabouly se situe alors à environ 100 kilomètres géodésiques des côtes du Vietnam et ces contacts, tout comme ceux avec le delta du Mékong, pourraient également expliquer la forte dispersion des productions de Vilabouly en Asie du Sud-Est continentale. On perçoit alors que loin d'être un site enclavé à priori éloigné des échanges maritimes, le Complexe de Vilabouly pourrait se situer à un emplacement privilégié, possédant une ressource clé qu'est le cuivre. Le cuivre pourrait alors constituer une ressource dont les

grands centres impliqués dans les échanges maritimes, comme les sites de la culture *Sa Huynh* au centre du Vietnam, étaient en demande.

Nous avons également mentionné le modèle théorique d'échanges dendritique de Bronson (1977) et celui du « Mandala ». Un modèle hybride a été proposé pour la péninsule Thaï-malaise avec plusieurs cités inter-connectées possédant différentes spécialisations ainsi que des alliances, une domination changeante et dont le contrôle pourrait parfois s'étendre à des réseaux fluviaux éloignés. La géographie de la région de Vilabouly et du Vietnam apparaît alors différente, mais certains de ces modèles d'échanges pourraient également être appliqués à ce contexte. Même si les données sont encore manquantes, il semblerait que la culture *Sa Huynh* ait pu profiter des ressources offertes par la chaine annamitique, dont on pourrait envisager que le cuivre du Complexe de Vilabouly fasse partie. L'implication de Vilabouly dans les réseaux d'échanges de la culture *Sa Huynh* devrait être appréhendée dans le futur.

Les données isotopiques ne nous renseignent pas pour le centre du Vietnam, car elles sont manquantes à ce jour. En revanche, l'identification d'objets avec une typologie témoin d'échanges, les *ge* et les tambours, ces derniers étant largement distribués en Asie du du Sud-Est, ainsi que l'identification de contextes funéraires en urne, pourraient alors représenter un premier témoin des contacts avec l'actuel Vietnam et peut-être davantage encore. En effet, l'identification d'une hallebarde *ge* avec la signature isotopique de Vilabouly est venue introduire la possibilité de la présence d'artisans exogènes à Vilabouly, potentiellement Han (chinois) ou du moins du Vietnam actuel. Ces artisans auraient pu apporter leurs techniques et répertoires stylistiques.

L'hypothèse de la présence d'artisans exogènes ne pourra être confirmée que par une étude approfondie des savoir-faire et des compétences nécessaires pour la réalisation de ces types d'objets sur des corpus plus larges. Les différences typologiques perçues entre le *ge* de Puen Baolo et les *ge* découverts hors fouille (musée de Vilabouly) constituent un premier jalon.

Les tambours sont un des types d'objets cuivreux les plus sophistiqués pour la fin de la préhistoire en Asie du Sud-Est, puisque nous avons mentionné que les objets fabriqués tendaient plutôt à être utilitaires ou de petits ornements comme des bracelets. La réalisation des tambours de type *Dong son* impliquerait donc des compétences qu'on pourrait définir comme plus élevées, requérant des techniques plus élaborées. Bien évidemment, nous reconnaissons que cette hypothèse repose pour l'instant sur peu de données, mais elle constitue une piste intéressante à poursuivre, car elle possède des implications fortes pour la reconstitution des mouvements de populations et des transferts techniques au centre du Laos.

Perspectives de recherches

Ce travail offre différentes perspectives pour de futures recherches. Concernant le Complexe de Vilabouly, le contexte de fouilles de sauvetage et de l'activité actuelle de la mine a peut-être empêché la pleine exploitation du site, bien qu'elle ait aussi permis sa découverte. Nous espérons que de futures explorations et l'application de campagnes de datations plus larges, pour déterminer une chronologie, pourront être un jour envisagées par le nouveau détenteur de la concession Chifeng/LXML.

D'un point vu archéométrique, les résultats fournis durant cette thèse pour le Complexe de Vilabouly pourraient bien évidemment être complétés dans le futur, par l'application d'autres méthodes analytiques. Comme la µ-spectroscopie Mössbauer sur les scories qui permettraient d'avoir accès à la valence du fer dans les échantillons et complèteraient alors les réflexions sur le degré d'oxydation des scories et donc sur la pression partielle d'oxygène dans le réacteur. Ou encore l'analyse des éléments trace dans les échantillons de métal par LA-ICP-MS par exemple, qui pourrait venir étoffer les résultats des mesures isotopiques du plomb et les questions de provenance et de circulation. La mise en place de nouvelles expérimentations serait également à envisager afin de tenter de modéliser les scories plates que nous n'avons pas obtenues durant les expérimentations réalisées au cours de cette thèse et d'ainsi renforcer les hypothèses établies sur le procédé. Ces autres données pourraient permettre une comparaison plus approfondie avec les autres sites de production connus et les questions relatives aux techniques.

Cette thèse a permis d'enrichir les connaissances régionales en matière de production du cuivre et plus particulièrement, pour la production primaire, qui n'était connue avant que pour deux autres sites. Même si ces nouvelles données constituent une avancée, nous sommes encore loin d'appréhender toutes les facettes des caractéristiques et du développement de la métallurgie du cuivre en Asie du Sud-Est continentale. La nécessité de poursuivre les explorations pour de nouvelles régions et de découvrir de nouveaux sites se fait percevoir afin de compléter la carte des productions régionales de cuivre et leur implication plus large dans le développement des communautés protohistoriques, car beaucoup d'inconnues demeurent encore. La région souffre encore d'un manque d'études typologiques de grande ampleur, notamment pour les objets à base de cuivre, qui pourraient venir renseigner sur la circulation des répertoires stylistiques et des techniques à l'échelle de la région. Le cuivre ne constitue pas la seule ressource d'importance pour la métallurgie du cuivre, l'étain et le plomb sont également pleinement utilisés pour la fabrication des objets à base de cuivre à la fin de la préhistoire. Notre manque de connaissances sur les sites miniers anciens et de production

pour l'étain et le plomb empêche également une vision complète et exhaustive de la métallurgie du cuivre, de la circulation/échanges de ces matières premières.

Les hypothèses sur les potentielles voies de communication dans lesquelles Vilabouly était impliquée souffrent également d'un manque de donnée à l'échelle de la région et doivent être confirmées par de futures recherches. Notamment pour le Vietnam, particulièrement le centre et le sud, pour lequel nous percevons la nécessité d'étudier les collections d'objets à base de cuivre de la culture *Sa Huynh* et la culture *Sa Huynh* d'une manière plus générale, afin d'appréhender pleinement son rôle dans la région du Complexe de Vilabouly. Les recherches au nord du Vietnam et au Cambodge permettraient également de compléter les données sur les discussions de sphères d'interactions et d'échanges. Le Laos souffre également d'un manque de sites protohistoriques connus et étudiés ce qui empêche une remise en contexte de Vilabouly dans sa région immédiate.

Les études récentes nous orientent de plus en plus vers la définition de réseaux d'échanges complexes, parallèles et interconnectés, impliquant des objets et des techniques hybrides avec un style pan-regional et des variantes en fonction des zones géographiques. Définir ces réseaux pour les métaux permettrait d'enrichir le débat sur les interactions et les échanges entre les différentes communautés d'Asie du Sud-Est, ainsi que sur la transmission des répertoires, des techniques et des cultures matérielles.

Références bibliographiques

ADDIS, A., ANGELINI, I., NIMIS, P., ARTIOLI, G., "Late Bronze Age Copper Smelting Slags from Luserna (Trentino, Italy): Interpretation of the Metallurgical Process", *Archaeometry*, 2016, vol. 58, p. 96-114.

ADDIS, A., ANGELINI, I., ARTIOLI, G., "Late Bronze Age copper smelting in the southeastern Alps: how standardized was the smelting process? Evidence from Transacqua and Segonzano, Trentino, Italy", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2017, vol. 9, p. 985-999.

AGRICOLA, G., *De Re Metallica*, (Hoover, H. & L. H. Hoover, Éd.), Dover Publications, 1998.

ALLARD, "Frontiers and Boundaries: The Han Empire from its Southern Periphery", dans *Crossing Boundaries and Ancient Asian States*, Stark, M. T. (éd.), 2005, p. 233-245.

ALLARD, F., "Stirrings at the Periphery: History, Archaeology, and the Study of Dian", *International Journal of Historical Archeology*, 1998, vol. 2, p. 321-341.

ALLARD, F., "China'S Early Impact on Eastern Yunnan: Incorporation, Acculturation, and the Convergence of Evidence", *Journal of Indo-Pacific Archaeology*, 2015, vol. 35, p. 26-35.

AMBERT, P., BALESTRO, F., LAROCHE, M., FIGUEROA, V., ROVIRA, S., "Technological aspects of the earliest metallurgy in France: « furnaces » and slags from La Capitelle du Broum (Péret, France)", *Historical metallurgy*, 2013, vol. 47, p. 60-74.

ANFINSET, N., *Social and Technological Aspects of Mining, Smelting and Casting Copper : An ethnoarchaeological Study from Nepal*, Deutsch Bergbau-Museum, Bochum, 2011.

ANGUILANO, L., ANGELINI, I., ARTIOLI, G., MORONI, M., BAUMGARTEN, B., OBERRAUCH, H., "Smelting slags from Copper and Bronze Age archaeological sites in Trentino and Alto Adige", dans *Proceedings for the II Congresso Nazionale di Archeometria (A.i.A.r), 29 January – 1 February 2002*, D'Amico, C. (éd.), Bologna, 2002, p. 627–638.

ARCHAIMBAULT, C., "Les rites d'ouverture de la mine de fer de Bàn Bo Mon (Laos)", *Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient*, 1985, vol. 74, p. 369-401.

ARDIKA, I. W., BELLWOOD, P. S., "Sembiran: the beginnings of Indian contact with Bali", *Antiquity*, 1991, vol. 65, p. 221-232.

ARDIKA, I. W., BELLWOOD, P. S., EGGLETON, R. A., ELLIS, D. J., "A single source for South Asian export-quality Rouletted Ware", *Man and Environment*, 1993, vol. 18, p. 101-109.

ARLES, A., *Entre monnayage officiel et faux-monnayage. La fabrication de la monnaie au marteau en France (XIIIe-XVIIe siècles). Approche physico-chimique, expérimentale et historique*, Thèse de Doctorat non publiée. Université d'Orléans, 2009.

ARNOLD, D. E., *Ceramic theory and cultural process*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

ARTIOLI, G., ANGELINI, I., TECCHIATI, U., PEDROTTI, A., "Eneolithic copper smelting slags in the Eastern Alps: Local patterns of metallurgical exploitation in the Copper Age", *Journal of Archaeological Science*, 2015.

ASCHER, R., "Experimental archaeology", *American Anthropologist*, 1961, vol. 63, p. 793-816.

BACHMANN, H. G., "Early copper smelting techniques in Sinai and in the Negev as deduced from slag investigations", dans *Scientific Studies in Early Mining and Extractive Metallurgy*, Craddock, P. . (éd.), British Museum Press, 1980, p. 103-134.

BACHMANN, H. G., *The identification of slags from archaeological sites*, Institute of Archaeology, London, 1982.

BAONOED, S., *Non Nong Ho, the Manufacturing Site of Bronze Drums in Thailand*, in thai. Ubon Ratchathani, 2010.

BAONOED, S., "Non Nong Hor: The Production Site of Bronze Drum in Thailand", dans *Abstracts of The 2nd SEAMEO SPAFA International Conference on Southeast Asian archaeology, 30th May-2nd June*, Bangkok, 2016.

BARON, S., TĂMAS, C. G., LE CARLIER, C., "How mineralogy and geochemistry can improve the significance of Pb isotopes in metal provenance studies", *Archaeometry*, 2014, vol. 56, p. 665-680.

BAXTER, M. J., "A review of supervised and unsupervised pattern recognition in archaeometry", *Archaeometry*, 2006, vol. 48, p. 671-694.

BAYARD, D., "Rank and wealth at Non Nok Tha: the mortuary evidence", dans *Southeast Asian Archaeology at the Fifteenth Pacific Science Congress*, Bayard, D. (éd.), University of Otago, 1984, p. 87-218.

BAYARD, D., SOLHEIM II, W. G., *Archaeological Excavations at Non Nok Tha Northeastern Thailand 1965-1968: Part I*, Micronesian Area Research Center, Univeristy of Guam, 2009.

BAYARD, D. T., "Early Thai bronze: analysis and new dates", *Science*, 1972, vol. 176, p. 1411-1412.

BAYLEY, J., REHREN, T., "Towards a functional and typological classification of crucibles", dans *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*, La Niece, S., D. Hook & P. T. Craddock (éd.), Archetype book, 2007, p. 46-55.

BEGLEY, V., "Changing perceptions on Arikamedu", dans *The ancient port of Arikamedu: new excavations and researches 1989–1992, volume 1*, Begley, V. (éd.), Ecole française d'Extrême-Orient, Paris, 1996, p. 1-40.

BELLINA, B., *Témoinages archéologiques d'échanges entre l'Inde et l'Asie du Sud-Est: morphologie, morphométrie et techniques de fabrication des perles en agate et en cornaline (VIe siècle avant notre ère - VIe siècle de notre ère)*, Thèse de doctorat. Université Paris III, 2001.

BELLINA, B., "Beads, social change and interaction between India and Southeast Asia", *Antiquity*, 2003, vol. 77, p. 292-305.

BELLINA, B., GLOVER, I. C., "The archaeology of early contact with India and the Mediterranean World, from the fourth century BC to the fourth century AD", dans *Southeast Asia from prehistory to history*, Glover, I. C. & P. S. Bellwood (éd.), Routledge Curzon, London, 2004, p. 68-88.

BELLINA, B., *Cultural exchange between India and Southeast Asia. Production and distribution of hard stone ornaments (VI c. BC-VI c. AD)*, Edition de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 2007.

BELLINA, B., EPINAL, G., FAVEREAU, A., "Caractérisation préliminaire des poteries marqueurs d'échanges en mer de Chine méridionale à la fin de la préhistoire", *Archipel*, 2012, vol. 84, p. 7-33.

BELLINA, B., "Maritime Silk Roads' Ornament Industries: Socio-political Practices and Cultural Transfers in the South China Sea", *Cambridge Archaeological Journal*, 2014, vol. 24, p. 345-377.

BELLINA, B., SILAPANTH, P., CHAISUWAN, B., ALLEN, J., BERNARD, V., BORELL, B., CASTILLO, C., DUSSUBIEUX, L.,

SILAPANTH, P., CHAISUWAN, B., THONGCHAROENCHAIKIT, C., ALLEN, J., "The Development of Coastal Polities in the Upper Thai-Malay Peninsula", dans *Before Siam: Essays in Art and Archaeology*, Revire, N. & S. Murphy (éd.), River Book, 2014, p. 69-89.

BELLINA, B., *Khao Sam Kaeo: an early Port-City between the Indian Ocean and the South China Sea*, (Bellina, B., Éd.), EFEO, 2017.

BELLINA, B., "Development of maritime Trade Polities and diffusion of the « South China Sea Sphere of Interaction pan-regional culture »: The Khao Sek excavations and industries' studies contribution", *Archaeological Research in Asia*, 2018a, vol. 13, p. 1-12.

BELLINA, B., WIN, M. S., MYAT, K., HTWE, M., THU, H. M., CASTILLO, C., COLONNA, C., DUSSUBIEUX, L., FAVEREAU, A., MIYAMA, E., PRADIER, B., PRYCE, T. O., SRIKANLAYA, S., TRIVIERE, E., "Myanmar ' s earliest Maritime Silk Road port-settlements revealed", *Antiquity*, 2018, vol. 92, p. 1-5.

BELLINA, B., FAVEREAU, A., DUSSUBIEUX, L., "Southeast Asian early Maritime Silk Road trading polities' hinterland and the sea-nomads of the Isthmus of Kra", *Journal of Anthropological Archaeology*, 2019, vol. 54, p. 102-120.

BELLWOOD, P. S., "Southeast Asia before history", dans *The Cambridge History of Southeast Asia*, Tarling, N. (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, 1992, p. 55-136.

