Université Paris Nanterre

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

Membre de l'université Paris Lumières

École doctorale 396 : Économie, organisation, société
Laboratoire CEROS EA4429

Ahlam Azzamouri

Construction de méthodes et d'outils de planification pour l'industrie minière du phosphate en contexte de Lean Management

Thèse présentée et soutenue publiquement le 05/12/2018

en vue de l'obtention du doctorat de Sciences de gestion de l'Université Paris Nanterre
sous la direction de M. Pierre Féniès (Université Paris Nanterre) et de M. Frédéric Fontane (EMINES-School of Industrial Management)

Jury :

Rapporteur :	Mme. Karine Samuel	Professeur à l'INP-Grenoble
Rapporteur :	Mr. Vincent Hovelaque	Professeur à l'IGR-IAE, Université de Rennes 1
Suffragant :	Mr. Thierry Fouque	Professeur à l'Université Paris Nanterre
Suffragant:	Mr. Vincent Giard	Professeur émérite à l'Université Paris Dauphine
Suffragant:	Mr. Nicolas Cheimanoff	Professeur à l'EMINES-Université Mohammed VI Polytechnique
Suffragant:	Mr. Sidi Mohammed Ouabba	Directeur production de la mine de Ben Guerir, OCP-SA
Directeur de thèse:	Mr. Frédéric Fontane	Professeur à l'EMINES- Université Mohammed VI Polytechnique
Directeur de thèse:	Mr. Pierre Féniès	Professeur à l'Université Paris Nanterre/ Paris II

Mémoire de thèse de doctorat
de l'Université Paris Nanterre
Ecole doctorale 396 : Economie, Organisations, Société (EOS)
Laboratoire CEROS EA4429
Préparé à l'EMINES-School of Industrial Management
Présenté en vue de l'obtention du grade de docteur en Sciences de Gestion

Construction de méthodes et d'outils de planification pour l'industrie minière du phosphate en contexte de Lean Management

Date de soutenance prévue le : 05/12/2018

Par: Ahlam AZZAMOURI

Composition du jury :

Rapporteurs :

-Karine Samuel : Professeur à l'INP-Grenoble

-Vincent Hovelaque : Professeur à l'IGR-IAE, Université de Rennes 1

Suffragants :

- Thierry Fouque : Professeur à l'Université Paris Nanterre

- Vincent Giard : Professeur émérite à l'Université Paris Dauphine

- Nicolas Cheimanoff : Professeur à l'EMINES-Université Mohammed VI Polytechnique

- Sidi Mohammed Ouabba : Directeur de production de la mine de Ben Guerir, OCP-SA

Directeurs de thèse :

- Pierre Féniès : Professeur à l'Université Paris Nanterre

- Frédéric Fontane : Professeur à l'EMINES- Université Mohammed VI Polytechnique

There is no elevator to success, you have to take the stairs …

REMERCIEMENT

Au terme de cette thèse, je tiens avant tout à exprimer ma vive reconnaissance, et mon dévouement au Groupe OCP et plus précisément la mine de Ben Guérir-Site de Gantour, pour l'opportunité qu'il m'a offert pour avoir un terrain industriel réel sur lequel je pouvais réaliser mon travail et réussir mon projet de thèse.

Je prie Messieurs My Bensalem Maaroufi et Sidi Mohammed Ouabba, d'accepter mon respect et ma gratitude pour leur soutien et remarques constructives qu'ils m'ont prodiguées tout au long de cette période de thèse.

Ma préparation de thèse n'aurait pu aboutir sans le soutien remarquable de tous les acteurs de la supply chain du site de Ben Guérir, que je tiens à remercier chaleureusement pour leur aide.

Je tiens à remercier infiniment l'Université Paris Nanterre de m'avoir accueilli pour mon travail de thèse. J'adresse mes plus sincères remerciements à l'école doctorale et ses secrétaires en particulier Mme. Isabelle TRIPET pour leur aide et réactivité.

Mes vifs remerciements vont également à l'EMINES-School of Industrial Management sous la direction du Professeur Nicolas Cheimanoff pour la qualité d'encadrement et de suivi ainsi que pour la formation acquise et l'opportunité offerte de vivre cette expérience scientifique.

Je souhaite adresser un remerciement spécial à mes chers directeurs de thèse, les Professeurs Frédéric Fontane et Pierre Féniès, pour leur encadrement, suivi et directives pour mener à bien cette recherche. J'ai vécu une période très formatrice grâce à eux. Je remercie vivement les Professeurs Karine Samuel et Vincent Hovelaque d'avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire de thèse. Je remercie également les Professeurs Thierry Fouque et Vincent Giard d'avoir accepté de participer à ce jury. Qu'il me soit permis d'exprimer ma gratitude et ma profonde reconnaissance à ce dernier pour son soutien tout au long de ce travail de recherche.

Je remercie très profondément mes parents et ma petite famille qui m'ont soutenu et encouragé durant toute ma vie étudiante.

À l'ensemble du jury, je tiens à exprimer mon profond respect et gratitude en espérant qu'ils trouveront dans ce manuscrit l'expression de ma considération et le témoignage de mon estime.

Ahlam AZZAMOURI

RÉSUMÉ

La demande mondiale en ressource minérale en général et celle du phosphate en particulier connait une forte croissance depuis plusieurs années. C'est dans ce contexte tendu que chaque industriel cherche à être pionnier et à réduire ses coûts afin d'assurer sa pérennité tout en étant soumis aux contraintes légales dans une perspective de développement responsable. Face à des enjeux comparables, plusieurs industries manufacturières se sont orientées avec succès depuis plusieurs décennies vers l'approche japonaise du Lean Management. C'est pour cette raison que nous avons réfléchi à proposer à travers ce projet de recherche une méthodologie pour le Lean Mining Responsable visant à améliorer l'efficacité et l'efficience de l'industrie minière. L'ensemble des méthodes, briques logicielles et concepts proposés dans cette thèse ont été construit à partir d'un retour d'expérience réalisé sur le système minier d'extraction du phosphate de l'axe centre de l'OCP SA. Nos travaux, réalisés sous la forme d'une recherche action, se caractérisent par des apports à 3 niveaux :

Apports méthodologiques ; nous proposons la Méthodologie ASCI-LM pour évaluer l'impact sur l'organisation industrielle liés à la mise en place d'outils et de méthodes en contexte minier. Cette approche constitue un guide méthodologique permettant une recherche action dans le contexte de l'industrie minière. Ce guide méthodologique explique comment formaliser les modèles de connaissance (cartographie des flux) et comment imbriquer les modèles informatiques permettant d'évaluer informatiquement des scenarios organisationnels liés à des problèmes de coordination des activités en contexte minier.

Briques logicielles pour l'aide à la décision ; l'interdépendance spatio-temporelle qui caractérise la chaîne minière, rend difficile la prédiction de l'impact de la décision prise. Ce point est un facteur-clé qui explique la démotivation de l'industrie minière à l'égard de la mise en œuvre du Lean Mining. Un système d'aide à la prise de décision pour l'industrie minière aura comme objectif de pouvoir reproduire la réalité et par la suite de tester l'impact de différentes décisions en prenant compte de : l'état du gisement, le programme de maintenance, la disponibilité des machines, les demandes à satisfaire… Les décisions prises dans le processus extractif auront comme impact sur : l'évolution des stocks de minerai, l'occupation des machines mobilisées, la satisfaction de la demande… Nous proposons deux briques logicielle dont la première porte sur la planification minière pour assurer un pilotage intégré de la mine et aider à la prise de

décision dans un délai court. La deuxième brique logicielle que nous avons imaginée évalue / optimise les méthodes d'organisations industrielles de la mine lors de la constitution des « mélanges » de minerai ; le mélange de minerai constitue l'output commercialisable du système minier et qui est envoyé aux clients internes ou externes de la supply chain minière.