BELLWOOD, P. S., *First Farmers: The Origins of Agricultural Societies*, Blackwell Publishing Ltd, Oxford, 2005.

BELLWOOD, P. S., "Asian Farming Diasporas? Agriculture, Languages, and Genes in China and Southeast Asia", dans *Archaeology of Asia*, Stark, M. T. (éd.), Blackwell Publishing Ltd, Oxford, 2006, p. 97-118.

BELLWOOD, P. S., DIZON, E., "Austronesian cultural origins :Out of Taiwan , via the Batanes Islands , and onwards to Western Polynesia", dans *Past human migrations in East Asia: matching archaeology, linguistics and genetics*, Sanchez-Mazas, A., R. Blench, M. D. Ross, M. Lin & M. Peiros (éd.), London, 2008, p. 23-39.

BENDA, H. J., "The structure of Southeast Asian History", *Journal of Southeast Asian History*, 1962, vol. 3, p. 103-138.

BENNETT, A., *The Iron from Ban Don Ta Phet, Thailand*, 1982.

BENNETT, A., "Prehistoric Copper Smelting in Central Thailand", dans *Prehistoric Studies the Stone and Metal Ages in Thailand*, Charoenwongsa & B. Bronson (éd.), Bangkok, 1988a, p. 125-135.

BENNETT, A., *Copper Metallurgy in Central Thailand*, Unpublished doctoral thesis. Institute of Archaeology, University College London, 1988b.

BENNETT, A., "The Contribution of Metallurgical Studies to South-East Asian Archaeology", *World Archaeology*, 1989, vol. 20, p. 329-351.

BENNETT, A., GLOVER, I. C., "Decorated high-tin bronzes from Thailand's prehistory", dans *Southeast Asian Archaeology 1990*, Glover, I. C. (éd.), Hull University: Centre for Southeast Asian Studies, 1992, p. 101-114.

BENNETT, A., "Gold in early Southeast Asia", *ArchéoSciences*, 2009, vol. 33, p. 99-107.

BERNET KEMPERS, A. J., *The kettledrums of southeast Asia : a Bronze Age world and its aftermath*, Balkema, Rotterdam, 1988.

BIGGS, L., BELLINA, B., MARTINON-TORRES, M., PRYCE, T. O., "Prehistoric iron production technologies in the Upper Thai-Malay Peninsula: metallography and slag inclusion analyses of iron artefacts from Khao Sam Kaeo and Phu Khao Thong", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2013, vol. 5, p. 311-329.

BLONDEL, F., *La géologie et les mines de l'Indochine française, étude sur l'industrie minérale indigène indochinoise*, Société d'éditions géographiques, maritimes, et coloniales, Paris, 1932.

BLUST, R., "The prehistory of the Austronesian-speaking peoples: A view from language", *Journal of World prehistory*, 1995, vol. 9, p. 453-510.

BOLTZ, "Early Chinese Writing", *World Archaeology*, 1986, vol. 17, p. 420-436.

BOLTZ, "The invention of writing in China", *Oriens Extremus*, 2000, vol. 42, p. 1-17.

BORELL, B., "Stone Seals and Intaglios from Khao Sam Kaeo", dans *Khao Sam Kaeo. An Early Port-City between the Indian Ocean and the South China Sea*, Bellina, B. (éd.), École francaise d'Extrême-Orient, Paris, 2017, p. 587-618.

BORELL, B., "A Roman gold coin found in Peninsular Thailand", dans *The Golden Land SUVARNABHUMI .The new finding for SUVARNABHUMI*, Pongpanish, B. & S. Thinapong (éd.), GISTDA and BIA, 2019, p. 57-67.

BOSCHER, L. C., *Reconstructing the Arsenical Copper Production Process in Early Bronze Age Southwest Asia*, Thèse de doctorat non publiée. University College London, 2016.

BOURDONNEAU, E., "The ancient canal system of the Mekong Delta - preliminary report.", dans *Fishbones and Glittering Emblems. Southeast Asia Archaeology 2002*, Källen, A. & A. Karlström (éd.), Museum of Far Eastern Antiquities, 2003, p. 257-270.

BOURDONNEAU, E., *Indianisation et formation de l'État en Asie du Sud-Est : Retour sur trente ans d'historiographie . Matériaux pour l'étude du Cambodge ancien*, Thèse de doctorat non publiée. Université Paris I., 2005.

BOURGARIT, D., MILLE, B., "La transformation en métal de minerais de cuivre à base de sulfures : et pourquoi pas dès le Chalcolithique", *Revue d'Archéométrie*, 2001, vol. 25, p. 145-155.

BOURGARIT, D., "Chalcolithic copper smelting", dans *Proceedings of the confrence on metallurgy–a touchstone for cross-cultural interaction, The British Museum*, 2007.

BOURGARIT, D., ROSTAN, P., CAROZZA, L., MILLE, B., ARTIOLI, G., "Vingt ans de recherches à Saint-Véran, Hautes Alpes: état des connaissances de l'activité de production de cuivre à l'âge du Bronze ancien", *Trabajos de Prehistoria*, 2010, vol. 67, p. 269-285.

BOUVET, P., *Interactions culturelles entre l'Asie du Sud-Est et l'Inde aux 4è-2è s. av. J.-C: étude technologique des céramiques de Khao Sam Kaeo (Thaïlande péninsulaire, province de Chumphon)*, Dissertation de Doctorat non publiée. Université Paris-Ouest Nanterre la Défence, 2012.

BOUVET, P., "Lustrous black and red Wares", dans *Khao Sam Kaeo - An Early Port-City between the India Ocean and the South China Sea*, Bellina, B. (éd.), Ecole française d'Extrême-Orient, Paris, 2017, p. 309-345.

BOWEN, N. L., SCHAIRER, J. F., "The system MgO-FeO-SiO2", *Am J Sci*, 1935, vol. 29, p. 151-217.

BRAY, P., CUENOD, A., GOSDEN, C., HOMMEL, P., LIU, R., POLLARD, A. M., "Form and flow: The « karmic cycle » of copper", *Journal of Archaeological Science*, 2015, vol. 56, p. 202-209.

BRAY, P. J., POLLARD, M. A., CARVER, M., "A new interpretative approach to the chemistry of copper-

alloy objects", *Antiquity*, 2012, vol. 86, p. 853-866.

BRONSON, B., "Exchange at the Upstream and Downstream Ends: Notes toward a Functional Model of the Coastal State in Southeast Asia", dans *Economic Exchange and Social Interaction in Southeast Asia*, Hutterer, K. L. (éd.), University of Michigan Press, 1978, p. 39-52.

BRONSON, B., CHAROENWONGSA, P., *Eyewitness Accounts of the Early Mining and Smelting of Metals in Mainland Southeast Asia*, Thailand Academic publishing Co, Bangkok, 1986.

BRONSON, B., "The transition to iron in Ancient China", dans *The archaeometallurgy of the Asian Old World. MASCA Research Papers in Science and Archaeology 16*, Pigott, V. C. (éd.), University of Pennsylvania Museum, Philadelphia, 1999, p. 177-198.

BUNOPAS, S., VELLA, P., "Tectonic and geologic evolution of Thailand", dans *Proceedings of the Workshop on stratigraphic correlation of Thailand and Malaysia, Haad Yai, Thailand, 8-10 September, 1983*, Nutalaya, P. (éd.), 1983, p. 307-323.

BURGER, E., *Métallurgie extractive protohistorique du cuivre :Etude thermodynamique et cinétique des réactions chimiques de transformation de minerais de cuivre sulfurés en métal et caractérisation des procédés*, Thèse de doctorat non publiée. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008.

BURGER, E., BOURGARIT, D., WATTIAUX, A., FIALIN, M., "The reconstruction of the first copper-smelting processes in Europe during the 4th and the 3rd millennium BC: Where does the oxygen come from?", *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2010, vol. 100, p. 713-724.

BURGER, E., BOURGARIT, D., FROTTE, V., PILON, F., "Kinetics of iron-copper sulphides oxidation in relation to protohistoric copper smelting", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, vol. 103, p. 249-256.

CADET, M., SAYAVONGKHAMDY, T., SOUKSAVATDY, V., LUANGKHOTH, T., DILLMANN, P., CLOQUET, C., VERNET, J., PICCARDO, P., CHANG, N., EDGAR, J., FOY, E., PRYCE, T. O., "Laos' central role in Southeast Asian copper exchange networks: A multi-method study of bronzes from the Vilabouly Complex", *Journal of Archaeological Science*, 2019, vol. 109, p. 104988.

CALO, A., *The distribution of bronze drums in early Southeast Asia : trade routes and cultural spheres*, Archeopress, 2009.

CALO, A., *Trails of Bronze Age Drums Across Early Southeast Asia: Exchange Routes and Connected Cultural Spheres*, Institute of Southeast Asian Studies, Singapore, 2014.

CAMERON, K., CHANG, N., RAVENSCROFT, M., "Le mobilier de la sépulture de Tam Pà Ping: révélateur d'une pratique funéraire de la transition Néolithique/Age du Bronze dans les Hautes Terres du Laos", dans *Pà Hang, la montagne habitée: 100000 ans d'histoire de la biodiversité et de l'occupation humaine au nord du Laos*, Patole-Edoumba, E. & F. Demeter (éd.), Les Indes savantes-Museum d'Histoire Naturelle de la Rochelle, La Rochelle, 2018, p. 171-196.

CARIGNAN, J., HILD, P., MEVELLE, G., MOREL, J., YEGHICHEYAN, D., "Routine analyses of trace elements in geological samples using flow injection and low pressure on line liquid chromatography coupled to ICP-MS: a study of geochemical reference material BR, DR-N, EB-N, AN-G and GH", *Geostandards Newsletter*, 2001, vol. 25, p. 187-198.

CARRATONI, L., MEUCCI, C., RISPOLI, F., "Ceramics from prehistoric Non Pa Wai, central Thailand: A preliminary petrographic investigation", *Archaeological Research in Asia*, 2018, vol. 16, p. 116-129.

CARTER, A. K., LANKTON, J. W., "Analysis and comparison of glass beads from Ban Non Wat And Noen

U-Loke", dans *The Origins of Angkor, Volume 6: The Iron Age: Summary and Conclusions*, Higham, C. F. & A. Kijngam (éd.), Fine Art Department of Thailand, Bangkok, 2012, p. 91-114.

CARTER, A. K., "Beads, Exchange Networks and Emerging Complexity: A Case Study from Cambodia and Thailand (500 BCE-CE 500)", *Cambridge Archaeological Journal*, 2015, vol. 25, p. 733-757.

CARTER, A. K., "The Production and Exchange of Glass and Stone Beads in Southeast Asia from 500 BCE to the early second millennium CE: An assessment of the work of Peter Francis in light of recent research", *Archaeological Research in Asia*, 2016, vol. 6, p. 16-29.

CARTER, A. K., KIM, N. C., "Globalization at the Dawn of History: The emergence of global cultures in the Mekong and Red River Deltas", dans *The Routledge Handbook of Archaeology and Globalization*, Hodos, T. (éd.), 2017, p. 730-750.

CARTER, A. K., DUSSUBIEUX, L., STARK, M. T., GILG, H. A., "Angkor Borei and protohistoric trade networks: A view from the glass and stone bead assemblage", *Asian Perspectives*, 2020, vol. 60, p. 32-70.

CASTELLE, M., *Les techniques de fabrication de la grande statuaire en bronze 1540-1660 en France*, Dissertation de doctorat non publiée. Université Paris Saclay, 2016.

CASTILLO, C., FULLER, D. Q., "Still too fragmentary and dependent upon chance? Advances in the study of early Southeast Asian agriculture", dans *50 years of archaeology in Southeast Asia: studies in honour of Ian Glover*, Bellina, B., J. Wisseman Christie & T. O. Pryce (éd.), River Book, Bangkok, 2010, p. 90-111.

CASTILLO, C., "Rice in Thailand: The archaeobotanical contribution", *Rice*, 2011, vol. 4, p. 114-120.

CASTILLO, C. C., HIGHAM, C. F. W., MILLER, K., CHANG, N., DOUKA, K., HIGHAM, T. F. G., FULLER, D. Q., "Social responses to climate change in Iron Age north-east Thailand: new archaeobotanical evidence", *Antiquity*, 2018, vol. 92, p. 1274-1291.

CAWTE, H., *Archaeometallurgical investigations at Puen Baolo and Dragon Field, Savannakhet Province, Laos: Stage one, results and recommendations*, Report provided to Lane Xang Mineral Ltd, 2009.

CAWTE, H., "The crucibles and moulds", dans *The Origins of the civilization of Angkor: Volume 5: the excavation of Ban Non Wat: the Bronze Age*, Higham, C. F. & A. Kijngam (éd.), Fine Art Department of Thailand, Bangkok, 2012, p. 458-486.

CHAKRABARTI, D. K., *The early use of iron in India*, Oxford University Press, Delhi, 1992.

CHANG, N., *Puen Baolo VIII-IX, Thengkham East I-II and Khanong A2 II-IV: Archaeological Excavations-Managed Destruction*, 2015.

CHANG, N., *Archaeology on the MMG-LXML Sepon Operation tenement (Vilabouly Distric, Savannakhet Province, Laos)*, 2016.

CHARLTON, M., BLAKELOK, E., MARTINON-TORRES, M., YOUNG, T., "Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods", *Journal of Archaeological Science*, 2012, vol. 39, p. 2280-2293.

CHARLTON, M. F., CREW, P., REHREN, T., SHENNAN, S. J., "Explaining the evolution of ironmaking recipes - An example from northwest Wales", *Journal of Anthropological Archaeology*, 2010, vol. 29, p. 352-367.

CHATTOPADHYAY, P., DATTA, P. K., PRYCE, T. O., "Studies on High-Tin Bronze Specimens of Bengal", *Pratna Samishka*, 2013, vol. 4, p. 151-161.

CHEN, K., REHREN, T., MEI, J., ZHAO, C., "Special alloys from remote frontiers of the Shang Kingdom: scientific study of the Hanzhong bronzes from southwest Shaanxi, China", *Journal of Archaeological Science*, 2009, vol. 36, p. 2108-2118.

CHEN, K., MEI, J., REHREN, T., ZHAO, C., "Indigenous production and interregional exchange: late second-millennium BC bronzes from the Hanzhong basin, China", *Antiquity*, 2016, vol. 90, p. 665-678.

CHERNYKH, E., *Ancient Metallurgy in the USSR*, Cambridge university press, Cambridge, 1992.

CHERNYKH, E., "Ancient metallurgy in the Eurasian steppes and China: problems of interactions", dans *Metallurgy and civilization: Eurasia and beyond*, Mei, J. & T. Rehren (éd.), London, 2009, p. 3-8.

CHIANG, P., *Han Cultural and Political Influences in the Transformation of the Shizhaishan Cultural Complex*, Australian National University, 2008.

CHIANG, P., "The ge of the Shizhaishan Cultural Complex", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 2010, vol. 30, p. 98-113.

CHILDS, S. T., KILLICK, D., "Indigenous African metallurgy: nature and culture", *Annual Review of Anthropology*, 1993, vol. 22, p. 317-337.

CHIOU-PENG, T., "Early Copper-base Metals in Western Yunnan", dans *How objects tell stories: Essays in Honor of Emma C. Bunker*, Linduff, K. M. & K. S. Rubinson (éd.), Brepols Publishers, Turnhout-Belgium, 2018, p. 153-173.

CIARLA, R., "L'Antagonista Silenzioso: la Cultura Dian tra il II ed il I secolo a.C.", *Rivista degliStudi Orientali LX*, 1988, p. 45-87.

CIARLA, R., "Rethinking Yuanlongpo: The Case for Technological Links between the Lingnan (PRC) and Central Thailand in the Bronze Age", *East and West*, 2007, vol. 57, p. 305-328.

CIARLA, R., "The Thai-Italian « Lopburi Regional Archaeological Project » (L.o.R.A.P): Excavation at Khao Sai On-Noen Din 2008 Preliminary Report", *East and west*, 2008, vol. 57, p. 313-336.