Nouvelles méthodes d'organisation industrielle ; Nous avons proposé une méthode de constitution des mélanges de minerai qui change complètement celle utilisée actuellement. Cette dernière est basée sur une logique de nomenclature figée alors que nous proposons des nomenclatures dynamiques que nous avons appelés « blending dynamique ». Ces nomenclatures dynamiques visent à définir les mélanges optimaux qui varient au fil du temps en fonction des minerais extrait du chantier et de leur composition chimique. Malgré les réticences qui pouvaient y avoir pour adopter cette approche (ce qui est logique dans une organisation « historique »), les mineurs ont montré un grand intérêt vis-à-vis de l'approche qui a été validée sur le terrain et qui est même généralisable sur d'autres contextes.

Mots clés : Lean Mining, mine à ciel ouvert, ASCI, planification, blending dynamique, modélisation.

ABSTRACT

Global demand for mineral resources in general, and phosphate in particular, has been growing strongly for several years. In this increased competitive environment, every industry seeks to be pioneering and to reduce its costs to ensure its sustainability while complying with new responsible development regulations. Faced with this kind of challenges, a number of manufacturing industries have turned to the Japanese Lean Management approach. With this in mind, we designed our research project to develop a Lean Sustainable Mining methodology aimed at improving the mining industry's efficiency and effectiveness at the OCP-SA center axis phosphate mine. We first conducted a detailed review of the Lean Mining (LM) literature to assess how well such an approach had already been implemented, which points are directly relevant to the mine and which are not. We also reviewed the implementation methodologies and assessed how effectively they were used. This analysis highlighted multiple shortcomings including in relation to the methodological approaches, the software bricks for decision support systems, the industrial organization methods and adequate factoring in of all energy-related aspects.

We first recommend applying the ASCI (Analyze, Specification, Conception, Implementation) methodology to LM in order first to identify all the steps upstream of development of the relevant knowledge model and then the associated action model. This phase was developed based on a thorough analysis of mine soil characteristics in order to build a robust knowledge base. This methodology was then applied to the Ben Guerir mine. We believe that this methodological approach will be found useful by other industries in their effort to switch to LM.

Our next step was to construct a model based on discrete event simulation for short-term decision support of mine extraction planning. This model closely matches current extractive process operations (drilling, blasting, etc.) and takes into account all the constraints whether they be in relation to the field (geology, blocks, state of the initial system, distances, ...) or to the equipment (capacity differences, technical downtime, ...). Other considerations that we factored in include the decisions taken upstream of the chain (priority source layers, maintenance program, orders, among others). The model yields the following output: deposits blocks to be extracted in order to meet the demand defined over the planning horizon, the equipment Gantt to define the route to be taken

by each piece of equipment and the cumulative feed curves for extracted source layers. The purpose is to extract material required by the downstream blending process, while avoiding any non-value added activities, and to improve overall chain performance.
The phosphate industry needs to define the blends used to produce the ore qualities to be shipped to domestic and international customers. We have proposed a new method for optimal definition of these blends designed to replace fixed bills of materials by dynamic ones that change over time. Our "dynamic blending" model serves to define, based on available source layer stocks i) the feedings to be conveyed from the deposit to the stock and ii) the optimal quantities to be extracted from each layer while meeting the customer's quality specifications charter. The purpose of this approach is to produce the right quality, preserve the phosphate-rich layers for the future, streamline stocks and ensure a connection between the pushed upstream flow (deposit) and the pulled downstream flow (definition of blends).

Keywords: Lean Mining, open-pit mining, ASCI, scheduling, dynamic blending, modeling.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Enjeux politique, causes de multiples conflits sur la planète, le monde de la mine est aussi un terrain managérial et organisationnel particulier. Il est caractérisé par une forte variabilité des conditions d'exploitation et de la ressource à exploiter, ce qui rend la prévision et la planification difficiles à assurer. La dureté, la hauteur et/ou la profondeur des gisements, les distances lointaines à parcourir au sein des mines, les risques géologiques, la volatilité des prix du marché, l'éloignement des industries clientes, sont des facteurs qui impactent fortement la supply chain minière. Comme la demande mondiale en ressources minérales connaît une forte croissance depuis plusieurs décennies, l'industrie minière, et en particulier celle du phosphate est confrontée à maints challenges : gagner des nouveaux marchés, augmenter son profit, suivre l'accroissement de la demande, respecter les contraintes législatives et environnementales dans le cadre du développement durable. Il s'ajoute à l'évolution de l'environnement externe de la mine, l'évolution de ses conditions et ses contraintes minières internes qui poussent à revoir le processus d'exploitation. Ces contraintes se manifestent :

- Par le parc matériel utilisé dans l'exploitation minière qui est assez différent (en termes de capacité, de volume, de vitesse de déplacement, de la nature des contraintes techniques…) de celui utilisé dans les entreprises manufacturières. Les machines de production, qui elles-mêmes se déplacent vers la ressource à exploiter (le contraire de ce que l'on observe dans l'industrie manufacturière où le produit qui transite entre les machines), sont assez lourdes à faire déplacer et caractérisées par des contraintes techniques particulières. Pour cette raison, l'évolution de l'exploitation minière nécessite une adaptation périodique de ses moyens productifs (des machines plus adaptées à la nouvelle configuration de la géologie, de nouvelles méthodes d'exploitation…).
- La variabilité des caractéristiques des minerais et du terrain d'exploitation, dans le temps et dans l'espace, rend le processus de planification difficile à déterminer et à suivre. En outre, la plupart des outils de planification actuellement mobilisées sont manuels, ce qui complique la mise à jour du programme de planification. La génération automatique du programme extractif est dans ce cas souhaitable pour pouvoir s'aligner avec la variation du terrain et pouvoir par conséquent prévoir ce

qui va se passer. Nous signalons sur ce point une vraie lacune de travaux susceptibles d'aider l'industrie minière dans ce sens, parce que les modèles proposés jusqu'à présent ne reproduisent pas la réalité du processus extractif avec la granularité et la finesse souhaités pour permettre de planifier l'extraction de manière pertinente et de tester divers scénarii pouvant aider à la prise de décision dans un délai court. L'industrie minière reste réticente à l'égard de la mise en œuvre de nouvelles approches en raison du manque de méthodologie concrète à suivre pour réussir un tel projet et également d'outils permettant d'évaluer les conséquences des décisions proposées avant leur mise en œuvre sur le terrain. L'évolution technologique permettant une automatisation des méthodes utilisées ne peut qu'apporter des gains tangibles à ce secteur.

- Avec cette évolution, la chaîne logistique minière devient de plus en plus compliquée ce qui nécessite une refonte des approches traditionnelles utilisées. Dans ce contexte caractérisé par une forte interdépendance entre les maillons de la chaîne, la prise de décision à un niveau local peut avoir des impacts forts sur toute la chaîne. Une mauvaise décision prise à un endroit donné peut engendrer des conséquences néfastes subies à un autre bout de la chaîne. L'industrie minière doit forcément sortir de la logique de la prise de décision basée sur de l'expérience, parce qu'à ce moment les conditions changent ce qui implique que les approches mobilisées doivent également être changées. La plupart des entités au sein de la chaîne minière cherchent à résoudre leurs problèmes qui se posent à un niveau local, sans qu'il y ait une réelle prise en compte des impacts qui peuvent y avoir sur le reste de la chaîne logistique. Ils essayent en fait de trouver les causes des problèmes existant dans leur périmètre afin de proposer des solutions incluant également et uniquement ce périmètre. Or, les vraies causes d'un problème peuvent se situer à un autre niveau de la chaîne. Les problèmes se propagent sur plusieurs stades de la chaîne que ce soit en amont ou en aval et leurs impacts peuvent être subis également sur différents horizons temporels. Pour cette raison, il est primordial de chercher à traiter le problème à sa source et, de préférence, le plus en amont de la chaîne pour éviter toute propagation subie en aval. Il est notamment intéressant d'instaurer la logique de vision globale au sein des industries minières et de chercher à améliorer la prise de décision tout en gardant cette vision globale. Ce changement d'optique permet de contribuer fortement à l'amélioration de l'efficacité et l'efficience de l'organisation et par conséquent faire face aux enjeux rencontrés.

- La complexité de la chaîne logistique minière rend ce type d'industries réticentes à l'égard de la mise en œuvre de nouvelles approches de gestion, parce qu'elles préfèrent travailler avec les anciennes méthodes considérées comme ayant fait leurs preuves. Une concrétisation et une quantification des gains à apporter suite à la mise en œuvre d'une nouvelle approche sont le seul moyen pouvant les convaincre. Certes l'expérience passée est irremplaçable mais elle freine la prise en compte de l'évolution économique et technique du secteur minier et ignore des pistes d'amélioration permettant de réaliser des gains très importants. C'est pour cette raison que les industries minières doivent réfléchir autrement et instaurer de nouvelles méthodes organisationnelles ce qui nécessite une volonté politique et l'existence de preuves des améliorations de performance possibles. Cela reste également une affaire des chercheurs qui eux aussi doivent proposer des approches innovantes et les tester sur des études de cas réelles pour répondre aux exigences de : réduction de coûts, de délais et d'amélioration de la qualité.
- Dans un contexte aussi concurrentiel où chaque entreprise minière cherche à être pionnière dans son domaine, on observe une course à l'augmentation de la productivité et des volumes au cours de ces dernières années. Cette augmentation mène directement à une augmentation de la consommation énergétique (d'autant plus que l'industrie minière est considérée comme une grande consommatrice de l'énergie sous toutes ses formes : eau, électricité, gasoil, fuel…) et, bien évidemment, à une augmentation du minerai extrait. Dans ce contexte, des contraintes législatives et environnementales ont été instaurées pour encadrer l'activité minière, protéger les ressources naturelles non renouvelables et protéger l'environnement. Il s'ajoute à ces préoccupations, celle du développement durable, prise en compte depuis quelques décennies, afin de protéger notamment les générations futures. Il devient impératif que les entreprises minières exploitent leurs gisements dans cette perspective sous différents axes : garantir une exploitation plus économique et astucieuse de la ressource minérale, essayer de réduire l'émission en CO_2, réfléchir à « l'après mine » et ce à travers des activités de réhabilitation permettant de réutiliser la mine après son épuisement chose qui entre dans le respect de l'environnement et notamment réduire les coûts de production.

Afin de prendre compte de ces contraintes et enjeux rencontrés par l'industrie minière et améliorer son efficacité et son efficience, l'élimination des activités de non-valeur

ajoutées et le changement ou au moins l'amélioration des pratiques relevant de la tradition et de l'expérience peuvent mener à une forte amélioration de la performance minière. Pour traiter ces contraintes et enjeux rencontrés, plusieurs entreprises de différents secteurs d'activité se sont lancées dans des projets de Lean Management après que Toyota ait réussi à atteindre des résultats spectaculaires avec cette approche organisationnelle d'amélioration de l'efficacité et de l'efficience. C'est dans ce contexte que plusieurs questions se posent :

- *Question1* : Jusqu'à quel point serait-il intéressant d'appliquer ou d'adapter les principes du Lean Management aux processus extractif en garantissant à la fois leur réussite et durabilité ?
- *Question 2* : S'il est possible d'appliquer le Lean Management à l'industrie minière, comment peut-on alors l'appliquer ? Quelle est la démarche ou la méthodologie à suivre ?
- *Question 3* : Les outils du Lean Management sont-ils applicables directement à la mine ou devons-nous construire une boîte à outil qui est plus spécialisée mine ?
- *Question 4* : La réussite des approches et des méthodes du Lean Management au sein de la mine peut-elle passer par une simple application de ses outils pour résoudre des problèmes locaux ou être utilisée comme méthode d'organisation à haut niveau utilisée pour une refonte des approches traditionnelles ?

Notre thèse s'inscrit dans cette perspective et se base sur une approche globale d'amélioration et de mise en œuvre des principes du Lean Management dans le secteur minier, ce que nous qualifions de « Lean Mining Durable ». Elle consistera notamment à examiner comment les principes dérivés du juste à temps peuvent être adaptés au monde minier. Dans cette perspective, l'EMINES- *Scohool of Industrial Management*- Université Mohammed VI Polytechnique de Ben Guerir a proposé de de conduire pour avec l'Axe centre- Mine de Ben Guerir, OCP-SA (anciennement Office Chérifien des Phosphates), un programme de recherche sur le Lean Mining dans le cadre de la « Chaire OCP Lean Mining ».

Afin de ne pas tomber dans une vision très parcellaire et singulièrement faussée qui tend à réduire le Lean Management à une série d'outils destinés à améliorer les opérations sur le terrain : les cartes Kanban, la visualisation des espaces de travail, le 5S, …il est important de souligner que le **Lean Management constitue avant tout une modification profonde de la manière de travailler et des mentalités.**

En outre, comme Womack, Jones et Ross (1990) l'écrivent dans « *The Machine that changed the Worls* », le Lean Management peut s'appliquer dans des entreprises qui ne sont ni japonaises, ni dans le secteur automobile. Leur conviction est que les défis rencontrés par les managers opérationnels sont universels. Néanmoins, ces mêmes auteurs notaient que **le principe de « *transfert* » à mettre en œuvre pour adapter « l'esprit Lean » à un autre contexte industriel, suppose un important travail de réflexion basé sur une compréhension globale des opérations**.

Une approche systémique est d'autant plus importante, dans le cas de l'OCP, que sa chaîne de valeur se compose de deux activités principales, aux dynamiques industrielles différentes : l'extraction du phosphate et la transformation chimique de ce minerai. C'est pourquoi un programme de recherche collaboratif avec l'Axe Centre de l'OCP-SA a été élaboré pour appréhender les conditions d'adaptation du Lean Mangement conjointement aux opérations extractives et de transformation du minerai.

À travers ce travail, nous cherchons à définir, en partant d'une compréhension et d'une analyse approfondies du processus extractif, un problème concret complexe à résoudre en proposant des outils et les plans d'action à mener pour atteindre les objectifs souhaités. Le déroulement de cette thèse s'inscrit donc dans une démarche recherche-action. Cette dernière qui se définit comme étant une méthode de recherche dans laquelle « il y a une action délibérée de transformation de la réalité ; recherche[s] ayant un double objectif : transformer la réalité et produire des connaissances concernant ces transformations » (Hugon et Seibel, 1998). Ce qui signifie que notre apport scientifique à travers cette thèse s'appuie principalement sur une étude terrain qui nous a mené à construire une approche scientifique (méthodologique, briques logicielles, instrumentations, approches…) susceptible d'être généralisable à toutes mines à ciel ouvert. Dans cette même perspective, les principes de l'*Action Research* définis par Lewin (1946), la recherche-action pose le changement de la réalité sociale tout à la fois comme un moyen d'accès à la connaissance de celle-ci et comme une finalité en elle-même : il s'agit non seulement de produire des connaissances scientifiques sur les phénomènes sociaux mais aussi utiles à l'action sociale car « la recherche qui ne produit que des livres ne suffit pas » (Lewin, 1946).

Une analyse des travaux existants révèle que la première cause de réticence des industries minières à l'égard de la mise en œuvre de nouvelles approches est liée au manque de travaux et de méthodologie concrète et structurée. Notre recherche vise à

répondre, modestement, à ces préoccupations. Nous avons structuré cette thèse en grande partie en se basant sur les articles que nous avons publiés dont les principes et instrumentations proposés ont été majoritairement validés par des comités de lecture de revue scientifique ou de congrès internationaux.