CIARLA, R., *Interazioni culturali e tecnologiche tra Cina meridionale e Sudest asiatico continentale tra la fine del II millennio a.C. e l'inizio del I millennio a.C.: la dispersione meridionale della tecnologia del rame/bronzo*, Thèse de Doctorat non publiée. Università Ca'Foscari Venezia, 2013.

CLOQUET, C., CARIGNAN, J., LIBOUREL, G., "Atmospheric pollutant dispersion around an urban area using trace metal concentrations and Pb isotopic compositions in epiphytic lichens", *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, p. 574-587.

COEDES, G., *The Indianized States of Southeast Asia*, (Vella, W. F., Éd.), ANU Press, Canberra, 1975.

COLANI, M., "Les mégalithes du Haut-Laos", *Ecole Française d'Extrême Orient*, Les éditio, 1935, vol. 25.

COLANI, M., "Emploi de la pierre en des temps reculés : Annam, Indonésie, Assam", *BAVH*, 1940, p. 1-250.

COLES, M., "EXPERIMENTAL ARCHAEOLOGY", *Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland*,

1967, vol. 49, p. 1-20.

CONDOMINAS, G., "Aspects of Economics among the Mnong Gar of Vietnam: Multiple Money and the Middleman", *Ethnology*, 1972, vol. 11, p. 202-219.

CONINGHAM, R., YOUNG, R., *The Archaeology of South Asia: From the Indus to Asoka*, (Coningham, R. & R. Young, Éd.), Cambridge University Press, 2015.

COOKE, S. R. B., ASCHENBRENNER, S., "The Occurrence of Metallic Iron in Ancient Copper", *Journal of Field Archaeology*, 1975, vol. 2, p. 251-266.

COUPEY, A.-S., "Infant and Child Burials in the Samon Valley, Myanmar", dans *EurASEAA 2006*, 2006, p. 119-125.

COUPEY, A.-S., "Infant Jar Burials in Upper Burma", dans *Unearthing Southeast Asia's Past, selected papers from the 12th international conference of the European Association of Southeast Asian Archaeologists, vol. 1,*, Klokke, M. J. & V. Degroot (éd.), NUS Press, Singapore, 2013, p. 84-90.

CRADDOCK, P. T., MEEKS, N. ., "Iron in Ancient Copper", *Archaeometry*, 1987, vol. 29, p. 187-204.

CRADDOCK, P. T., *Early Metal Mining and Production*, Edinburgh University Press, Edinburgh, 1995.

CROMIE, P., MAKOUNDI, C., ZAW, K., COOKE, D. R., WHITE, N., RYAN, C., "Geochemistry of Au-bearing pyrite from the Sepon Mineral District, Laos PDR, Southeast Asia: Implications for ore genesis", *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 164, p. 194-218.

CROMIE, P. W., *Geological setting, geochemistry and genesis of the Sepon gold and copper deposits, Laos*, Unpublished doctoral thesis. Centre of Excellence in Ore Deposits University of Tasmania, 2010.

D'ALPOIM GUEDES, J., HANSON, S., LERTCHARNRIT, T., WEISS, A. D., PIGOTT, V. C., HIGHAM, C. F. W., HIGHAM, T. F. G., WEBER, S. A., "Three thousand years of farming strategies in central Thailand", *Antiquity*, 2020, vol. 94, p. 966-982.

DATTA, A., "Ancient ports of coastal Bengal and its overseas trade with Southeast Asia: an archaeological overview", dans *Southeast Asian Archaeology 1996*, Klokke, M. J. & T. de Bruijn (éd.), Centre of South-East Asian Studies, Hull, 1998, p. 87-98.

DATTA, P. K., CHATTOPADHYAY, P. K., RAY, P., "New evidence for high-tin bronze in ancient Bengal", *Society for Archaeological Sciences Bulletin*, 2007, vol. 30, p. 13-16.

DAVID, N., HEIMANN, R., KILLICK, D., WAYMAN, M., "Between bloomery and blast furnace: Mafa iron-smelting technology in North Cameroon", *The African Archaeological Review*, 1989, vol. 7, p. 183-208.

DE GUERNY, J., *Les Tambours de Bronze de l'Asie du Sud-Est: L'odyssée des tambours de bronze*, Hémisphères Éditions, Paris, 2017.

DEMETER, F., SHACKELFORD, L., WESTAWAY, K., DURINGER, P., BACON, A. M., PONCHE, J. L., WU, X., SAYAVONGKHAMDY, T., ZHAO, J. X., BARNES, L., BOYON, M., SICHANTHONGTIP, P., SENEGAS, F., KARPOFF, A. M., PATOLE-EDOUMBA, E., COPPENS, Y., BRAGA, J., "Early Modern humans and morphological variation in Southeast Asia:Fossil evidence from tam pa ling, laos", *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, p. 1-17.

DIKSHIT, K. N., "The antiquity of iron in India", dans *Dimensions of Indian Art*, Chandra, L. & D. Jain (éd.), Delhi, 1989, p. 109-119.

DISSER, A., *Production et circulation du fer en Lorraine (VIè- s. av. J.-C-XVe s. apr. J.-C)*, Dissertation de Doctorat non publiée. Université de technologie de Belfort-Montbéliard. Archéologie et Préhistoire, 2014.

DONALDSON, C. H., "An experimental investigation of olivine morphology", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, vol. 57, p. 187-213.

DOONAN, R. C. P., KLEMM, S., OTTAWAY, B. S., SPERL, G., WEINEK, H., "The east Alpine Bronze Age copper smelting process: evidence from the Ramsau valley, Eisenerz, Austria", dans *Proceedings of the 29th International Symposium of Archaeometry, Ankara 9-14 May*, Demirci, S., A. M. Özer & G. D. Summers (éd.), Tubitak, Ankara, 1996, p. 17-22.

DUCRET, A. C., RANKIN, W. J., "Liquidus Temperatures and Viscosities of FeO-Fe2O3-SiO2-CaO-MgO Slags at Compositions Relevant to Nickel Matte Smelting", *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2002, vol. 31, p. 59-67.

DUNG, L. T. M., "Exogenous and Indigenous Factors in the Formation of Early States in Central Vietnam", *Cham Studies*, 2001, vol. 2, p. 51-61.

DUNG, N. K., "The Sa Huynh Culture in Ancient Regional Trade Networks: A Comparative Study of Ornaments", *New Perspectives in Southeast Asian and Pacific Prehistory*, 2017, p. 311-332.

DUSSUBIEUX, L., *L'Apport de l'ablation laser couplée à l'ICP-MS à l'étude du verre archéologique de l'Océan Indien*, Thèse de doctorat non publiée. Université d'Orléans., 2001.

DUSSUBIEUX, L., GRATUZE, B., "Origine et diffusion du verre dans le monde indien et en Asie du Sud-Est : l'importance du dosage des éléments-traces.", *Revue d'Archéométrie*, 2003, vol. 27, p. 67-73.

DUSSUBIEUX, L., GRATUZE, B., "Glass in Southeast Asia", dans *50 years of Archaeology in Southeast Asia: Essays in honour of Ian Glover*, Bellina, B., E. A. Bacus, T. O. Pryce & C. J. Wisseman (éd.), River Book, Bangkok, 2010, p. 247-259.

DUSSUBIEUX, L., LANKTON, J., BELLINA-PRYCE, B., CHAISUWAN, B., "Early Glass Trade in South and Southeast Asia: New insights from two coastal sites, Phu Khao Thong in Thailand and Arikamedu in South India", dans *Crossing Borders in Southeast Asian Archaeology. Selected papers from the 13th International Conference of the European Association of Southeast Asian Archaeologists, Berlin, 2010*, NUS Press, Singapore, 2012, p. 307-328.

DUSSUBIEUX, L., PRYCE, T. O., "Myanmar's role in Iron Age interaction networks linking Southeast Asia and India: Recent glass and copper-base metal exchange research from the Mission Archéologique Française au Myanmar", *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, vol. 5, p. 598-614.

DUSSUBIEUX, L., BELLINA, B., "Glass ornament production and trade polities in the Upper-Thai Peninsula during the Early Iron Age", *Archaeological Research in Asia*, 2017a, vol. 13, p. 25-36.

DUSSUBIEUX, L., BELLINA, B., "Glass from an Early Southeast Asian Producing and Trading Centre", dans *Khao Sam Kaeo - An Early Port-City between the Indian Ocean and the South China Sea*, Bellina, B. (éd.), Ecole française d'Extrême-Orient, 2017b, p. 547-585.

DZUNG, L. T. M., "Sa Huynh Regional and Inter-Regional Interactions in the Thu Bon Valley, Quang Nam Province, Central Vietnam", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 2009, vol. 29, p. 68-75.

EDMONDS, M., "Description, Understanding and the chaîne operatoire", *Archaeological review from Cambridge*, 1990, vol. 9, p. 55-70.

EERKENS, J. W., LIPO, C. P., "Cultural Transmission Theory and the Archaeological Record: Providing Context to Understanding Variation and Temporal Changes in Material Culture", *Journal of Archaeological Research*, 2007, vol. 15, p. 239-274.

ERB-SATULLO, N. L., GILMOUR, B. J. J., KHAKHUTAISHVILI, N., "Late Bronze and Early Iron Age copper smelting technologies in the South Caucasus: The view from ancient Colchis c. 1500-600BC", *Journal of Archaeological Science*, 2014, vol. 49, p. 147-159.

ERB-SATULLO, N. L., GILMOUR, B. J. J., KHAKHUTAISHVILI, N., "Crucible technologies in the Late Bronze-Early Iron Age South Caucasus: Copper processing, tin bronze production, and the possibility of local tin ores", *Journal of Archaeological Science*, 2015, vol. 61, p. 260-276.

ERB-SATULLO, N. L., "Archaeomaterials, Innovation, and Technological Change", *Advances in Archaeomaterials*, 2020, vol. 1, p. 36-50.

EVRARD, O., *Chroniques des cendres: Anthropologies des sociétés khmou et dynamiques interethniques du Nord-Laos*, IRD Edition, Paris, 2006.

FALKENHAUSEN, V., *Chinese Society in the Age of Confucius (1000-250 BC): The Archaeological Evidence*, Cotsen Institute of Archaeology Press, 2006.

FAN, X., MU, D., YI, J., WANG, H., LUO, W., "Sourcing copper ores for production of bronzes excavated at Shuangyantang, a Western Zhou (1046–771 bc) site in Chongqing (Southwest China): evidence from lead isotope analysis", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2016, vol. 8, p. 197-204.

FAURE, F., TROLLIARD, G., NICOLLET, C., MONTEL, J. M., "A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003.

FAURE, G., *Origin of Igneous Rocks: The Isotopic Evidence*, Springer, Berlin, 2001.

FAVEREAU, A., *Interactions et modalités des échanges en Mer de Chine méridionale (500 avant notre ère-200 de notre ère): approche technologique des assemblages céramiques*, Dissertation de doctorat non publiée. Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, 2015.

FAVEREAU, A., BELLINA, B., "Thai-Malay Peninsula and South China Sea networks (500 BC–AD 200), based on a reappraisal of « Sa Huynh-Kalanay »-related ceramics", *Quaternary International*, 2016, vol. 416, p. 219-227.

FAVEREAU, A., "The analysis of Khao Sek pottery: Insight into the circulations and the politico-economic context of the Thai-Malay Peninsula during the second half of the 1st millenium BC", *Archaeological Research in Asia*, 2017, vol. 13, p. 37-49.

FENG, L., *Early China : Social and cultural History*, Cambridge university press, Cambridge, 2014.

FIGUEIREDO, E., LACKINGER, A., COMENDADOR REY, B., SILVA, R. J. ., VEIGA, J. ., MIRÃO, J., "An experimental approach for smelting tin ores from Northwestern Iberia", *Materials and Manufacturing Processes*, 2017, vol. 32, p. 765-774.

FLUZIN, P., DILLMANN, P., "Du minerai à l'objet: Une lecture multidisciplinaire du métal", dans *L'archéologie à découvert*, De Beaune, S. A. & P.-A. Francfort (éd.), CNRS Editions, Paris, 2012, p. 105-114.

FORBES, R.-J., *Metallurgy in Antiquity: A Notebook for Archaeologists and Technologists*, Brill, Leiden, 1950.

FREESTONE, I. C., TITE, M. S., "Refractories in the Ancient Preinductrial World", dans *High-technology ceramics, Past, Present and Future : the nature of innovation and change in ceramic technology*, Kingery, W. D. & E. Lense (éd.), 1986, Vol. IIp. 35-63.

FREESTONE, I. C., "Refractory Materials and Their Procurement", dans *Proceedings of the International Symposium « Old World Archaeometallurgy », Heildelberg 1987*, Hauptmann, A., E. Pernicka & G. Adolf Wagner (éd.), Deutsche Bergbau-Museum, Bochum, 1989, p. 155-162.

FROMETIN-LIBOUTHET, M., *L'image du Laos au temps de la colonisation française (1861-1914)*, L'Harmattan, Paris, 2012.

FÜRTAUER, S., LI, D., CUPID, D., FLANDORFER, H., "The Cu–Sn phase diagram, Part I: New experimental results", *Intermetallics*, 2013, vol. 34, p. 142-147.

GALE, N. H., STOS-GALE, Z., "Bronze Age Copper Sources in the Mediterranean: A New Approach", *Science*, 1982, vol. 216, p. 11-19.

GALE, N. H., "Archaeometallurgical studies of Late Bronze Age oxhide copper ingots from the Mediterranean region", dans *Proceedings of the International Symposium 'Old World Archaeometallurgy*, Hauptmann, A., E. Pernicka & G. Wagner (éd.), Bochum, 1989, p. 247-268.

GASCUEL, M. L., "Gisements stannifères au Laos français", *Annales des Mines*, 1905, vol. 8, p. 321-330.

GEORGAKOPOULOU, M., BASSIAKOS, Y., PHILANIOTOU, O., "Seriphos surfaces: A study of copper slag heaps and copper sources in the context of early bronze age aegean metal production", *Archaeometry*, 2011, vol. 53, p. 123-145.

GILLE, B., *Histoire des techniques: technique et civilisations, technique et sciences*, Encyclopéd, Gallimard, Paris, 1978.

GLOVER, I. C., "Ban Don Ta Phet: The 1984–85 excavation", dans *Southeast Asian archaeologist 1986: Proceedings of the first conference of the Association of Southeast Asian Archaeologists in Western Europe, British Archaeological Reports (International Series) 561*, Glover, I. C. & E. Glover (éd.), Archaeopress, Oxford, 1990, p. 139-193.

GLOVER, I. C., YAMAGATA, M., "The origins of Cham civilization: Indigenous, Chinese and Indian influences in Central Vietnam as revealed by excavations at Tra Kieu, Vietnam 1990 and 1993", dans *Archaeology in Southeast Asia*, Yeung, C. . & W. . Li (éd.), The University Museum of Hong Kong, Hong Kong, 1995, p. 145-169.

GLOVER, I. C., HENDERSON, J., "Early glass in South and Southeast Asia and China", dans *South East Asia and China: Art, Interaction and Commerce*, Scott, R. & J. Guy (éd.), School of Oriental and African studies, London, 1995, p. 141-170.

GLOVER, I. C., "The southern silk road: Archaeological evidence for early trade between India and Southeast Asia", dans *Ancient Trade and Cultural Contacts in Southeast Asia*, Srisuchat, A. (éd.), National Culture Commission, Bangkok, 1996, p. 57-94.

GLOVER, I. C., BENNETT, A., "The high-tin bronzes of Thailand", dans *Scientific Research on Ancient Metallurgy*, Jett, P., B. McCarthy & D. Douglas (éd.), Archetype Publication, 2012, p. 101-114.

GLOVER, I. C., BELLINA, B., "Ban Don Ta Phet and Khao Sam Kaeo: The Earliest Indian Contacts Re-

assessed", dans *Early Interactions between South and Southeast Asia*, 2018, p. 17-46.

GOLAS, P. J., "Chemistry and chemical Technology : Mining", dans *Science and Civilisation in China*, Needham, J. (éd.), Cambridge, Cambridge university press, 1999.

GOLDSTEIN, J. I., NEWBURY, D. ., JOY, D. ., LYMAN, C. E., ECHLIN, P., LIFSHIN, E., SAWYER, L., MICHAEL, J. R., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Kluwer Academic/Plenum, New York/Londres, 2007.

GORDON, R. B., KILLICK, D., "Adaptation of technology to culture and environment: bloomery iron smelting in America and Africa", *Technology and culture*, 1993, vol. 34, p. 234-270.

GORMAN, C., CHAROENWONGSA, P., "Ban Chiang: a mosaic of impressions from the first two years", *Expedition*, 1976, vol. 18, p. 14-26.

GOSSELAIN, O. P., "Materializing identities : an African perspective", *Journal of Archaeological Method and Theory*, 2000, vol. 7, p. 187-218.

GOUDINEAU, Y., "Tambours de bronze et circumambulations cérémonielles: Notes à partir d'un rituel kantou (Chaîne annamitique)", *Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient*, 2000, vol. 87, p. 553-578.

GOUDINEAU, Y., "L'anthropologie du Sud-Laos et la question Kantou", dans *Nouvelles Recherches sur le Laos*, Lorrillard, M. & Y. Goudineau (éd.), Ecole française d'Extrême-Orient, Paris/Vientiane, 2008, p. 639-664.

GRAZULIS, S., CHATEIGNER, D., DOWNS, R. ., YOKOCHI, A. ., QUIROS, M., LUTTEROTTI, L., MANAKOVA, E., BUTKUS, J., MOECK, P., LE BAIL, A., "Crystallography Open Database - an open-access collection of crystal structures", *Journal of Applied Crystallography*, 2009, vol. 42, p. 726-729.

GRIFFIN, P., *How copper was being smelt at the Vilabouly Complex in Prehistory?*, Unpublished master thesis. Arts and Social Sciences, James Cook University, 2017.

GUPTA, S., "The Bay of Bengal Interaction Sphere (1000 BC - AD 500)", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 2007, vol. 25, p. 21-30.

GUTMAN, P., HUDSON, R., "The archaeology of Burma (Myanmar) from prehistory to Bagan", dans *Southeast Asia—from prehistory to history*, Glover, I. C. & P. S. Bellwood (éd.), Routledge/Curzon, Londres, 2004, p. 149-178.

HA, V. T., *Van Hoa Dong Son o Viet Nam (Dong Son Culture in Vietnam)*, (Ha, V. ., Éd.), Nha Xuat Ban Khoa Hoc Xa Hoi, Hanoi, 1994.

HALLIWELL, A., YANKOWSKI, A., CHANG, N., "Gendered Labor in Pottery and Salt Production in Northeast Thailand", dans *Gendered Labor in Specialized Economies: Archaeological Perspectives on Female and Male Work*, Kelly, S. & T. Ardren (éd.), University Press of Colorado, 2016, p. 117-157.

HAMMERSLEY, A. P., SVENSSON, S. O., HANFLAND, M., FITCH, A. M., HÄUSERMANN, D., "Two-Dimensional Detector Software: From Real Detector to Idealised Image or Two-Theta Scan", *High Pressure Research*, 1996, vol. 14, p. 235-248.

HANNING, E., GAUß, R., GOLDENBERG, G., "Metal for Zambujal: experimentally reconstructing a 5000-year-old technology", *Trabajos de Prehistoria*, 2010, vol. 67, p. 287-304.

HARMAND, D., "Voyage au Cambodge", *Bulletin de la Société de Géographie*, 1876, p. 337-367.

HASSAN AL-SHORMAN AUS AL-MAZAR, A., *Refractory Ceramic through the Ages: an Archaeometric Study on Finds from Fenan, Jordan and other Sites*, Dissertation de Doctorat non publiée. Université

de Bochum, 2009.

HAUPTMANN, A., WEISGERBER, G., "The early Bronze Age copper metallurgy of Shahr-i Sokhta (Iran)", *Paléorient*, 1980, vol. 6, p. 120-123.

HAUPTMANN, A., WEISGERBER, G., BACHMANN, H. G., "Early copper metallurgy in Oman", dans *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*, Maddin, R. (éd.), MIT Press, Cambridge, 1988.

HAUPTMANN, A., BEGEMANN, F., HEITKEMPER, E., PERNICKA, E., SCHMITT-STRECKER, S., "Early copper produced at Feinan, Wadi Araba, Jordan: the composition of ores and copper.", *Archeomaterials*, 1992, vol. 6, p. 1-33.

HAUPTMANN, A., BACHMANN, H. G., MADDIN, R., "Chalcolithic copper smelting: New evidence from excavations at Wadi Fidan 4", dans *Archaeometry 94*, Demirci, S., A. M. Özer & G. D. Summers (éd.), Tübitak, Ankara, 1996, p. 3-10.

HAUPTMANN, A., REHREN, T., SCHMITT-STRECKER, S., "Early Bronze Age copper metallurgy at Shahr-i Sokhta (Iran), reconsidered", dans *Man and Mining*, Stöllner, T., G. Körlin, G. Steffens & J. Cierny (éd.), Deutsch Bergbau-Museum, Bochum, 2003, p. 197-213.

HAUPTMANN, A., *The Archaeometallurgy of Copper Evidence from Faynan, Jordan*, (Hauptmann, A., B. Herrmann & G. A. Wagner, Éd.)*Natural Science in Archaeology*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.

HAUPTMANN, A., SCHMITT-STRECKER, S., LEVY, T. E., BEGEMANN, F., "On Early Bronze Age Copper Bar Ingots from the Southern Levant", *American Schools of Oriental Research*, 2015, vol. 373, p. 1-24.

HE, T. K., "Metallurgy", dans *Ancient China's technology and science*, Institute of the History of Natural Science, C. A. of S. (éd.), Foreign Language Press, Beijing, 1983, p. 139-407.

HEEB, J., OTTAWAY, B. S., "Experimental Archaeometallurgy", dans *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*, Roberts, B. W. & C. P. Thornton (éd.), 2014, Vol. 9781461490p. 161-192.

HEGER, D., *Alte Metalltrommeln aus Südostasien*, Leipzig, 1902.

HEIN, A., KILIKOGLOU, V., "Modeling of thermal behavior of ancient metallurgical ceramics", *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, vol. 90, p. 878-884.

HENDRICKSON, M., *Arteries of Empire: An Operational Study of Transport and Communication in Angkorian Southeast Asia (9th to 15th centuries CE)*, Thèse de doctorat non publiée. Departement d'Archéologie, Université de Sydney., 2007.

HENDRICKSON, M., "Historic routes to Angkor: development of the Khmer road system (ninth to thirteenth centuries AD) in mainland Southeast Asia", *Antiquity*, 2010, vol. 84, p. 480-496.

HENDRICKSON, M., "A transport geographic perspective on travel and communication in Angkorian Southeast Asia (ninth to fifteenth centuries AD)", *World Archaeology*, 2011, vol. 43, p. 444-457.

HERDITS, H., "Bronze Age smelting site in the Mitterberg mining area in Austria", dans *Mining and metal production through the ages*, Craddock, P. T. & J. Lang (éd.), British Museum Press, London, 2003, p. 69-75.

HIGHAM, C. F., KIJNGAM, A., *Prehistoric Investigations in Northeast Thailand: Excavations at Ban Na Di,*

Don Kao Noi, Ban Muang Phruk, Ban Ciang Hian, Non Noi, Ban Kho Noi and Site surveys in the Upper Songhram and Middle Chi Valleys, Part 1-3, (Higham, C. F. & A. Kijngam, Éd.), BAR Internation Series 231 (1-3), British Archaeological Reports, Oxford, 1984.

HIGHAM, C. F., "Prehistoric metallurgy in Southeast Asia: Some new information from the excavation of Ban Na Di", dans *The Beginning of the use of metals and alloys*, Maddin, R. (éd.), MIT Press, 1988.

HIGHAM, C. F., *The Archaeology of Mainland Southeast Asia from 10,000 B.C. to the Fall of Angkor*, (Higham, C. F., Éd.), Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

HIGHAM, C. F., *The Bronze Age of Southeast Asia*, (Higham, C. F., Éd.), Cambridge University Press, New York, 1996.

HIGHAM, C. F., *Early Cultures of Mainland Southeast Asia*, (Higham, C. F., Éd.), River Book, Bangkok, 2002.

HIGHAM, C. F., THOSARAT, R., *The origins of the civilization of Angkor: the excavation of Ban Lum Khao*, (Higham, C. F. & R. Thosarat, Éd.), The Fine Arts Department, Bangkok, 2004.

HIGHAM, C. F., "Recasting Thailand: new discoveries at Ban Non Wat", *Current World Archaeology*, 2008, vol. 31, p. 38-41.

HIGHAM, C. F., KIJNGAM, A., *The origins of the civilization of Angkor, Volume 3. The excavation of Ban Non Wat: introduction*, (Higham, C. F. & A. Kijngam, Éd.), Fine Art Department of Thailand, Bangkok, 2009.

HIGHAM, C. F., HIGHAM, T., "A new chronological framework for prehistoric Southeast Asia, based on a Bayesian model from Ban Non Wat", *Antiquity*, 2009, vol. 82, p. 1-20.

HIGHAM, C. F., HIGHAM, T., CIARLA, R., DOUKA, K., KIJNGAM, A., RISPOLI, F., "The origins of the bronze age of Southeast Asia", *Journal of World Prehistory*, 2011, vol. 24, p. 227-274.

HIGHAM, C. F., HIGHAM, T., KIJNGAM, A., "Cutting a Gordian Knot: The bronze age of Southeast Asia: Origins, timing and impact", *Antiquity*, 2011, vol. 85, p. 583-598.

HIGHAM, C. F., KIJNGAM, A., *The Origins of the civilization of Angkor: Volume 5: the excavation of Ban Non Wat: the Bronze Age*, (Higham, C. F. & A. Kijngam, Éd.), Fine Art Department of Thailand, Bangkok, 2012.

HIGHAM, C. F., *Early Mainland Southeast Asia : from first Humans to Angkor*, (Higham, C. F., Éd.), River Book, Bangkok, 2014.

HIGHAM, C. F., RISPOLI, F., "The Mun Valley and Central Thailand in prehistory: Integrating two cultural sequences", *Open Archaeology*, 2014, vol. 1, p. 2-28.

HIGHAM, C. F., DOUKA, K., HIGHAM, T., "A new chronology for the bronze age of northeastern Thailand and its implications for southeast Asian prehistory", *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, p. 1-20.

HIGHAM, T., WEISS, A., PIGOTT, V. C., HIGHAM, C. F., RAMSEY, C., GUEDES, J., HANSON, S., WEBER, S., RISPOLI, F., CIARLA, R., PRYCE, T. O., "A prehistoric copper-production centre in centralThailand: its dating and wider implications", *Antiquity*, 2020, vol. 94, p. 948-965.

HIRAO, Y., RO, J.-H., "Chemical composition and lead isotope ratios of bronze artifacts excavated in Cambodia and Thailand", dans *Water Civilisation: From Yangtze to khmer Civilizations*, Yasuda (éd.), Yoshinori, Springer, 2013.

HOGNAN, L. M., RUTNIN, S., "Metallurgical analysis of iron artefacts from Thailand", *JHMS*, 1989, vol. 23, p. 99-107.

HÖPPNER, B., BARTELHEIM, M., HUIJSMANS, M., KRAUSS, R., MARTINEK, K. P., PERNICKA, E., SCHWAB, R., "Prehistoric copper production in the Inn Valley (Austria), and the earliest copper in central Europe", *Archaeometry*, 2005, vol. 47, p. 293-315.

HSU, Y. K., SABATINI, B. J., "A geochemical characterization of lead ores in China: An isotope database for provenancing archaeological materials", *PLoS ONE*, 2019, vol. 14, p. 1-24.

HUA, J., "Copper Mining and Smelting Sites and the Origin of Chinese Civilization", dans *Third International Mining History Conference, Golden, Colorado, June 6--10, 1994*, 1994.

HUA, J., "Mining and Metallurgical Technology", dans *A History of Chinese Science and Technology, volume 3*, Lu, Y. (éd.), Springer, 2015, p. 195-239.

HUMPHRIS, J., MARTINON-TORRES, M., REHREN, T., REID, A., "Variability in single smelting episodes - a pilot study using iron slag from Uganda", *Journal of Archaeological Science*, 2009, vol. 36, p. 359-369.

HUNG, H., BELLWOOD, P., "Movement of raw materials and manufactured goods across the South China Sea after 500 BCE: from Taiwan to Thailand", dans *50 Years of Archaeology in Southeast Asia: Essays in Honour of Ian Glover*, Bellina, B., E. A. Bacus, T. O. Pryce & W. J. Christie (éd.), River Book, Bangkok, 2010, p. 234-244.

HUNG, H., IIZUKA, Y., "The Batanes Nephrite Artefacts The study of nephrite in Philippine archaeology", *4000 years of migration and cultural exchange : the archaeology of the Batanes Islands, Northern Philippines*, 2013, p. 149-168.

HUNG, H., CHAO, C., "Taiwan's Early Metal Age and Southeast Asian trading systems", *Antiquity*, 2016, vol. 90, p. 1537-1551.

HUNG, H. C., IIZUKA, Y., BELLWOOD, P., KIM, D. N., BELLINA, B., SILAPANTH, P., DIZON, E., SANTIAGO, R., DATAN, I., MANTON, J. H., "Ancient jades map 3,000 years of prehistoric exchange in Southeast Asia", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, vol. 104, p. 19745-19750.

HUNG, H. C., NGUYEN, K. D., BELLWOOD, P., CARSON, M. T., "Coastal connectivity: Long-term trading networks across the South China Sea", *Journal of Island and Coastal Archaeology*, 2013, vol. 8, p. 384-404.

HUTCHINSON, C. S., *Geological evolution of South-east Asia*, Clarendon Press, Oxford, 1989.

HUTCHISON, C. S., TAYLOR, D., "Metallogenesis in SE Asia", *Journal of the Geological Society*, 1978, vol. 135, p. 407-428.

HUTCHISON, C. S., "The geological Framework", dans *The Physical Geography of Southeast Asia*, Gupta, A. (éd.), Oxford Uni, New York, 2005, p. 3-23.

ISHIZAWA, Y., "Chinese chronicles of 1st–5th century AD, Funan, southern Cambodia", dans *South East Asia and China: Art, interaction and commerce*, Scott, R. & J. Guy (éd.), University, Percival David Foundation of Chinese Art, Londres, 1995, p. 11-31.

JUNKER, L. ., *Raiding, trading and feasting: the political economy of Philippines chiefdoms*, University of Hawaï Press, Honolulu, 1999.

KÄLLEN, A., KARLSTRÖM, A., *Lao Pako, a late prehistoric site on the Nam Ngum river in Laos*, British Archaeological Reports (BAR) International Serie 777, Oxford, 1999.

KÄLLEN, A., *And Through Flows the River: Archaeology and the Pasts of Lao Pako*, Uppsala University, Archaeology and Ancient History, 2004.

KAMVONG, T., ZAW, K., "Geology and Genesis of Phu Lon Copper-Gold Skarn Deposit, Northeast Thailand", dans *Proceedings of the International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina*, Wanakao, L. (éd.), The Department of Geotechnology, Faculty of Technology, Khon Kaen, Thailand, 2005, p. 310-318.

KAMVONG, T., ZAW, K., "The Origin and Evolution of Skarn-Forming Fluids from the Phu Lon Deposit, Northern Loei Fold Belt, Thailand: Evidence from Fluid Inclusion and Sulfur Isotope Studies", *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, vol. 34, p. 624-633.

KARLSTRÖM, A., KÄLLEN, A., *Lao Pako Archaeological Excavation 1995*, 1997.

KILIKOGLOU, V., VEKINIS, G., MANIATIS, Y., DAY, P. M., "Mechanical performance of quartz-tempered ceramics: Part I, strength and toughness", *Archaeometry*, 1998, vol. 40, p. 261-279.

KILLICK, D., "Social Constructionist Approaches to the Study of Technology", *World Archaeology*, 2004, vol. 36, p. 571-578.