Les enjeux scientifiques de ce travail de recherche se tournent autour de quatre points :

- **Apport méthodologique** : à partir d'une analyse approfondie du terrain minier, nous avons pu mettre en évidence l'ensemble des interactions qui existent dans la chaîne minière, puis repérer les problèmes à résoudre dans le cadre du Lean Mining Durable. Le premier point qui s'est révélé incontournable (consécutivement à notre revue de la littérature) pour mener à bien un tel projet est de proposer une méthodologie concrète et structurée de mise en œuvre du Lean Mining Durable explicitant l'ensemble des étapes à suivre et les modèles à construire pour aider la prise de décision. La méthodologie proposée, appliquée au cas de la mine à ciel ouvert de Ben Guerir pour l'extraction du phosphate, pourra constituer un exemple pour d'autres industries minières qui chercheraient à appliquer le Lean Mining Durable. Cette étude de cas illustre également les pistes d'amélioration possibles dans ce secteur.
- **Construction de briques logicielles pour l'aide à la décision :** nous proposons à travers ce travail de recherche des briques logicielles ou instrumentations pour la planification de la mine à ciel ouvert pouvant aider les responsables miniers à prendre la décision dans un délai court. Ces outils sont basés des approches simulatoires et de recherche opérationnelle, avec une granularité de la modélisation non trouvée dans la littérature. En effet, l'objectif de ces outils est de pouvoir améliorer l'efficacité et l'efficience de l'industrie minière en s'appuyant sur une modélisation fondée de la réalité (prenant compte de l'ensemble des caractéristiques de la mine) pour pouvoir par la suite prévoir l'impact de chaque décision prise n'importe où dans le reste de la chaîne. Nous pouvons dire que ces outils contribuent dans l'amélioration de la performance globale et non pas seulement locale de la chaîne et ils s'intègrent également dans l'objectif des projets de digitalisation de la mine.
- **Proposition des méthodes d'organisation industrielle :** notre travail de recherche vise également à revoir les approches et les méthodes organisationnelles

traditionnellement utilisées pour en proposer de meilleures. La complexité et la routine du travail vécues par un responsable minier ne lui laissent pas le temps de réfléchir autrement et qu'il n'est pas convaincu que l'utilisation d'une nouvelle approche sera plus performante. Dans cette perspective, nous avons réussi à changer la logique de nomenclature figée utilisée pour la constitution des mélanges en minerai et à la remplacer par des nomenclatures dynamiques. Ces dernières prennent en compte principalement la variabilité des caractéristiques des minerais extraits et de leurs disponibilités pour assurer à la fois une meilleure qualité du produit préparé et également une meilleure gestion des stocks.

- **Prise en compte de la performance énergétique :** comme nous avons cherché à répondre aux exigences de l'industrie minière au niveau de la production en cherchant à améliorer son efficacité et efficience, nous avons également pensé aux générations futures et à l'intérêt environnemental. C'est dans cette perspective que nous intégrons l'aspect du « développement durable » dans le Lean Mining. La modélisation qui est derrière les instrumentations conçues vise à garder le minerai riche en phosphate pour plus tard et donc elle cherche à consommer le minerai le moins riche maintenant pour préparer les qualités semi-finies ou finies, à extraire juste ce qui est demandé en considérant dans ce cas que la ressource minérale est rare et par conséquent de réduire la surproduction (coûts supplémentaires), à réduire les déplacements des machines et par conséquent de réduire la consommation énergétique (électricité, gasoil,…) et par conséquent l'émission des gaz à effet de serre. Il faut donc avoir une logique qui regroupe à la fois la satisfaction des exigences de production actuelles rencontrées par la mine mais sans oublier celles liées à l'environnement et aux générations futures. Nous avons travaillé sur cet aspect en se basant sur une ACP (Analyse des Composantes Principales).

Ce mémoire de thèse est structuré en cinq chapitres afin de mieux répondre aux enjeux évoqués :

- Chapitre 1. Nous présenterons dans ce chapitre une analyse du secteur minier en général, ses caractéristiques, ses enjeux et celui du phosphate en particulier. Ensuite, nous présenterons le contexte de l'industrie de phosphate de l'OCP-SA d'une façon plus précise : une cartographie globale de sa chaîne logistique, une brève présentation du gisement et des couches phosphatées qui entrent en jeu dans le

processus extractif avec ses différents stades opératoires. L'objectif de ce chapitre est de pouvoir comprendre et illustrer à travers le cas réel de la mine d'extraction de phosphate à l'OCP le degré de complexité rencontrée au sein du secteur minier pour enchaîner par la suite par une définition des problèmes que nous cherchons à résoudre.

- Chapitre 2. Pour répondre aux exigences rencontrées par l'industrie minière et améliorer son efficacité et efficience, nous allons chercher à appliquer les principes du Lean Management au secteur minier. Il est primordial qu'avant d'entamer ce projet de recherche de faire en premier lieu une revue de la littérature qui porte sur le thème du Lean Mining. Nous présenterons dans ce chapitre les résultats de cette analyse portant sur : la définition et le repérage des travaux menés au sein de la mine, l'étude de la faisabilité de mise en œuvre du Lean Management dans la mine, le degré de mise en œuvre des principes et des outils du Lean Management dans la mine. Un repérage concret des limites des travaux existant (au niveau de quatre principaux points : apport méthodologique, construction de modèle pour l'aide à la décision, proposition de nouvelles méthodes d'organisation industrielle, intégration de l'aspect énergétique dans l'approche Lean) fera l'objet de la fin de ce chapitre, auxquels nous essayerons de répondre au travers des chapitres suivants.
- Chapitre 3. Pour répondre au manque d'approche méthodologique structurée et rigoureuse pour le Lean Mining, nous proposons dans ce chapitre la méthodologie ASCI (Analyse, Spécification, Conception, Implantation) pour le Lean Mining. La méthodologie ASCI permet de construire le modèle de connaissance lors de ses deux premières phases et les briques logicielles dans les deux dernières. Cette étape va permettre de structurer la modélisation et la mise en œuvre de l'approche proposée, de décortiquer la chaîne logistique minière en des sous-systèmes, de définir les relations qui lient ces sous-systèmes et l'ensemble des rubriques/entités/clusters composant une chaîne minière. Ce chapitre permet de mettre en valeur les points que nous devons prendre compte dans toute analyse de la chaîne logistique minière, de définir les différents systèmes composant la chaîne et permettant de comprendre en détail les interdépendances existant pour justifier par la suite l'intérêt de la construction des briques logicielles et des nouvelles méthodes organisationnelles.
- Chapitre 4. Dans le cadre d'amélioration de la prise de décision nous avons proposé dans ce chapitre un modèle de planification minière pour le pilotage intégré à court

terme sur un horizon de trois mois avec une maille temporaire de quelques heures à quelques jours. Le travail mené dans ce chapitre est conçu pour assurer une meilleure prise de décision dans un délai court et dans une logique de vision globale. Il s'agit de tester divers scénarios organisationnels et mesurer par la suite leurs impacts sur la chaîne (évolution des stocks, occupation des machines…) et par conséquent prendre la meilleure décision.

- Chapitre 5. Pour pouvoir changer la logique d'approches traditionnelles, nous avons développé dans cet axe une nouvelle méthode organisationnelle nommée « blending dynamique » permettant de construire des mélanges optimaux tout en prenant compte des opportunités offertes par le processus extractif. Il s'agit à ce niveau de prouver que les nomenclatures figées précédemment utilisées peuvent être avantageusement remplacées par des nomenclatures dynamiques variant au fil du temps et en fonction des demandes clients à satisfaire et des minerais extraits du chantier. Cette approche permettra une amélioration très importante dans la chaîne minière en termes de qualité et au niveau d'une meilleure gestion de stock et des minerais,
- Nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale de ce travail avec une présentation des perspectives envisageables pour la poursuite de ce projet.

Nous avons envisagé de réalisé un manuscrit de thèse sur travaux, mais nous avons choisi finalement de recourir à un manuscrit de thèse classique. Durant cette période de thèse, nous contribué à des communications à des congrès scientifiques et à des articles publiés dans des revues scientifiques :

- Publications dans des revues internationales à comité de lecture :
    1. Azzamouri, A., Fenies, P., Fontane, F., Giard, V., (2018), Scheduling of Open-pit Phosphate Mine Extraction. *Publié dans International Journal of Production Research* (https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2018.1433341)
    2. Azzamouri, A., Essaadi, I., Elfirdoussi, S., V Giard, V., (2018), Interactive Scheduling Decision Support System: case study for fertilizer production on supply chain. *Publié dans Springer Lecture Notes in Information Systems and Organisation.*
- Publication en attente de réponse dans des revues internationales à comité de lecture :
    1. Azzamouri, A., Cheimanoff, N., Fénies, P., Fontane, F., (2018), Proposition de l'approche ASCI-LM pour la construction d'un Lean Mining Responsable

dans le contexte de l'industrie minière du phosphate. *En attente de réponse dans Logistique et Management*.

- Communications dans des congrès internationaux :
  2. Azzzamouri, A., Fenies, P., Fontane, F., (2016), Une approche pour un Lean Mining Responsable: mise en œuvre sur la chaîne logistique de l'OCP, *Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique RIRL, EPFL– Lausanne.*
  3. Azzamouri, A., Giard, V., (2018), Dynamic blending as a source of flexibility and efficiency in managing phosphate supply chain. *7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference, Lyon, France*.
  4. Azzamouri, A., Cheimanoff, N., Fénies, P., Fontane, F., (2018), Proposition de l'approche ASCI-LM pour la construction d'un Lean Mining Responsable dans le contexte de l'industrie minière du phosphate. *Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique RIRL, Paris– France*.
  5. Giard, V., Azzamouri, A., Essaadi, I., (2016), A DSS approach for heterogeneous parallel machines scheduling with due windows, processor-&-sequence-dependent setup and availability constraints. *6th International Conference on Information systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference, Bordeaux, France*.
  6. Azzamouri, A., Essaadi, I., Fénies, P., Fontane, F., Giard, V., (2016). Définition d'un Système d'Aide à la Décision d'ordonnancement des commandes sur les lignes de l'atelier d'engrais. *Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique RIRL, Lausanne, Suisse.*
  7. Azzamouri, A., Essaadi, I., Elfirdoussi, S., V Giard, V., (2017). Decision Support System for scheduling fertilizer production: Architecture and Implementation. *The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC, Toulouse, France.*
  8. Azzamouri, A., Essaadi, I., Elfirdoussi, S., V Giard, V., (2017). Système Interactif d'Aide à la Décision d'ordonnancement de la production : une application à la production d'engrais dans une chaîne logistique. *Information and Communication Technologies in Organizations and Society ICTO, Paris, France.*

CHAPITRE 1

ÉTUDE DE DOMAINE : LE SECTEUR MINIER

1 INTRODUCTION

Le secteur minier représente un secteur d'activité hautement stratégique pour l'économie marocaine et contribue fortement dans le développement socio-économique. La demande mondiale en ressource minérale connaît en forte croissante durant les dernières décennies (l'accroissement de la population, le développement industriel…) ce qui a poussé à l'apparition de nouvelles industries dans ce secteur qui cherche à découvrir de nouvelles mines. Cette nouvelle configuration a créé un environnement très compétitif dans ce secteur, où les anciens acteurs cohabitent avec des nouveaux entrants qui cherchent à prendre leur part de marché.

L'une des meilleures façons (la seule ?) d'affronter la concurrence dans le domaine minier est de chercher à augmenter la part de marché et ce à travers une réduction des coûts en suivant la stratégie de domination par les coûts (Porter 1999). Pour réussir à atteindre cet objectif, il est nécessaire de réfléchir à chercher à réduire les charges de l'entreprise et les activités qui n'ont aucune valeur ajoutée pour pouvoir ainsi éliminer tous les gaspillages à travers la chaîne.

Partant de ce constat, la problématique qui sous-tend le développement de cette thèse met l'accent sur la recherche d'amélioration de l'efficacité et l'efficience de l'industrie minière à travers la mise en œuvre de l'approche Lean Mining qui est une extension du Lean Management. On aurait pu imaginer de mettre en œuvre l'approche traditionnelle du Lean Management mais l'industrie minière possède des caractéristiques tellement différentes de celle de l'industrie manufacturière pour laquelle le Lean Management a été mis au point : matière première à extraire dans un environnement changeant, processus de traitement chimique propre à chaque gisement, gammes de fabrication, nature des flux…

Nous chercherons à travers ce premier chapitre de thèse à mettre en lumière l'importance et les activités de l'industrie minière en général (§2) et l'industrie de phosphate en particulier (§3). Par la suite, nous avons trouvé qu'il est plus intéressant de commencer par une explication du processus extractif afin de mieux comprendre la complexité rencontrée au sein de ce secteur à travers le cas de l'industrie d'extraction de phosphate de l'OCP-SA. Pour mener à bien un travail de recherche au sein de la mine, il nous a semblé judicieux de commencer par une étude du terrain et de l'ensemble des interdépendances qui existent pour pouvoir par la suite détecter et formaliser les

problèmes organisationnels (§4). Ensuite, nous présenterons le cahier des charges initialement défini dans le cadre de cette thèse (§5) avant de conclure (§6).

2 CARACTÉRISTIQUES ET PLACE DU SECTEUR MINIER DANS L'ÉCONOMIE MONDIALE

2.1 Caractéristiques du secteur minier en général

Traditionnellement les Sciences Economiques partagent les activités créatrices de richesses en trois secteurs :

- Secteur primaire ; incluant toutes les activités produisant des matières premières non transformées. Nous définissons dans ce sens les activités liées à l'exploitation de ressources naturelles : agriculture, pêche et activités minières ;
- Secteur secondaire ; inclue les industries de transformation des matières premières issues du secteur primaire (aéronautique, raffinerie, industrie de bois…) ;
- Secteur tertiaire ; regroupe les industries de service (assurance, administration, conseil…).

Le secteur primaire peut être vu comme étant le secteur qui se situe en amont de tout système productif (qui assure une certaine transformation des inputs en des outputs précis). L'objet de ce secteur est d'exploiter le précieux « capital naturel » de la planète : les ressources « épuisables », comme les minerais, et les ressources « renouvelables », comme les sols fertiles, les forêts, l'énergie des chutes d'eau, solaire, éolienne. Il transforme ces ressources naturelles en « commodités », c'est-à-dire en un petit nombre de produits standardisés qui font l'objet d'un commerce mondial : pétrole, gaz, charbon…, métaux et minerais non métalliques comme le phosphate…, et des produits tropicaux comme le café et le cacao, coton et laine, bois… (Giraud 2017).

C'est dans ce contexte de développement économique des pays émergents qu'il s'avère nécessaire de mettre en lumière le développement de l'industrie minière pour assurer une exploitation plus responsable des minerais tout en prenant compte à la fois de la richesse et de la diversité des ressources minières d'une part, et d'autre part, de la rareté de certains minerais due à leurs exploitations excessives et leur caractère indispensable à la vie de l'homme.

Les minerais prennent une partie importante de l'ensemble des consommations quotidiennes, voitures, téléphones portables, bijoux, alimentation… et nos besoins ne

cessent d'augmenter. Ainsi, la demande en ressources minérales devient de plus en plus importante avec l'accroissance de la population mondiale se traduisant par une augmentation de la production minière. Cette augmentation de la production ne peut aboutir d'une façon systématique parce que les caractéristiques des mines varient au fil du temps et imposent des contraintes qui peuvent empêcher le déroulement normal du processus extractif et l'atteinte des objectifs souhaités (Commission Justice et Paix 2012). Il s'agit en effet des questions d'accessibilité au minerai (capacités et caractéristiques des machines mobilisées, de la nature géologique du terrain, …), de coûts d'exploitation, de traitement et de transport qui s'élèvent au fur et à mesure que la profondeur et la distance d'exploitation (avec l'évolution du gisement) augmentent. Alors les préoccupations de l'industrie minière pour un meilleur développement ne s'éloigneront pas du traitement des aspects cités précédemment, tout en donnant la priorité aux améliorations des processus d'extraction et la réduction des coûts correspondants par rapport à la rareté du minerai (Commission Justice et Paix 2012).

2.2 Place du secteur minier dans l'économie nationale et internationale

Les ressources minérales consistent en un ensemble de minéraux naturels utilisés pour leurs propriétés physiques ou chimiques naturelles. Les ressources minières sont essentiellement non renouvelables, car la constitution des gisements se produit sur une durée de milliers ou de millions d'années, évidemment bien supérieure à celle de l'extraction par l'homme du minerai d'un gisement (Goffé 2013). La position qu'occupe l'industrie minière s'explique principalement par la variété de la nature géologique des terrains exploités, dont les couches appartiennent à tous les âges et à toutes les époques géologiques, puis la succession de cycles orogéniques allant du Précambrien au Tertiaire, ce qui a donné naissance à plusieurs types de gisements tels que :

- phosphates, Plomb/Zinc, Cuivre, Argent, Or ;
- autres substances minérales : Manganèse, antimoine, cobalt, fer, tungstène, molybdène, étain, strontium… ;
- roches et minéraux industriels : fluorine, barytine, sel gemme, bentonite, gypse, perlite, kaolin, feldspath, argiles réfractaires, diatomite, sables siliceux, andalousite, soufre… ;
- combustibles solides : Anthracite, Schistes bitumineux.