KILLICK, D., "Cairo to Cape: the spread of metallurgy through eastern and Southern Africa", dans *Archaeometallurgy in global perspective: methods and syntheses*, Roberts, B. W. & C. P. Thornton (éd.), Springer, New York, 2014, p. 507-528.

KIM, N. C., VAN TOI, L., HIEP, T. H., "Co Loa: An investigation of Vietnam's ancient capital", *Antiquity*, 2010, vol. 84, p. 1011-1027.

KIM, N. C., "Lasting Monuments and Durable Institutions: Labor, Urbanism, and Statehood in Northern Vietnam and Beyond", *Journal of Archaeological Research*, 2013, vol. 21, p. 217-267.

KNAPP, B., KASSIANIDOU, V., "The Archaeology of Late Bronze Age copper Production: Politiko Phorades on Cyprus", dans *Anatolian Metal IV:Der Anschnitt*, Yançil (éd.), Deutches Bergbau-Museum, Bochum, 2008, p. 135-147.

KONGOLI, F., YAZAWA, A., "Liquidus Surface of FeO-Fe 2 O 3 -SiO 2 -CaO Slag Containing Al 2 O 3 , MgO , and Cu 2 O at Intermediate Oxygen Partial Pressures", 2001, vol. 32, p. 583-592.

KRESTEN, P., "Melting Points and Viscosities of Ancient Slags: a Discussion.", *Historical metallurgy*, 1986, vol. 20, p. 43-45.

KRIVSKY, W. A., SCHUHMANN, R., "Thermodynamics of the Cu-Fe-S System", *Journal of Metals*, 1957, vol. 9, p. 981-988.

KULKE, H., "Indian colonies, indianization or cultural convergence? Reflection on the changing image of India's role in Southeast Asia", dans *Onderzoek in Zuidoost-Azie*, Schulte Nordholt, H. (éd.), Rijksuniversiteit te Leiden, Leiden, 1990, p. 8-32.

LAGARDE, C., *Production métallurgique en Aquitaine à l'âge du Bronze Moyen: techniques, usages et criculation*, Dissertation de doctorat non publiée. Michel de Montaigne, Bordeaux 3, 2008.

LAHIRI-DUTT, K., INVOUVANH, C., *Gender in Artisanal Tin Mining in Lao PDR A Case Study in Ban Moua Khay and Ban Nanhi, Khammuane Province*, University of Canberra, 2010.

LANKTON, J., DUSSUBIEUX, L., "Ancient glass from Southeast Asia", dans *Modern Methods for Analysing Archaeological and Historical Glass*, Janssens, K. (éd.), John Wiley & Sons, 2013, p. 413-441.

LARREINA-GARCIA, D., CECH, B., REHREN, T., "Copper Smelting in the Raxgbiet (Austria): A Late Bronze Age Alpine Industrial Landscape", dans *Forging Identities. The Mobility of Culture in Bronze*

Age Europe: Volume 1, Suchowska-Ducke, P., S. Scott Reiter & H. Vandkilde (éd.), British Ar, BAR S2771, 2012.

Larreina-Garcia, D., "Oodles of copper for the Chinese Emperors, the case of Sijiawan", dans *Abstract for the 39th International Symposium on Archaeometry*, 2012.

Larreina-Garcia, D., *Copper and bloomery iron smelting in Central China Technological traditions in the Daye County (Hubei)*, Thèse de doctorat non publiée. UCL London, 2017.

Le Meur, C., Cadet, M., Doan, N. Van, Trien, D. N., Cloquet, C., Dillmann, P., Thote, A., Pryce, T. O., "Typo-technological, elemental and lead isotopic characterization and interpretation of Đông Sơn miniature drums", *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2021, vol. 38.

Lechtman, H., "Style in technology: some early thoughts", dans *Material culture: style, organization. and dynamics of technology*, Lechtman, H. & T. . Merrill (éd.), West Publishing Co, St Paul, 1977, p. 3-20.

Lechtman, H., Klein, S., "The production of copper-arsenic alloys (arsenic bronze) by cosmelting: Modern experiment, ancient practice", *Journal of Archaeological Science*, 1999, vol. 26, p. 497-526.

Legge, J. D., "The writing of Southeast Asian History", dans *The Cambridge History of Southeast Asia*, Tarling, N. (éd.), Cambridge Scholars, Cambridge, 1992, p. 1-50.

Lemonnier, P., "L'étude des systèmes techniques, une urgence en technologie culturelle", *Techniques & culture*, 1983, vol. 1, p. 54-55.

Lemonnier, P., *Elements for an Anthropology of Technology*, University of Michigan, 1992.

Lemonnier, P., *Technological Choices: Transformations in Material Cultures since the Neolithic*, Routledge, Londres, 1993.

Lepvrier, C., Maluski, H., Van Vong, N., Roques, D., Axente, V., Rangin, C., "Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam) 40Ar-39Ar Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints", *Tectonophysics*, 1997, vol. 283, p. 105-127.

Leroi-Gourhan, A., *Evolutions et techniques: l'homme et la matière*, Albin Michel, Paris, 1971.

Leroi-Gourhan, A., *Evolution et techniques. Milieu et techniques*, Albin Michel, Paris, 1973.

Leroy, S., Hendrickson, M., Bauvais, S., Vega, E., Blanchet, T., Disser, A., Delque-Kolic, E., "The ties that bind: archaeometallurgical typology of architectural crampons as a method for reconstructing the iron economy of Angkor, Cambodia (tenth to thirteenth c.)", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2017, vol. 10, p. 1-24.

Levin, E., McMurdie, H. F., Hall, F. P., *Phase Diagrams for Ceramists*, The American Ceramic Society, 1956.

Levy, T. E., Shalev, S., "Prehistoric Metalworking in the Southern Levant: Archaeometallurgical and Social Perspectives.", *World Archaeology*, 1989, vol. 20, p. 352-372.

Lewis, H., White, J. C., Bouasisengpaseuth, B., "A buried jar site and its destruction: Tham An Mah Cave, Luang Prabang Province, Lao PDR", dans *SEAMFEO SPAFA - Indernational Conference on Southeast Asian Archaeology, Chonburi, Thailand, 2013*, Tan, N. H. (éd.), Regional Centre for Archaeology and Fine Arts, 2015, Vol. 66.

Li, H. M., Zuo, X. X., Kang, L. H., Ren, L. Le, Liu, F. W., Liu, H. G., Zhang, N. M., Min, R., Liu, X., Dong, G. H., "Prehistoric agriculture development in the Yunnan-Guizhou Plateau, southwest China: Archaeobotanical evidence", *Science China Earth Sciences*, 2016, vol. 59, p. 1562-1573.

LI, Y., WANG, H., "昆明市西 山區王家墩發現青銅器 [Bronzes discovered at Wangjiadun, Western Hills district, Kunming]", *Kaogu*, 1983, vol. 5.

LINDUFF, K. M., HAN, R., SUN, S., *The Beginnings of Metallurgy in China*, (Linduff, K. ., R. Han & S. Sun, Éd.), The Edwin Mellen Press, Lewiston, 2000.

LIU, R., POLLARD, A. M., RAWSON, J., TANG, X., BRAY, P., ZHANG, C., "Panlongcheng, Zhengzhou and the Movement of Metal in Early Bronze Age China", *Journal of World Prehistory*, 2019, vol. 32, p. 393-428.

LIVINGSTON. C, *Who were the people of ancient Vilabouly? Exploring origins and relationships through the study of Ge*, James Cook University, Townsville, 2014.

LOADER, S. E., "Supergene enrichment of the Khanong copper resource, Sepon project, Lao PDR", dans *PACRIM'99, Bali, Indonesia*, 1999, p. 263-270.

LORGE, P. A., *Chinese Martial Arts: From Antiquity to the Twenty-First Century*, Cambridge University Press, New York, 2012.

LORRILLARD, M., "Par-delà Vat Phu. Données nouvelles sur l'expansion des espaces khmer et môn anciens au Laos", *Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient*, 2010, vol. 97, p. 205-270.

LORRILLARD, M., "Du centre à la marge: Vat Phu dans les études sur l'espace khmer ancien", *Bulletin de l'Ecole française d'Extrème-Orient*, 2011, vol. 97, p. 187-204.

LORRILLARD, M., "Pre-Angkorian Communities in the Middle Mekong Valley (Laos and Adjacent Areas)", dans *Before Siam: Essays in Art and Archaeology*, Revire, N. & S. A. Murphy (éd.), River Book, Bangkok, 2014, p. 187-215.

LURASCHI, A., ELLIOTT, J. ., "Phase Relationship in the Cu–Fe–O–System, 1100 to 1350°C", dans *Extractive Metallurgy of Copper, vol I: Pyrometal- lurgy and Electrolytic Refining*, Yannopoulos, J. . & J. . Agarwal (éd.), New York, 1976, p. 90-114.

LUU, T. T., *Khu mo co Chau Can (Chau Can District Graveyard)*, 1977.

MABBETT, I. W., "The 'indianization' of Southeast Asia: Reflections on the Prehistoric Sources", *Journal of Southeast Asian Studies*, 1977, vol. 8, p. 1-14.

MALDONADO, L., REHREN, T., "Early copper smelting at Itziparátzico, Mexico", *Journal of Archaeological Science*, 2009, vol. 36, p. 1998–2006.

MALLERET, L., *L'Archéologie du Delta du Mekong volume 4*, EFEO, Paris, 1959.

MANASSE, A., MELLINI, M., "Chemical and textural characterisation of medieval slags from the Massa Marittima smelting sites (Tuscany, Italy)", *Journal of Cultural Heritage*, 2002, vol. 3, p. 187-198.

MANGUIN, P.-Y., "Les cités-États de l'Asie du Sud-Est côtière: De l'ancienneté et de la permanence des formes urbaines", *Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient*, 2000, vol. 87, p. 151-182.

MANGUIN, P.-Y., "The Amorphous Nature of Coastal Polities in Insular Southeast Asia: Restricted Centres, Extended Peripheries", *Moussons - Recherches en Sciences Humaines Sur l'Asie du Sud-Est*, 2002, vol. 5, p. 73-99.

MANGUIN, P.-Y., "The Archaeology of Early Maritime Polities of Southeast Asia", dans *Southeast Asia: Origins to Civilisation*, Bellwood, P. S. & I. C. Glover (éd.), Curzon Press, 2004, p. 282-313.

MANGUIN, P.-Y., "The archaeology of Funan in the Mekong River delta: The « Oc Eo Culture » of Vietnam", dans *Arts of Ancient Viet Nam: From River Plain to Open Sea*, Tingley, N., A. Reinecke & P.-. Y. Manguin (éd.), Art Societ, Museum of Fine Arts, 2009a, p. 100-118.

MANGUIN, P.-Y., "Southeast Sumatra in Protohistoric and Srivijaya times: upstream-downstream relations and the settlement of the Peneplain", dans *From Distant Tales : Archaeology and Ethnohistory in the Highlands of Sumatra*, Bonatz, D., J. Miksic, J. D. Neidel & M. L. Tjoa-bonatz (éd.), Cambridge Scholars, 2009b, p. 434-484.

MANGUIN, P.-Y., "Introduction", dans *Early interactions between South and Southeast Asia : reflections on cross-cultural exchange*, Manguin, P.-Y., A. Mani & G. Wade (éd.), Institute, Manohar India, New Delhi, 2011, p. 13-31.

MANHES, G., ALLEGRE, C. J., DUPRE, B., HAMELIN, B., "Lead isotope study of basic-ultrabasic layered complexes: Speculations about the age of the earth and primitive mantle characteristics", *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, vol. 47, p. 370-382.

MANINI, T., AQUINO, J., GREGORY, C., ANEKA, S., *Discovery of the Sepon District gold and copper deposits, Laos*, Unpublished report for Oxiana Resources. Perth, 2001.

MARTINON-TORRES, M., FREESTONE, I. C., HUNT, A., REHREN, T., "Mass-produced mullite crucibles in medieval Europe: Manufacture and material properties", *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, vol. 91, p. 2071-2074.

MARTINON-TORRES, M., REHREN, T., "Technical ceramics", dans *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*, Roberts, B. W. & C. P. Thornton (éd.), Springer Verlag, New-York, 2014, p. 107-131.

MARTINON-TORRES, M., KILLICK, D., "Archaeological Theories and Archaeological Sciences", dans *The Oxford Handbook of Archaeological Theory*, Gardner, A., M. Lake & U. Sommer (éd.), 2015.

MCGOVERN, P. E., VERNON, W. W., WHITE, J. C., "Ceramic Technology at prehistoric Ban Chiang,Thailand: Physicochemical analyses", *Masca Journal*, 1985, vol. 3, p. 104-113.

MEI, J., "Early metallurgy in China: some challenging issues and current studies", dans *Metallurgy and civilisation- Eurasia and beyond:Proceedings of the 6th International Conference on the Beginnings of the Use of Metals and Alloys (BUMA VI)*, Mei, J. & T. Rehren (éd.), Archetype book, 2009, p. 9-17.

MEI, J., CHEN, K., CAO, W., "Scientific examination of Shang-dynasty bronzes from Hanzhong, Shaanxi Province, China", *Journal of Archaeological Science*, 2009, vol. 36, p. 1881-1891.

MEI, J., XU, J., CHEN, K., SHEN, L., WANG, H., "Recent Research on Early Bronze Metallurgy in Northwest China", dans *Scientific Research on Ancient Asian Metallurgy - Proceedings of the Fifth Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art*, Jett, P. & M. McCarthy (éd.), Archetype Publication, Londres, 2012, p. 37-46.

MEI, J., WANG, P., CHEN, K., WANG, L., WANG, Y., LIU, Y., "Archaeometallurgical studies in China: Some recent developments and challenging issues", *Journal of Archaeological Science*, 2015, vol. 56, p. 221-232.

MERKEL, J. F., "Ancient smelting of oxide copper ore", dans *The ancient metallurgy of copper (vol 2)*, Rothenberg, B. (éd.), Institute for Archaeo-Metallurgical Studies Institute of Archaeology, London, 1990.

METCALFE, I. (ÉD.), "Gondwana dispersion and Asian accretion: an overview", dans *Gondwana dispersion and Asian accretion: IGCP 321 final results volume*, A.A Balkema, Rotterdam, 1999, p. 9-28.

METTEN, B., "Beitrag zur spätbronzezeitlichen Kupfermetallurgie im Trentino (Südalpen) im Vergleich mit anderen prähistorischen Kupferschlac- ken aus dem Alpenraum", *Metalla*, 2003, vol. 10, p. 1-122.

MEYERS, P., "Casting technology in Cambodia and related Southeast Asian civilizations", dans *Khmer Bronzes: New Interpretations of the Past*, Bunker, E. & D. Latchford (éd.), Art Media Resources, Chicago, 2011, p. 27-41.

MILLE, B., *D'une amulette en cuivre aux grandes statues de bronze - évolution des techniques de fonte à la cier perdue , de l'Indus à la méditérrannée*, Thèse de doctorat non publiée. Université Paris-Nanterre, 2017.

MILLER, H. M., *Archaeological Approaches to Technology, Amsterdan*, Elsevier/Academic Press, London, 2007.

MOORE, E., *Moated sites in early northeast Thailand*, Archaeopress, British Archaeological Reports International Series 400. Oxford, 1988.

MOORE, E., WIN, S., "The gold coast: Suvannabhumi? Lower Myanmar walled sites of the first millennium AD.", *Asian Perspectives*, 2007, vol. 46, p. 202-232.

MOTTET, É., "Au Laos, la nouvelle aventure minière pourra-t-elle se dérouler sans conflits?", *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 2013, vol. 66, p. 217-246.

MOUSCADET, M., *L'exploitation des ressources du sous - sol au Laos à l'époque coloniale de 1893 à 1940*, Dissertation non publiée. Inalco, Paris, 2013.

MU, D., SONG, G., CUI, B., WANG, H., WANG, W., LUO, W., "Provenance study on Chinese bronze artefacts of E in the Zhou Dynasty by lead isotope analysis", *Journal of Archaeological Science*, 2014, vol. 52, p. 515-523.