La nature géologique diversifiée a déclenché le développement de l'activité minière, à l'échelle artisanale, puis industrielle moderne au début du siècle dernier, après l'amélioration des moyens et techniques utilisées et la prise de conscience des pays de l'importance et de l'impact d'un tel secteur sur sa croissance économique et social. La réglementation de l'activité minière représente un pas important dans la structuration de ce secteur. Le Maroc a été parmi les premiers pays au monde qui ont réglementé l'activité minière. Ceci s'est traduit en 1914 par un Dahir minier, suivi, en 1920, par la création d'un Service Géologique et de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP) puis, en 1928 par la création du Bureau de Recherches et de Participations Minières (BRPM).

2.3 L'exploitation souterraine versus celle à ciel ouvert

L'activité d'exploitation d'une mine commence par une étude géologique et une évaluation économique du gisement. Après une phase d'exploration prouvant l'existence d'un gisement avec des quantités suffisantes et des teneurs importantes, la planification pour le développement d'un projet d'extraction de la ressource commence. Il existe deux types d'exploitation qui se définissent selon la profondeur du terrain à exploiter.

- L'exploitation souterraine consiste à exploiter le minerai depuis une excavation créée sous la surface du sol, sans avoir à enlever l'ensemble des matériaux stériles qui le surmontent mais uniquement une quantité minimale qui permettra de placer les infrastructures nécessaires (l'aération, l'exhaure, l'accès du personnel et l'évacuation du minerai) pour accéder au gisement (Poulard *et al.* 2017).
- L'exploitation à ciel ouvert (*Open pit mine* en anglais) concerne l'exploitation de parties du gisement proches de la surface topographique (typiquement entre 0 et 400 m de profondeur) nécessitant l'enlèvement des couches superposées de morts terrains (matériaux stériles) et de minerai (Poulard *et al.* 2017). On distingue deux types d'exploitation à ciel ouvert :
    - Le premier nommé « en découverte », est un enchaînement cyclique d'opérations liées principalement à l'extraction et l'évacuation du minerai, cette méthode s'applique aux gisements stratiformes, peu profonds et s'étendant horizontalement le long de la surface traitée. Ceci consiste en une création d'une tranchée ouverte qui peut s'élargir progressivement, dans le recouvrement stérile sur la surface à exploiter jusqu'à atteindre la découverture (la surface de minéralisation),

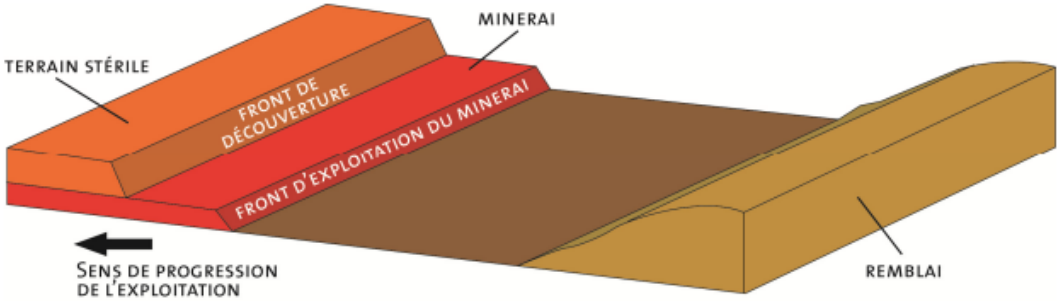


Figure 1. Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en découverte (Poulard *et al.* 2017).

- Le deuxième, nommé « en fosse », est consacré aux filons, aux couches fortement pentues et aux amas. Cette méthode consiste à vider le stérile et le stocker en dehors de la fosse et à traiter le volume entier du cône constituant la fosse. L'étalement dans le sous-sol du gisement traité est peu latéral ; une pente d'entre 30° et 75° d'excavation est assuré normalement selon la succession de gradins et de banquettes et la nature de la roche, avec des profondeurs importantes allant de quelques hectomètres à quelques kilomètres. Le maintien de cette pente demeure toujours difficile, compte tenu des diverses contraintes liées principalement à l'hétérogénéité et la fracturation des massifs rocheux traversés. Le taux de découverture s'accroît très vite avec la profondeur, ce qui limite l'intérêt économique de la méthode.

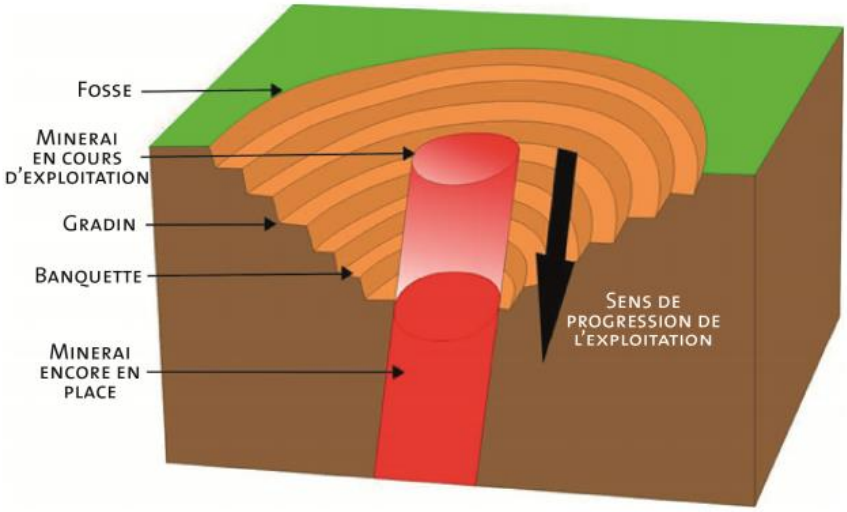


Figure 2.Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en fosse (Poulard *et al.* 2017).

2.4 Les défis du secteur minier

La Banque mondiale (2013), qui depuis 1988 a soutenu 41 projets de réforme du secteur minier dans 24 pays, annonce que les pays peuvent attirer l'investissement privé dans

l'exploration et la production minières s'ils se dotent d'une législation moderne et offrent un cadre propice à cette exploration. Ceci favorise l'augmentation des recettes fiscales, des revenus d'exportation, des possibilités d'emploi, ainsi que le développement des infrastructures, notamment dans les zones rurales, et le transfert de technologie aux pays hôtes. Toutefois, l'extraction des ressources minières n'est pas sans risque et les pays en développement doivent veiller à ce que ce secteur prometteur ne se transforme pas en une « enclave » socio-économique et ne nuise pas à l'environnement. Ces risques soulèvent l'importance des aspects sociaux et environnementaux liés à l'exploitation minière et requièrent des garanties de bonne gouvernance et de transparence.

Un consensus s'opère pour affirmer que la demande mondiale en ressources minérales, comme celle du phosphate sera extrêmement soutenue dans les décennies à venir. Les scénarios de Tenkorang et Lowenberg-DeBoer (2009) et ceux de Drescher *et al.* (2011), reposent sur des modèles économétriques de traitement des données de la FAO (Food and Agriculture Organisation) (Giraud 2017), ils évaluent les besoins de NPK entre 2005 et 2030 ainsi que le taux de croissance entre ces deux dates ; la demande continuera à croître dans les années à venir en raison du dynamisme de développement de nouveaux pays industrialisés. Pour autant, ce secteur doit faire face à de nombreux défis :

- La volatilité des prix (Amundson *et al*. 2015) soulignent comment la croissance de la demande de phosphate dans le monde au cours des cinquante dernières années a fait grimper le prix de la tonne de roche, lequel est passé de 80 dollars US en 1961 à un maximum de 450 dollars en 2008 pour redescendre en 2014 vers 115 dollars (103 dollars en 2018). Fitch Ratings (2017) (une agence de notation financière internationale) estime que les prix de la tonne de roche de phosphate (sans frais à bord) atteindront 105 dollars en 2019 et 110 dollars sur le long terme. Le cas du potassium est identique ; actuellement la tonne est vendue à environ 700 dollars contre 875 dollars en 2009, mais devrait atteindre les 1 500 dollars en 2020) sur le marché des « commodités » et l'intense compétition qui en résulte conduisent les compagnies minières à devoir améliorer sans cesse leur efficacité.
- La santé et la sécurité des employés ;
- L'impact des opérations minières sur tous les aspects environnementaux ;
- L'intensité capitalistique des « moyens de production » nécessaires aux opérations suppose une disponibilité accrue de ces moyens. En général, le caractère

capitalistique de l'industrie minière s'apprécie par le rapport investissement initial / chiffre d'affaires annuel dont la moyenne se situe entre trois et quatre, contre un rapport de un environ pour l'industrie manufacturière. Pour les mines, cette intensité capitalistique s'explique, d'une part, par l'utilisation intensive de technologies avancées et par la mécanisation des procédés d'extraction et de traitement, et d'autre part, par le coût élevé des infrastructures d'accompagnement : routes, chemins de fer, ports, réseau d'électricité, conduites d'eau, agglomérations minières, centrales électriques… Ajoutons à cela les investissements de lutte contre les pollutions et les risques du travail ;

- Le déploiement de nouvelles technologies sur toute la chaîne, allant de l'exploration minérale aux opérations de distribution ;
- La volonté de « remonter » dans la chaîne de valeur et de produire du service aux clients et aux consommateurs finaux.

3 LE SECTEUR MINIER DU PHOSPHATE

Le phosphate naturel (PN) désigne le produit issu de l'exploitation et du traitement métallurgique ultérieur des minerais contenant du phosphore. Les PN peuvent être utilisés soit en tant que matières premières pour la fabrication industrielle des engrais phosphatés solubles, soit comme sources de phosphore pour l'application directe en agriculture.

L'industrie mondiale des phosphates est basée sur l'exploitation commerciale de certains gisements de PN. Malgré leur composition extrêmement variable, les PN sont la source commerciale de phosphore utilisée comme matière première pour la fabrication des engrais phosphatés et de certains autres produits chimiques. À la différence d'autres produits essentiels, tels que le fer, le cuivre (Cu) et le soufre (S), il y a peu de chance de trouver une forme de substitution ou de recyclage. Le phosphate est au second rang (charbon et hydrocarbures exceptés) en termes de tonnage et de volume bruts dans le commerce international (FAO[1]).

Le PN est également utilisé à des fins industrielles et pour la production de compléments alimentaires pour animaux et de produits alimentaires. Une autre

[1] http://www.fao.org

utilisation importante est la fabrication de phosphore élémentaire et de ses dérivés, en particulier le tripolyphosphate de sodium, un composant important des détergents puissants de blanchisserie (Hammond et Day, 1992; UNIDO et IFDC, 1998).

La teneur en phosphate du PN (ou grade) est par convention exprimée en pentoxyde de phosphore (P_2O_5). Dans certains gisements commerciaux de qualité inférieure, cette teneur peut n'être que de 4 pour cent. Dans l'industrie des phosphates, la teneur en phosphate du PN est habituellement exprimée en tant que phosphate tricalcique et traditionnellement désignée sous le nom de BPL (Bone Phosphate Lime = phosphate de chaux des os: P_2O_5 x 2,1853 = BPL). Ce terme rappelle l'époque où les os étaient la source principale de phosphate dans l'industrie des engrais. Les fabricants d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés demandent normalement une teneur minimum de 28 pour cent de P_2O_5, et la plupart des catégories de PN commercialisées contiennent plus de 30 pour cent de P_2O_5 (65 pour cent de BPL) (FAO[2]).

Les phosphates présentent des caractéristiques chimiques qui en font une matière première de plusieurs produits, notamment pour l'agriculture et les détergents. Le phosphate est une composante essentielle de toutes les cellules vivantes (sous forme organique ou minérale) (Encyclopédie de l'environnement 2018). Dans la structure des êtres vivants, les groupes phosphate sont des éléments de la chaîne composant les hélices de l'ADN (Source Wikipédia).

Le phosphore (symbole P dans le tableau périodique des éléments) est un sel minéral abondant dans l'organisme humain : le corps d'un adulte en contient environ 700 g. Il se trouve principalement sous forme de phosphates de calcium, de sodium ou de potassium. Environ 85 % du phosphore de l'organisme est situé au niveau des os et des dents, dont il assure la solidité, associé à du calcium (Daine 2016).

Le phosphate qu'on trouve dans la nature a pour source essentiellement :

- Les phosphates minéraux ; ce sont les plus connus et ils sont principalement utilisés dans la fabrication de l'acide phosphorique et des engrais, des détergents, de l'alimentation animale, du traitement des métaux, des plastifiants et des additifs pour essences et lubrifiants ;
- Les os contenant 50 à 70 % de [$Ca_3(PO_4)_2$] (le calcium des phosphates), lesquels sont utilisés dans l'industrie de la colle et de la gélatine.

---

[2] http://www.fao.org/docrep/007/y5053f/y5053f05.htm#TopOfPage

L'IFA (International Fertilizers Association) estime à 82 % la part du phosphate brut utilisé sous forme d'engrais et à 18 % le reste des usages. Giraud (2017) défini deux grandes catégories des multiples applications des phosphates, hors engrais :

- Des productions traditionnelles de faible valeur ajoutée mais de forts tonnages : les détergents où l'élément P (Phosphore) entre dans des molécules tensioactives ; les phosphates utilisés dans les industries des aliments pour animaux, agroalimentaires et pharmaceutiques, où ils apportent l'élément P, un élément de base de la cellule vivante,
- Des productions de forte valeur ajoutée, correspondant à de plus faibles tonnages, utilisées dans des domaines d'activité très variés : l'optique (luminophores, lasers, doubleurs de fréquence), l'électrochimie avec la percée récente et remarquable du phosphate $LiFePO_4$, la catalyse (zéolithes), les biomatériaux, les matériaux de stockage des éléments radioactifs ou lourds, les retardateurs de flamme, etc.

Le phosphate existe presque partout sur la surface de la terre mais il n'est pas régulièrement réparti, ce qui fait que seuls quelques gisements sont exploités. Les zones phosphatées peuvent être catégorisées comme suit (Bonnet 2011) :

- **Les gisements d'origine magmatique dits ignés** ; sont les moins nombreux et fournissent environ 12% de la production mondiale des concentrés ;
- **Les gisements sédimentaires** ; représentent la plus grande partie des réserves mondiales. Ils appartiennent à différentes époques géologiques ;
- **Les gisements de type « guano »** ; sont superficiels, sous l'influence des pluies, l'acide phosphorique des excréments des oiseaux attaques les calcaires sous-jacents et forme des dépôts de phosphate de calcium. Les réserves de ce type sont presque épuisées ou ne sont pas exploitées pour des raisons environnementales ;
- **Des phosphorites** ; constituées de nodules de dimensions très variables, sont trouvées le long de certaines côtes sur le plateau continental. Elles sont très peu exploitées actuellement.

3.1 Distribution des minerais phosphatés dans le globe terrestre

Le « Phosphate naturel » est un terme générique qui décrit les assemblages minéraux naturels contenant une concentration élevée de minéraux phosphatés. Le terme se

rapporte aussi bien aux minerais phosphatés non enrichis qu'aux produits concentrés (FAO, Les gisements de phosphates dans le monde).

Les gisements sédimentaires ont fourni environ 80 à 90 % de la production mondiale des dix dernières années. Ils se trouvent dans des formations d'âges géologiques très différentes, montrent une gamme très large de compositions chimiques et de formes physiques, se trouvent souvent en couches épaisses relativement horizontales et peuvent être sur des terrains de recouvrement peu profonds. Les gisements sédimentaires qui représentent la majeure partie de la production mondiale de phosphate naturel sont situés au Maroc et dans d'autres pays africains, aux États-Unis, au Proche-Orient et en Chine (FAO, Les gisements de phosphates dans le monde).