MURILLO-BARROSO, M., PRYCE, T. O., BELLINA, B., MARTINON-TORRES, M., "Khao Sam Kaeo - an archaeometallurgical crossroads for trans-asiatic technological traditions", *Journal of Archaeological Science*, 2010, vol. 37, p. 1761-1772.

MUROWCHICK, R., "The development of early bronze metallurgy in Vietnam and Kampuchea: A re-examination of recent work", dans *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*, Maddin, R. (éd.), MIT Press, Cambridge, 1988a, p. 182-199.

MUROWCHICK, R., "An examination of some early bronzes from Samrong Sen, Kampuchea", *Historical Metallurgy*, 1988b, vol. 22, p. 1-20.

NATAPINTU, S., "Current research on ancient copper-base metallurgy in Thailand", dans *Prehistoric studies: the stone and metal ages in Thailand*, Charoenwongs, P. & B. Bronson (éd.), Amarin Printing Group, Bangkok, 1988, p. 107-124.

NISHIMURA, M., "Chronology of the metal age in the Southern Vietnam", *JSAA*, 2005, vol. 25.

NITTA, E., "Archaeological study on the ancient iron-smelting and salt-making industries in the northeast of Thailand. Preliminary report on the excavations of Non Yang and Ban Don Phlong", *Journal of Southeast Asian Archaeology*, 1991, vol. 11, p. 1-46.

NITTA, E., "Iron-smelting and salt-making industries in northeast Thailand", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 1997, vol. 16, p. 153-160.

NITTA, E., "Heger I Drums, Bronze Halberds and Ranked Societies in the Mekong Basin", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 2005, vol. 123, p. 125-128.

NOCETE, F., QUEIPO, G., SAEZ, R., NIETO, J. M., INACIO, N., BAYONA, M. R., PERAMO, A., VARGAS, J. M., CRUZ-AUÑON, R., GIL-IBARGUCHI, J. I., SANTOS, J. F., "The smelting quarter of Valencina de la Concepción (Seville, Spain): the specialised copper industry in a political centre of the Guadalquivir Valley during the Third millennium BC (2750-2500 BC)", *Journal of Archaeological Science*, 2008, vol. 35, p. 717-732.

O'REILLY, D., SHEWAN, L., DOMETT, K., HALCROW, S. E., LUANGKHOTH, T., "Excavating among the megaliths: recent research at the 'Plain of Jars' site 1 in Laos", *Antiquity*, 2019, vol. 93, p. 970-989.

O'REILLY, D. J., SHEWAN, L., "A report on the 2011–2012 excavation of Lovea: An Iron Age, moated settlement in Cambodia", *Archaeological Research in Asia*, 2015, vol. 1-2, p. 33-47.

O'REILLY, D. J. W., "Further Evidence of Heterarchy in Bronze Age Thailand", *Current Anthropology*, 2003, vol. 44, p. 300-306.

O'REILLY, D. J. W., "From the Bronze Age to the Iron Age in Thailand: Applying the Heterarchical Approach", *Asian Perspectives*, 2007, vol. 39, p. 1-19.

O'REILLY, D. J. W., SCOTT, G., "Moated sites of the Iron Age in the Mun River Valley, Thailand: New discoveries using Google Earth", *Archaeological Research in Asia*, 2015, vol. 3, p. 9-18.

O'REILLY, D. J. W., SHEWAN, L., *Madeleine Colani's megaliths of Upper Laos*, (O'Reilly, D. J. W. & L. Shewan, Éd.), Barcaray International, Melbourne, 2019.

OKUDA, Y., HARADA, T., "Process for producing acicular magnetite or acicular maghemite", *United States Patent*, 1985, vol. 19, p. 1-4.

OTTAWAY, B. S., "Innovation, production and specialization in early prehistoric copper metallurgy", *European Journal of Archaeology*, 2001, vol. 4, p. 87-112.

OXENHAM, M., MATSUMURA, H., KIM DUNG, N., *Man Bac: the excavation of a Neolithic site in northern Vietnam*, (Oxenham, M., H. Matsumura & N. Kim Dung, Éd.), ANU Press, Canberra, Australia, 2011.

PAGES, G., LONG, L., FLUZIN, P., DILLMANN, P., "Réseaux de production et standards de commercialisation du fer antique en Méditerranée : les demi-produits des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône)", *Revue archéologique de Narbonnaise*, 2008, vol. 41, p. 261-283.

PARMENTIER, H., "Le temple de Vat Phou", *BEFEO*, 1914, vol. 14, p. 1-31.

PARMENTIER, H., "Anciens tambours de bronze", *Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient*, 1918, vol. 18, p. 1-30.

PATOLE-EDOUMBA, E., "Implantations humaines sur le site de Tam Hang depuis 14 000 ans", dans *Pà Hang, la montagne habitée: 100000 ans d'histoire de la biodiversité et de l'occupation humaine au nord du Laos*, Patole-Edoumba, E. & F. Demeter (éd.), Les Indes savantes-Museum d'Histoire Naturelle de la Rochelle, La Rochelle, 2018, p. 114-156.

PAUTREAU, J. P., COUPEY, A.-S., KYAW, A. A., *Excavations in the Samon valley : iron age burials in Myanma*, (Pautreau, J. P., A.-S. Coupey & A. A. Kyaw, Éd.), Siam Ratana Ltd, Chiang Mai, 2010.

PAVIE, A., *Mission Pavie: Indo-Chine, Géographie et voyages : Voyages au centre de l'Annam et du*

Laos et dans les régions sauvages de l'Est de l'Indo-Chine, Leroux, Paris, 1902.

PEDERSEN, L. T., *Trauma and conflict in prehistoric Southeast Asia: a life of war or peace*, Dissertation de master non publiée. College of Medicine and Dentistry, James Cook University., 2016.

PERNICKA, E., "Evaluating Lead Isotope Data: Further Observations", *Archaeometry*, 1993, vol. 35, p. 259-261.

PERNICKA, E., BEGERMANN, F., SCHMITT-STRECKER, S., WAGNER, G. ., "Eneolithic and Early Bronze Age copper artefacts from the Balkans and their relation to Serbian copper ores", *Praehistorische Zeitschrift*, 1993, vol. 63, p. 1-54.

PERNICKA, E., "Provenance Determination of Archaeological Metal Objects", dans *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*, Roberts, B. W. & C. P. Thornton (éd.), Springer, New York, 2014, p. 239-268.

PERNOT, M., LEHOËRFF, A., "Battre le bronze il y a trois mille ans en Europe occidentale.", *Techne*, 2003, vol. 18, p. 43-48.

PERONNET, S., SRIKANLAYA, S., "The Han Ceramics", dans *Khao Sam Kaeo - An Early Port-City between the India Ocean and the South China Sea*, Bellina, B. (éd.), Ecole française d'Extrême-Orient, Paris, 2017, p. 391-423.

PERRET, D., "Aceh as a field for ancient history studies", dans *Mapping the Acehnese past*, Feener, R. M., P. Daly & A. Reid (éd.), KITLV Press, Leiden, 2011, p. 25-38.

PETCHEY, P., BELLINA, B., PRYCE, T. O., INNANCHAI, J., "A late prehistoric iron smithing workshop and associated iron industry at the port settlement of Khao Sek, Thai-Malay Peninsula", *Archaeological Research in Asia*, 2018, vol. 13, p. 59-73.

PETREQUIN, P., "North wind, south wind: Neolithic technological choices in the Jura Mountains, 3700–2400 BC", dans *Technological Choices: Transformations in Material Cultures since the Neolithic*, Lemonnier, P. (éd.), Routledge, Londres, 1993, p. 36-76.

PFAFFENBERGER, B., "Social Anthropology of Technology", *Annual Review of Anthropology*, 1992, vol. 21, p. 461-516.

PHƯƠNG, T. K., *Crossing Boundaries - Learning from the Past to Build the Future: An Archaeological Collaboration between Cambodia, Laos and Vietnam*, The regional center for social sciences and sustainable development, 2013.

PHƯƠNG, T. K., "Ceramic jars as 'prestige goods' in katu culture: Considering the upland-lowland product exchange network throughout history in Quang Nam province, Vietnam", *SPAFA Journal*, 2019, vol. 3, p. 1-24.

PIENITZ, R., AEBISCHER, S., CLOQUET, C., CARIGNAN, J., MAURICE, C., "Disruption of the geochemical metal cycle during mining: Multiple isotope studies of lake sediments from Schefferville, subarctic Québec", *Chemical Geology*, 2015, vol. 412, p. 167-178.

PIGOTT, V. C., NATAPINTU, S., "Archaeological investigations into prehistoric copper production: the Thailand Archaeometallurgy Project, 1984-86", dans *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*, Maddin, R. (éd.), M.I.T Press, Cambridge, 1988, p. 156-162.

PIGOTT, V. C., NATAPINTU, S., "Investigating the Origins of Metal Use in Prehistoric Thailand", dans *Ancient Chinese and Southeast Asian Bronze Age Cultures. The proceedings of a Conference held at the Edith and Joy London Foundation Property, Kioloa, NSW. 8-12 February, 1988*, Bulbeck, F. D. & N. Bernard (éd.), SMC publishing, Taipei, 1996, p. 787-808.

PIGOTT, V. C., WEISS, A. D., NATAPINTU, S., "The archaeology of Copper Production: Excavations in the Khao Wong Prachan Valley, Central Thailand", dans *South-East Asian Archaeology, 1992. Proceedings of the Fourth Internation Conference of the European Association of South-East Archaeologists. Rome, 28th September-4th October 1992*, Ciarla, R. & F. Rispoli (éd.), Serie Orientale Roma Vo. 77, Instituto Italiano per l'Africa e l'Oriente, Rome, 1997, p. 119-157.

PIGOTT, V. C., WEISGERBER, G., "Mining archaeology in geological context. The prehistoric copper mining complex at Phu Lon, Nong Khai Province, northeast Thailand", dans *Metallurgica Antiqua: In Honour of Hans-Gert Bachmann and Robert Maddin*, Rehren, T., A. Hauptmann & J. D. Mulhy (éd.), Deutsche Bergbau-Museum Bochum, 1998, p. 135-161.

PIGOTT, V. C., "Reconstructing the Copper Production Process as Practised among Prehistoric Mining/Metallurgical Communities in the Khao Wong Prachan Valley of Central Thailand", dans *Metals in Antiquity*, Young, S., M. A. Pollard, P. Budd & R. A. Ixer (éd.), Archeopress, Oxford, 1999, p. 10-21.

PIGOTT, V. C., MUDAR, K. M., AGELARAKIS, A., KEALHOFER, L., VOELKER, S. A., WEBER, J. C., "A program of analysis of organic remains from prehistoric copper producing settlements in the Khao Wong Prachan Valley, central Thailand: a progress report", dans *Uncovering Southeast Asia's past*, Bacus, E. A., I. C. Glover & V. C. Pigott (éd.), NUS, Singapore, 2006, p. 154-167.

PIGOTT, V. C., CIARLA, R., "On the origins of metallurgy in prehistoric Southeast Asia: the view from Thailand", dans *Metals and Mines – Studies in Archaeometallurgy*, La Niece, S., D. R. Hook & P. T. Craddock (éd.), London Archetype Publication, 2007.

PIGOTT, V. C., "Prehistoric copper mining and smelting in Southeast Asia: evidence from Thailand and Laos", dans *Ban Chiang, Northeast Thailand, volume 2C: the metal remains in regional context*, White, J. C. & E. G. Hamilton (éd.), University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia, 2019, p. 5-57.

POLLARD, M. A., "What a long strange trip it's been: lead isotope and archaeology", dans *From mine to microscope: Advances in the study of ancient Technology*, Shortland, A., I. C. Freestone & T. Rehren (éd.), Oxbow book, Oxford, 2009, p. 181-189.

POLLARD, M. A., "Isotopes and impact: a cautionary tale", *Antiquity*, 2011, vol. 85, p. 631-638.

POLLARD, M. A., BRAY, P., HOMMEL, P., HSU, Y.-K., LIU, R., RAWSON, J., "Bronze Age metal circulation in China", *Antiquity*, 2017, vol. 91, p. 674-687.

PRYCE, T. O., BELLINA, B., BENNETT, A., "The development of metal technologies in the Upper Thai-Malay Peninsula: initial interpretation of the archaeometallurgical evidence from Khao Sam Kaeo", *Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient*, 2006, vol. 93, p. 295-315.

PRYCE, T. O., BASSIAKOS, Y., CATAPOTIS, M., DOONAN, R. C., "« De caerimoniae » technological choices in copper-smelting furnace design at early bronze age chrysokamino, crete", *Archaeometry*, 2007, vol. 49, p. 543-557.

PRYCE, T. O., *Prehistoric Copper Production and Technological Reproduction in the Khao Wong Prachan Valley of central Thailand*, Unpublished doctoral thesis. Institute of Archaeology, University College London, 2008.

PRYCE, T. O., NATAPINTU, S., "Smelting Iron from Laterite: Technical Possibility or Ethnographic Aberration?", *Asian Perspectives*, 2009, vol. 48, p. 249-264.

PRYCE, T. O., PIGOTT, V. C., MARTINON-TORRES, M., REHREN, T., "Prehistoric copper production and technological reproduction in the Khao Wong Prachan Valley of Central Thailand",

Archaeological and Anthropological Sciences, 2010, vol. 2, p. 237-264.

PRYCE, T. O., BRAUNS, M., CHANG, N., PERNICKA, E., POLLARD, A. M., RAMSEY, C., REHREN, T., SOUKSAVATDY, V., SAYAVONGKHAMDY, T., "Isotopic and technological variation in prehistoric Southeast Asian primary copper production", *Journal of Archaeological Science*, 2011a, vol. 38, p. 3309-3322.

PRYCE, T. O., CHIEMSISOURAJ, C., ZEITOUN, V., FORESTIER, H., "An 8th-9th century AD iron smelting workshop near Saphim village, NW Lao PDR", *Historical Metallurgy*, 2011b, vol. 45, p. 81-89.

PRYCE, T. O., POLLARD, M., MARTINON-TORRES, M., PIGOTT, V. C., PERNICKA, E., "Southeast asia's first isotopically defined prehistoric copper production system: When did extractive metallurgy begin in the khao wong prachan valley of central thailand?", *Archaeometry*, 2011c, vol. 53, p. 146-163.

PRYCE, T. O., BEVAN, A. H., CIARLA, R., RISPOLI, F., CASTILLO, C., HASSETT, B., MALAKIE, J. L., "Intensive Archaeological Survey in Southeast Asia: Methodological and Metallurgical Insights from Khao Sai On, Central Thailand", *Asian Perspectives*, 2011d, vol. 50, p. 53-69.

PRYCE, T. O., "Technical analysis of Bronze Age Ban Non Wat copper-base artefacts", dans *The Origins of the civilization of Angkor: Volume 5: the excavation of Ban Non Wat: the Bronze Age*, Higham, C. F. W. & A. Kijngam (éd.), The Thai Fine Arts Department, Bangkok, 2011, p. 489-497.

PRYCE, T. O., "A flux that binds? The Southeast Asian Lead Isotope Project", dans *Proceedings of the 5th Forbes Symposium on ancient Asian bronzes*, Jett, P. & J. Douglas (éd.), Smithsonian, Washington, DC, 2012, p. 113-121.

PRYCE, T. O., "Sedentary and metallurgy in upland SoutheastAsia", dans *Mobility and Heritage in Northern Thailand and Laos: Past and Present - Proceedings of the Chiang Mai Conference, 1-2 December 2011*, Evrard, O., D. Guililaud & C. Vaddhanaphuti (éd.), 2013, p. 27-45.

PRYCE, T. O., BARON, S., BELLINA, B. H. M., BELLWOOD, P. S., CHANG, N., CHATTOPADHYAY, P., DIZON, E., GLOVER, I. C., HAMILTON, E., HIGHAM, C. F. W., KYAW, A. A., LAYCHOUR, V., NATAPINTU, S., NGUYEN, V., PAUTREAU, J. P., PERNICKA, E., PIGOTT, V. C., POLLARD, M., POTTIER, C., REINECKE, A., SAYAVONGKHAMDY, T., SOUKSAVATDY, V., WHITE, J., "More questions than answers: The Southeast Asian Lead Isotope Project 2009-2012", *Journal of Archaeological Science*, 2014, vol. 42, p. 273-294.

PRYCE, T. O., "Metallurgy in Southeast Asia", dans *Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*, Selin, H. (éd.), Springer, New York, 2016, p. 1-17.

PRYCE, T. O., HTWE, K. M. M., GEORGAKOPOULOU, M., MARTIN, T., VEGA, E., REHREN, T., WIN, T. T., WIN, T. T., PETCHEY, P., INNANCHAI, J., PRADIER, B., "Metallurgical traditions and metal exchange networks in late prehistoric central Myanmar, c. 1000 BC to c. AD 500"*Archaeological and Anthropological Sciences*, 2016.

PRYCE, T. O., MURILLO-BARROSO, M., BIGGS, L., MARTINON-TORRES, M., BELLINA, B., "The Metallurgical Industries", dans *Khao Sam Kaeo: An Early Port-City between the Indian Ocean and the South China Sea*, Bellina, B. (éd.), EFEO, 2017.

PRYCE, T. O., BELLINA, B., "High-tin bronze bowls and copper drums: Non-ferrous archaeometallurgical evidence for Khao Sek's involvement and role in regional exchange systems", *Archaeological Research in Asia*, 2017, vol. 13, p. 50-58.

PRYCE, T. O., O'REILLY, D., SHEWAN, L., "Copper-base metallurgy in Late Iron Age Cambodia: Evidence from Lovea", *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2017, vol. 13, p. 395-402.

PRYCE, T. O., KYAW, A. A., KYAW, M. M., WIN, T. T., "A first absolute chronology for Late Neolithic to Early Bronze Age Myanmar: New AMS 14C dates from Nyaung'gan and Oakaie", *Antiquity*, 2018, vol. 92, p. 690-708.

PRYCE, T. O., CADET, M., "Métallurgie du cuivre ancienne au Lao PDR", dans *Pà Hang, la montagne habitée: 100000 ans d'histoire de la biodiversité et de l'occupation humaine au nord du Laos*, Patole-Edoumba, E. & F. Demeter (éd.), Les Indes savantes-Museum d'Histoire Naturelle de la Rochelle, La Rochelle, 2018, p. 196-206.

PRYCE, T. O., "Initiating discourse on the (multi?) directionality of the Mainland Southeast Asian Bronze Age transition", dans *Proceedings of The Ninth International Conference on the Begining of the Use of Metals and Alloys (BUMA-IX) 16-19 October 2017, Busan, Korea*, Choi, J. Y. & S. J. Park (éd.), The Korean Institute of Metals and Materials, 2018, p. 160-175.

PRYCE, T. O., "Lead Isotope Characterization and Provenance of Copper-base Artifacts from Ban Chiang and Don Klang", dans *Ban Chiang, Northeast Thailand, volume 2C: the metal remains in regional context*, White, J. C. & E. G. Hamilton (éd.), University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia, 2019, p. 57-64.

RADEMAKERS, F. W., *Into the Crucible: Methodological approaches to reconstructing crucible metallurgy, from New Kingdom Egypt to Late Roman Thrace*, UCL London, 2015.

RADEMAKERS, F. W., REHREN, T., "Seeing the forest for the trees: Assessing technological variability in ancient metallurgical crucible assemblages", *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, vol. 7, p. 588-596.

RADIVOJEVIC, M., REHREN, T., KUZMANOVIC-CVETKOVIC, J., JOVANOVIC, M., NORTHOVER, J. ., "Tainted ores and the rise of tin bronzes in Eurasia, c. 6500 years ago", *Antiquity*, 2013, vol. 87, p. 1030-1045.

RAJPITAK, W., SEELEY, N., "The bronze bowls from Ban Don Ta Phet, Thailand: An enigma of prehistoric metallurgy", *World Archaeology*, 1979, vol. 11, p. 26-31.

RAJPITAK, W., *The Development of Copper Alloy Metallurgy in Thailand in the Pre-Buddhist Period with Special Reference to High-tin Bronze*, Unpublished doctoral thesis. Institute of Archaeology, University of London, 1983.

RAY, H. P., *Monastery and Guild: Commerce under the Satavahanas*, Oxford University Press, Delhi, 1986.

RAY, H. P., "Early maritime contacts between south and southeast asia", *Journal of Southeast Asian Studies*, 1989, vol. 20, p. 42-54.

RAY, H. P., "Seafaring in the Bay of Bengal in the early centuries AD", *Studies in History*, 1991, vol. 6, p. 1-14.

RAY, H. P., "The West Coast of India and the Maritime World of the Western Indian Ocean", *African Archaeological Review*, 2014, vol. 31, p. 583-598.

REHDER, J. E., *The mastery and uses of fire in antiquity*, McGill-Queen's University Press, Quebec, 2000.

REHREN, T., "Crucibles as reaction vessels in ancient metallurgy", dans *Mining and metal production through the ages*, Craddock, P. & J. Lang (éd.), British Museum Press, London, 2003, p. 207-215.

REHREN, T., CHARLTON, M., CHIRIKURE, S., HUMPHRIS, J., IGE, A., VELDHUIJZEN, H. A., "Decisions set in slag: the human factor in African iron smelting", dans *Metal and mines-Studies in Archaeometallurgy*, LaNiece, S., D. R. Hook & P. T. Craddock (éd.), Archetype Publication, London, 2007, p. 211-218.

REHREN, T., BOSCHER, L., PERNICKA, E., "Large scale smelting of speiss and arsenical copper at Early Bronze Age Arisman, Iran", *Journal of Archaeological Science*, 2012, vol. 39, p. 1717-1727.

REHREN, T., LESHTAKOV, P., PENKOVA, P., "Reconstructing Chalcolithic copper smelting at Akladi Cheiri", dans *Der Schwarzmeerraum vom Neolithikum bis in die Früheisenzeit (6000-600 v.Chr.)*, Nilokov, V. & W. Schier (éd.), Alle Rechte vorbehalten, 2016, p. 205-214.

REINECKE, A., SON, L. D., PHUC, L. D., "Towards a prehistory in the northern part of central Vietnam. A review following a Vietnamese-German research project", dans *Beiträge zur allgemeinen und vergleichenden archäologie*, Kommission für Allgemeine und Vergleichende Archäologie des Deutschen Archäologischen Instituts, Bonn, 1999, p. 5-59.

REINECKE, A., LAYCHOUR, V., SONETRA, S., *The first Golden Age of Cambodia: Excavation at Prohear*, German Foreign Office, Bonn, 2009.

REINECKE, A., "Trade Ware - Migrants'Heirlooms - Local Copies? The Vietnamese Coast between 300 BC and 100 AD", dans *Conference on Maritime Exchange and Localization across the South China Sea, 500 BC - 500 AD, Tainan, November 2018*, 2018, p. 20-40.

REINHARDT, K., *Mining and Smelting Technology and the Politics of Bronze in Shang and Western Zhou China: An Inquiry into the Bronze Age Interaction Sphere*, Unpublished master dissertation. East Asian Studies Department, McGill Univeristy, 1997.

RISPOLI, F., "Late-third/Early Second Millennium BC Pottery Traditions in Central Thailand: Some Preliminary Observations in a Wider Perspective", dans *Southeast Asian Archaeology 1992. Proceeding of the Fourth International Conference of the European Association of South-East Asian Archaeologists, Rome, Sept. 28th-Oct. 4th 1992*, Ciarla, R. & F. Rispoli (éd.), Rome, 1997, p. 59-97.

RISPOLI, F., "The Incised & Impressed Pottery Style of Mainland Southeast Asia : Following the Paths of Neolithization", *East and west*, 2007, vol. 57, p. 235-304.

RISPOLI, F., CIARLA, R., PIGOTT, V. C., "Establishing the Prehistoric Cultural Sequence for the Lopburi Region, Central Thailand", *Journal of World Prehistory*, 2013, vol. 26, p. 101-171.

RIVETT, P., HIGHAM, C. F., "The Archaeology of Salt Production", dans *The Origins of the Civilization of Angkor. vol. 2, The Excavation of Noen U-Loke and Non Muang Kao*, Higham, C. F., A. Kijngam & S. Talbot (éd.), Fine Art Department of Thailand, Bangkok, 2007, p. 589-594.

ROSTOKER, W., "Some Experiments in Prehistoric Copper Smelting", *Paléorient*, 1975, vol. 3, p. 311-315.

ROSTOKER, W., PIGOTT, V. C., DVORAK, J. R., "Direct Reduction to Copper Metal by Oxide-Sulfide Mineral Interaction", *Archeomaterials*, 1989, vol. 3, p. 69-87.

ROSTOKER, W., DVORAK, J. R., "Some experiments with co-smelting to copper alloys", *Archeomaterials*, 1991, vol. 5, p. 5-20.

ROTHENBERG, B., SHAW, C. T., "The Discovery of a Copper Mine and Smelter from the End of the Early Bronze Age (EBIV) in the Timna Valley.", *Institute for Archaeo- Metallurgical Studies Newsletter*, 1990, vol. 15, p. 1-8.

ROUX, V., PELEGRIN, J., "Taille des perles et specialisation artisanale. Enquete ethnoarcheologique dans le Gujarat.", *Techniques et Cultures*, 1989, vol. 14, p. 23-49.

ROUX, V., BRIL, B., DIETRICH, G., "Skills and learning difficulties involved in stone knapping: The case of stone-bead knapping in Khambhat, India", *World Archaeology*, 1995, vol. 27, p. 63-87.

ROUX, V., MATARASSO, P., "Crafts and the evolution of complex societies: new methodologies for modeling the organization of production, a Harappan example", dans *The Social Dynamics of Technology: Practice, Politics and World Views*, Dobres, M. A. & C. R. Hoffman (éd.), Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 1999, p. 46-70.

ROUX, V., "Ceramic Standardization and Intensity of Production: Quantifying Degrees of Specialization", *American Antiquity*, 2003, vol. 68, p. 768-782.

ROUX, V., "Evolutionary trajectories of technological traits and cultural transmission", dans *Cultural transmission and material culture: Breaking down boundaries*, Stark, M. T. (éd.), University of Arizona Press, Tucson, 2008, p. 82-105.

ROUX, V., "Lecture anthropologique des assemblages céramiques: Fondements et mise en œuvre de l'analyse technologique", *Les nouvelles de l'archéologie*, 2010, vol. 119, p. 4-9.

ROVIRA, S., AMBERT, P., "Les céramiques à réduire le minerai de cuivre: une technique métallurgique utilisée em Ibérie, son extension en France méridionale", *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 2002, vol. 88, p. 105-126.

ROVIRA, S., MONTERO-RUIZ, L., RENZI, M., "Experimental co-smelting to copper-tin alloys", dans *Metals and Societies: Studies in honour of Barbara S. Ottaway. Universitatsforschungen*, Kienlin, T. & B. W. Roberts (éd.), Hablet, Bonn, 2009, p. 407-414.

SAEZ, R., NOCETE, F., NIETO, J. M., CAPITAN, M. A., ROVIRA, S., "the Extractive Metallurgy of Copper From Cabezo Jure, Huelva, Spain: Chemical and Mineralogical Study of Slags Dated To the Third Millenium B.C.", *The Canadian Mineralogist*, 2007, vol. 41, p. 627-638.

SANTONI, M., HAWIXBROCK, C., "Fouilles et prospections dans la région de Vat Phu (province de Champassak, sud du Laos)", *BEFEO*, 1998, vol. 85, p. 347-405.

SANTONI, M., HAWIXBROCK, C., SOUKSAVATDY, V., "La Mission archéologique française et le Vat Phu : recherches sur un site exceptionnel du Laos", dans *Recherches nouvelles sur le Laos*, Goudineau, Y. & M. Lorrillard (éd.), EFEO, Vientiane/Paris, 2008, p. 81-111.

SAYAVONGKHAMDY, T., BELLWOOD, P. S., "Recent archaeological research in Laos", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 2000, vol. 19, p. 101-110.

SCHAEFER, S., HUNDLEY, G., BLOCK, F., MCCUNE, R., MRAZEK, R., "Phase equilibria and X-ray diffraction investigation of the system Cu−Fe−O", *Metall Trans*, 1970, vol. 1, p. 2557.

SCHLEMMER, G., "Ethnic Belonging in Laos : A Politico-Historical Perspective", dans *Changing lives. New perspective on society, politics and culture in Laos*, Bouté, V. & V. Pholsena (éd.), NUS Press, Singapore, 2017.

SCHWARTZ, M. O., RAJAH, S. S., ASKURY, A. K., PUTTHAPIBAN, P., DJASWADI, S., "The Southeast Asian tin belt", *Earth Science Reviews*, 1995, vol. 38, p. 95-293.

SCOTT, D. A., *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*, The Getty Conservation Institute, 1991.

SCOTT, G., O'REILLY, D., "Rainfall and circular moated sites in north-east Thailand", *Antiquity*, 2015, vol. 89, p. 1125-1138.

SCOTT, J. C., *The Art of Not Being Governed : An Anarchist History of Upland Southeast Asia*, Yale University, New Haven, 2009.

SEELEY, N. J., RAJPITAK, W., "The bronze technology", dans *Prehistoric investigations in northeastern Thailand, vol S-231*, Higham, C. F. W. & A. Kijngam (éd.), BAR, Oxford, 1984, p. 102-124.

SHENNAN, S. J., "Cost, Benefit, and Value in the Organization of Early European Copper Production", *Antiquity*, 1999, vol. 73, p. 352-363.

SHEWAN, L., O'REILLY, D., ARMSTRONG, R., TOMS, P., WEBB, J., BEAVAN, N., LUANGKHOTH, T., WOOD, J., HALCROW, S., DOMETT, K., VAN DER BERGH, J., CHANG, N., "Dating the megalithic culture of laos : Radiocarbon , optically stimulated luminescence and U / Pb zircon results", *PLoS ONE*, 2021, vol. 16, p. 1-31.

SHIMIZU, N., CHANG, N., SOUKSAVATDY, V., LUANGKHOTH, T., "Trade Ceramics Recovered from the MMG-LXML Sepon Mining Tenement, Savannakhet Province, the Lao PDR-Preliminary Review: Trading and Distribution based on Composition, Origin and Age", *Journal of Southeast Asian Archaeology*, 2016, vol. 36, p. 47-60.

SHINDE, V., "Mantai: An Important Settlement in North-West Sri Lanka", *East and West*, 1987, vol. 37, p. 327-336.

SILLAR, B., TITE, M., "The challenge of « technological choices » for material science approaches in archaeology", *Archaeometry*, 2000, vol. 42, p. 2-20.

SILLITOE, R. H., "Comments on geology and exploration potential for copper and gold deposits at Sepon, Laos", *A report prepared for Lane Xang Minerals Limited*, 1998.

SMAIL, J., "On the possibility of an autonomous history of Southeast Asia", *Journal of Southeast Asian Studies*, 1962, vol. 2, p. 72-102.

SMITH, M. L., "The Archaeology of South Asian Cities", *Journal of Archaeological Research*, 2006, vol. 14, p. 97-142.

SMITH, S., OLBERG, D., MANINI, A., "The Sepon gold deposits, Laos: exploration, geology and comparison to Carlin-type gold deposits in the Great Basin", dans *Geological Society of Nevada Symposium, Reno, Nevada*, 2005.

SOLHEIM, W., "Further relationships of the Sa-Huynh-Kalanay pottery tradition", *Asian Perspectives*, 1964, vol. 8, p. 196-211.

SPRENGER, G., "Political Periphery, Cosmological Center: The Reproduction or Rmeet Sociocosmic Order and the Laos-Thailand Border", *Political Periphery*, 2005, vol. 12, p. 65-82.

SPRENGER, G., "Transcultural communication and social order: Comparisons in upland Southeast Asia", *Asian Ethnology*, 2013, vol. 72, p. 299-319.

SRINIVASAN, S., GLOVER, I. C., "Wrought and quenched and cast high-tin bronzes from Kerala state , India", *The Journal of Historical Metallurgy Society*, 1995, vol. 29, p. 69-88.

SRINIVASAN, S., "Megalithic high-tin bronzes and peninsular India's « Living prehistory »", dans *50 years of Southeast Asian Archaeology: Essays in Honour of Ian C. Glover*, Bellina, B., E. A. Bacus, T. O. Pryce & J. Wisseman Christie (éd.), River Book, Bangkok, 2010, p. 260-271.

STARK, M. T., "The Transition to History in the Mekong Delta: A View From Cambodia", *International Journal of Historical Archaeology*, 1998a, vol. 2, p. 175-204.

STARK, M. T., *The archeology of social boundaries*, (Stark, M. T., Éd.), Smithsonian Inst. Press, Washington, DC, 1998b.

STARK, M. T., SOVATH, B., "Recent research on the emergence of Early Historic states in Cambodia's lower Mekong Delta", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 2001, vol. 21, p. 85-98.

STARK, M. T., "Mainland Southeast Asia Late Prehistoric", dans *Encyclopedia of Prehistory, vol. 3: East Asia and Oceania*, Peregrine, P. & M. Ember (éd.), Plenum, New York, 2001, p. 160-205.

STARK, M. T., "Angkor Borei and the Archaeology of Cambodia's Mekong Delta", dans *Art & Archaeology of Fu Nan: Pre-Khmer Kingdom of the Lower Mekong Valley*, Khoo, J. C. M. (éd.), Orchid Press, Bangkok, 2003, p. 87-106.

STARK, M. T., "Pre-Angkorian settlement trends in Cambodia's Mekong Delta and the Lower Mekong Archaeological Project", *BIPPA*, 2006a, vol. 26, p. 98-109.

STARK, M. T., "Early mainland Southeast Asian landscapes in the first millennium AD", *Annual Review ofAnthropology*, 2006b, vol. 35, p. 407-432.

STARK, M. T., "Inscribing Legitimacy and Building Power in the Mekong Delta", dans *Social Theory in Archaeology and Ancient History: the Present and Futur of Counternarratives*, Emberling, G. (éd.), Cambridge university press, Cambridge, 2015, p. 75-106.

STARK, M. T., FEHRENBACH, S., "Earthenware ceramic technologies of Angkor Borei, Cambodia", *UDAYA: Journal of Khmer Studies*, 2019, p. 109-135.

STECH, T., MADDIN, R., "Reflections on Early Metallurgy in Southeast Asia", dans *The Beginning of the Use of Metals and Alloys: Papers from the Second International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys, Zhengzhou, China, 21-26 October, 1986*, Maddin, R. (éd.), MIT Press, Cambridge, 1988, p. 163-174.

STOKES, R. B., LOVATT SMITT, P. F., SOUMPHONPHAKDY, K., "Timing of the Shan-Thai Indochina collision: new evidence from the Pak Lay Fold Belt of the Lao PDR", *The Geological Society*, 1996, vol. 106, p. 225-232.

STOS-GALE, Z., "Cycladic copper metallurgy", dans *Der Anschnitt, Beiheft 7: Old World archaeometallurgy*, Hauptmann, A., E. Pernicka & G. Wagner (éd.), Selbstverlag des Deutschen Bergbau- Museums, Bochum, 1989, p. 279-291.

STOS-GALE, Z., GALE, N. H., "New light on the provenance of the copper oxhide ingots found on Sardinia", dans *Sardinia in the Mediterranean: a Footprint in the Sea. Studies in Sardinian Archaeology Pre sented to Miriam Balmuth*, Tylecote, R. F. & T. . Andrews (éd.), Sheffield Academic Press, 1992, p. 317-346.

TAYLOR, K. W., *The Birth of Vietnam*, University of California Press, Los Angeles, 1983.

TEREYGEOL, F., CRUZ, P., "Metal del viento. Aproximación experimental para la comprensión del funcionamiento de las wayr as andinas", *Estudios Atacamenos*, 2014, vol. 48, p. 39-54.

TEREYGEOL, F., CRUZ, P., "The Potosi silver mine: technique at the centre of a power struggle between the Incas and the Spaniards (16th-17th centuries)", *Patrimoines du Sud*, 2021, vol. 13.

THIRLWALL, M. F., "Multicollector ICP-MS analysis of Pb isotopes using a 207Pb - 204Pb double spike demonstrates up to 400 ppm/amu systematic errors in Tl-normalization", *Chemical Geology*, 2002, vol. 184, p. 255-279.

THORNTON, C. P., ROBERTS, B. W., "Introduction : The Beginnings of Metallurgy in Global Perspective", dans *Metals and societies: Papers in honour of Barbara Ottaway*, Kienlin, T. L. & B. W. Roberts (éd.), 2009, p. 25-33.

TOMBER, R., CARTWRIGHT, C., GUPTA, S., "Rice temper: Technological solutions and source identification in the Indian Ocean", *Journal of Archaeological Science*, 2011, vol. 38, p. 360-366.

TUCCI, A., SAYAVONGKHAMDY, T., CHANG, N., SOUKSAVATDY, V., "Ancient Copper Mining in Laos: Heterarchies, Incipient States or Post-State Anarchists?", *Journal of Anthropology and Archaeology*, 2014, vol. 2, p. 1-15.

TURTON, A., "Introduction", dans *Civility and Savagery. Social Identity in Tai states*, Turton, A. (éd.), Curz, Richmondh, 2000, p. 3-31.

TYLECOTE, R. F., *Metallurgy in archaeology*, Edward Arnold, London, 1962.

TYLECOTE, R. F., "Can copper be smelted in a crucible?", *Historical Metallurgy Group Bulletin*, 1975, vol. 8.

TYLECOTE, R. F., "Summary of results of experimental work on early copper smelting", dans *Aspects of Early Metallurgy*, Oddy, W. A. (éd.), British Museum, London, 1980, p. 5-12.

VAAJAMO, I., JOHTO, H., TASKINEN, P., "Solubility study of the copper-lead system", *International Journal of Materials Research*, 2013, vol. 104, p. 372-376.

VAN THANG, D., *Prehistoric and Protohistoric archaeology of Ho Chi Minh City*, the museum, the Youth Publishing House, 1998.

VANDER VOORT, G. F. (ÉD.), "Metallography and Microstructures", dans *ASM Handbook*, ASM Intern, 2004, p. 1844-1850.

VERNA, C., "Qualités des fers, prix des marchés, valeurs des hommes et des alliances (haut Vallespir, XVe siècle)", dans *Sources sérielles et prix au Moyen Âge*, Denjean, C. (éd.), Méridiennes, Université de Toulouse-Le-Mirail, 2009, p. 354-398.

VERNON, W. W., "The crucible in copper-bronze production at prehistoric Phu Lon, northeast Thailand: analyses and interpretation.", dans *Ancient Chinese and Southern Asian Bronze Cultures 1988*, Bulbeck, F. D. & N. Barnard (éd.), SMC publishing, Taipei, 1996, p. 809-820.

VERNON, W. W., "Chronological Variation in Crucible Technology at Ban Chiang: A Preliminary Assessment", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 1997, vol. 16, p. 107-110.

VERNON, W. W., WHITE, J. C., HAMILTON, E. G., "Metal Product Manufacturing Evidence: Crucibles, Molds and Slags", dans *Ban Chiang, Northeast Thailand, Volume 2B: Metals and Related Evidence from Ban Chiang, Ban Tong, Ban Phak Top, and Don Klang*, White, J. C. & E. G. Hamilton (éd.), University of Pennsylvania press, Philadelphia, 2018, p. 103-124.

VINCENT, B., "Rice in pottery: new evidence for early rice cultivation in Thailand", *Indo Pacific Prehistory Association Bulletin*, 2003, vol. 23, p. 51-58.

WANG, D. N., PIGOTT, V. C., NOTIS, M. R., *The Archaeometallurgical Analysis of Copper-base Artifacts from Prehistoric Nil Kham Haeng, Central Thailand: A Preliminary Report*, Unpublished report. Lehigh University, Bethlehem, 1998.

WANG, Q., STREKOPYTOV, S., ROBERTS, W. R., WILKIN, N., "Tin ingots from a probable Bronze Age shipwreck off the coast of Salcombe, Devon: composition and microstructure.", *Journal of Archaeological Science*, 2016, vol. 67, p. 80-92.

WANG, W. M., DING, J. L., SHU, J. W., CHEN, W., "Exploration of early rice farming in China",

Quaternary International, 2010, vol. 227, p. 22-28.

WATROBA, E., *An investigation of the metallurgical material from Puen Baolo and Thong Na Nguak, Laos*, Unpublished master thesis. Institute of Archaeology, University College London, 2012.

WEBER, S., LEHMAN, H., BARELA, T., HAWKS, S., HARRIMAN, D., "Rice or millets: Early farming strategies in prehistoric central Thailand", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2010, vol. 2, p. 79-88.

WERTIME, T. A., "The Beginnings of Metallurgy: A New Look", *Science*, 1973, vol. 182, p. 875-887.

WHEATLEY, P., "Urban Genesis in Mainland Southeast Asia", dans *Early South East Asia: Essays in Archaeology, History and Historical Geography*, Smith, R. B. & W. Watson (éd.), Oxford University Press, New York, 1979, p. 288-303.

WHEELER, R. E., DEVA, K., GHOSH, A., "An Indo-Roman trading station on the east coast of India", *Ancient India*, 1946, vol. 2, p. 17-124.

WHITE, J. C., "Early east asian metallurgy: the southern tradition", dans *The Beginning of the use of metals and alloys: Papers from the Second International conference on the Begining of the use of metals and alloys, Zengzhou, China*, Maddin, R. (éd.), MIT Press, Cambridge, 1988, p. 175-181.

WHITE, J. C., VERNON, W. W., FLEMING, S., GLANZMAN, W., HANCOCK, R., PELCIN, A., "Preliminary Cultural Implications from Initial Studies of the Ceramic Technology at Ban Chiang", dans *Indo Pacific Prehistory Association 1990: Proceedings of the 14th Congress of the Indo-Pacific Association, Yogyakarta, Indonesia, 26 August to 2 September 1990, Volume 2*, Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association 11, 1991, p. 188-203.

WHITE, J. C., PIGOTT, V., "From community craft to regional specialization: intensification of copper production in Pre-state Thailand", dans *Craft Specialization and Social Evolution: in Memory of V. Gordon Childe*, Wailes, B. (éd.), University of Pennsylvania press, Philadelphia, 1996, p. 151-176.

WHITE, J. C., BOUASISENGPASEUTH, B., "Archaeology of the Middle Mekong: Introduction to the Luang Prabang Province Exploration Survey", dans *Recherches nouvelles sur le Laos*, Goudineau, Y. & M. Lorrillard (éd.), Ecole française d'Extrême-Orient, 2008, p. 37-52.

WHITE, J. C., HAMILTON, E. G., "The Transmission of Early Bronze Technology to Thailand: New Perspectives", *Journal of World Prehistory*, 2009, vol. 22, p. 357-397.

WHITE, J. C., LEWIS, H., BOUASISENGPASEUTH, B., MARWICK, B., ARRELL, K., "Archaeological investigations in northern Laos: contributions to Southeast Asian prehistory", *Antiquity*, 2009, vol. 83.

WHITE, J. C., HAMILTON, E. G., "The transmission of early Bronze Age technology to Thailand: New perspectives", dans *Archaeometallurgy in Global Perspective*, Roberts, B. W. & C. P. Thornton (éd.), Springer, New York, 2014, p. 805-852.

WHITE, J. C., HAMILTON, E. G., *Ban Chiang, Northeast Thailand, Volume 2A: background to the study of the metal remains*, University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia, 2018a.

WHITE, J. C., HAMILTON, E. G., *Ban Chiang, Northeast Thailand, Volume 2B: Metals and related evidence from Ban Chiang, Ban Tong, Ban Phak Top and Don Klang*, University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia, 2018b.

WHITE, J. C., HAMILTON, E. G., "The Archaeometallurgy of Prehistoric Northern Northeast Thailand in Regional Context", dans *Ban Chiang, Northeast Thailand, volume 2C: the metal remains in regional context*, White, J. C. & E. G. Hamilton (éd.), Pensylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia, 2019, p. 65-123.

WISSEMAN CHRISTIE, J., "Trade and Early State Formation in Maritime Southeast Asia: Kedah and Srivijaya", *jebat*, 1984, vol. 13, p. 43-56.

WISSEMAN CHRISTIE, J., "Trade and State Formation in the Malay Peninsula and Sumatra, 300 B.C. - A.D. 700", dans *The Southeast Asian Port and Polity*, Kathirithamby-Wells, J. & J. Villiers (éd.), University of Singapore Press, Singapore, 1990, p. 39-60.

WISSEMAN CHRISTIE, J., "State Formation in Early Maritime Southeast Asia: A Consideration of the Theories and the Data", *Journal of the Humanities and Social Sciences of Southeast Asia*, 1995, vol. 151, p. 235-288.

WOLTERS, O. W., *History, Culture and Region in Southeast Asian Perspectives*, Institute for Southeast Asian Studies, Singapore, 1982.

WU, X., HEIN, A., ZHANG, X., JIN, Z., WEI, D., HUANG, F., YIN, X., "Resettlement strategies and Han imperial expansion into southwest China: a multimethod approach to colonialism and migration", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2019, vol. 11, p. 6751-6781.

YAMAGATA, M., "Formation of Lin Yi, derived from archaeological materials.", *Journal of Southeast Asian Archaeology*, 1997, vol. 17, p. 168-184.

YAMAGATA, M., MANH PHAM, D., CHI HOANG, B., "Western Han Bronze Mirrors recently discovered in Central and Southern Vietnam", *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 2001, vol. 21, p. 99-106.

YAMAGATA, M., "Inland Sa Huyhn culture along the Thu Bon valley in Central Vietnam", dans *Uncovering Southeast Asia's past*, Bacus, A., I. C. Glover & V. C. Pigott (éd.), NUS Press, Singapore, 2006, p. 168-183.

YAMAGATA, M., "The early history of Lin-Yi viewed from archaeology", *Acta Asiatica*, 2007, vol. 92, p. 1-30.

YANG, F., *Yunnan Hebosuo he Yubeidi yizhi yicun fenxi 云南河泊所和玉碑地遗址植物遗存分析.The Analysis of Charred Plant remains at Hebosuo site and Yubeidi site in Yunnan Province*, Unpublished master thesis. Archaeology and Museum Studies, Shandong University, 2016.

YAO, A., "Recent developments in the archaeology of southwestern China", *Journal of Archaeological Research*, 2010, vol. 18, p. 203-239.

YAO, A., "Politics of Time on the Southwest Frontier of China's Han Empire", *American Anthropologist*, 2017, vol. 119, p. 86-103.

YAO, A., DARRE, V., ZHILONG, J., LAM, W., WEI, Y., "Bridging the time gap in the Bronze Age of Southeast Asia and Southwest China", *Archaeological Research in Asia*, 2020, vol. 22, p. 100189.

ZHANG, Z., *Yunnan yejin shi 雲南冶金史 Yunnan metallurgy history*, Yunnan Meishu Chubanshe 雲南美術出版社. Kunming, 2000.

ZHANGSUN, Y. Z., LIU, R. L., JIN, Z. Y., POLLARD, A. M., LU, X., BRAY, P. J., FAN, A. C., HUANG, F., "Lead Isotope Analyses Revealed the Key Role of Chang'an in the Mirror Production and Distribution Network During the Han Dynasty", *Archaeometry*, 2017, vol. 59, p. 685-713.

ZHOU, W., CHEN, J., LEI, X., XU, T., CHONG, J., WANG, Z., "Three western zhou bronze foundry sites in the Zhouyuan area, Shaanxi province, China", dans *Metallurgy and civilisation : Eurasia and Beyond*, 2009, p. 62-73.

ZOU, G., CUI, J., LIU, X., LI, X., MIN, R., "Investigation of early Bronze Age civilizations in Yunnan: a scientific analysis of metallurgical relics found at the Guangfentou ruins in Jiangchuan", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2019, vol. 11, p. 15-31.