Les gisements ignés (par opposition à sédimentaires) ont fourni environ 10 à 20 % de la production mondiale des dix dernières années. Ils sont exploités dans la Fédération de Russie, au Canada, en Afrique du Sud, au Brésil, en Finlande et au Zimbabwe, mais se trouvent également en Ouganda, au Malawi, au Sri Lanka et en plusieurs autres pays (FAO, Les gisements de phosphates dans le monde).

3.2 Le phosphate au Maroc

Le Centre international de développement des engrais (IFDC) a annoncé que les réserves mondiales sont évaluées à 60Gt, la grande majorité d'entre elles, 51 Gt étaient situés au Maroc (Van Kauwenbergh *et al.* 2013).

Sur la base d'un flux de consommation statique de l'ordre de 200 MT de phosphate brut par an, le rapport de l'IFDC affirme que les réserves représenteraient désormais trois cents ans de consommation.

En 2011, l'USGS (*United States Geological Survey*, littéralement « Institut d'études géologiques des États-Unis ») a entériné les résultats du rapport de l'IFDC de 2010 et réévalué ses propres estimations de réserves à 69 Gt. Les ressources, qui n'avaient pas été publiées par l'USGS depuis de nombreuses années ont été évaluées à 300 Gt (Giraud 2017 ; Edixhoven *et al.* 2013).

Le Tableau 1 montre la répartition des réserves par pays (Giraud 2017).

Tableau 1. Répartition par pays de la production et des réserves de phosphates en 2015 (en million de tonnes) (Giraud 2017).

Pays	Production 2015	Réserves	Pays	Production 2015	Réserves
Afrique du sud	2,2	1 500	Kazakhstan	1,6	260
Algérie	1,2	2 200	Mexique	1,7	30
Australie	2,6	1 000	Maroc	30	50000
Arabie saoudite	3,3	960	Pérou	4	820
Brésil	7,6	320	Russie	12,5	1 300
Chine	100	3 700	Sénégal	1	50
Égypte	5,5	1 200	Syrie	0,75	1 800
États-Unis	27,6	1 100	Togo	1	30
Inde	1,1	65	Tunisie	4	100
Irak	2	430	Vietnam	2,7	30
Israël	3,3	130	Autres	2,7	380
Jordanie	7,15	1 300			

À partir de ce tableau, nous pouvons constater que le Maroc détient 72 % des réserves mondiales, avec 50 Gt. Selon les données de l'OCP, ces réserves sont situées dans les bassins de Khouribga (43 % des réserves exploitées par les mines de Khouribga), de Gantour (37 % des réserves, exploitées par les mines de Ben Guerir et Youssoufia), de Meskala (18 % des réserves, situées entre Marrakech et Essaouira, non encore exploitées) et pour moins de 2 % dans le bassin de Boucraa, au sud du pays. Les réserves marocaines représentent 1 666 années de la production de roche de l'OCP en 2015 (30 MT) et le Maroc détient à lui seul 224 ans de la production mondiale de 2015 (223 MT) (Giraud 2017).

Le Maroc est suivi par la Chine, avec 3,7 Gt, soit 37 ans seulement de sa propre production annuelle (100 MT en 2015) et 16 ans de la production mondiale, ainsi par un ensemble de cinq pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient : Algérie, Syrie, Jordanie, Arabie saoudite, Égypte, qui, à ceux cinq, totalise 6,5 Gt de réserves, pour une production qui était en 2015 de plus de la moitié de celle du Maroc, à 17,5 MT. Ces 6,5 Gt de réserves représentent 370 ans de leur production 2015 et 29 ans de la production mondiale (Giraud 2017) (Figure 3).

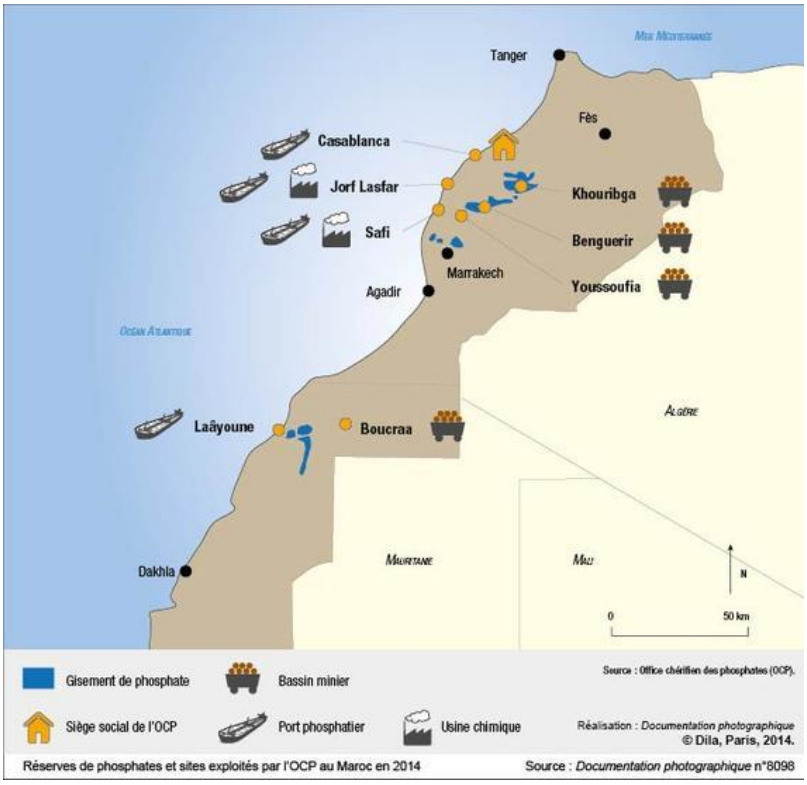


Figure 3. Réserves de phosphate et sites exploités par l'OCP au Maroc.

Des réserves aussi importantes que celles du Maroc nous mènent à réfléchir sur la nécessité de garantir une gestion durable de cette ressource non renouvelable pour assurer une pérennité de la place qu'occupe le Maroc dans ce sens à l'échelle internationale, de jouer sur la minimisation des coûts d'extraction (à travers des travaux d'amélioration du processus extractif et e traitement suite à une élimination des activités de non-valeur ajoutées à travers la chaîne) pour pouvoir gagner en termes de marge bénéficiaire et de conduire à l'exercice d'un pouvoir de marché appliqué par le producteur marocain, l'OCP.

4 INDUSTRIE D'EXTRACTION DU PHOSPHATE DE L'OCP SA

4.1 Présentation de l'OCP-SA

OCP-SA détient un tiers des parts du marché mondial de l'exportation de phosphate sous toutes ses formes. Elle est caractérisée par un enchaînement d'entités productives intégrées partant de l'extraction de minerai de phosphate et allant jusqu'à la livraison au client final en acide phosphorique et engrais. OCP est le premier producteur et exportateur mondial de phosphate sous toutes formes. Il est aussi l'un des plus grands

producteurs d'engrais au monde. La chaîne logistique de l'OCP est composée de quatre sites miniers et deux complexes chimiques qui se répartissent sur trois axes : axe nord, axe centre et axe sud. Le travail présenté par la suite est développé au sein de l'axe centre. Le processus d'extraction au sein de l'OCP se fait à ciel ouvert des couches du phosphate à caractère sédimentaire.

4.2 Cartographie globale de la chaîne logistique de l'OCP Axe centre

La chaîne logistique de l'OCP axe centre est composée de :

- Trois mines : Ben Guerir, M'Zinda et Bouchane. La mine de Ben Guerir est la plus grande en termes de surface et de quantité de minerai expédié.
- Site de Youssoufia : ce site se focalise sur le traitement du minerai extrait. Il est composé de trois entités :
  - entité de lavage et de flottation,
  - entité de séchage,
  - entité de calcination.
- Site de Safi : est spécialisé dans le traitement chimique et la production des engrais.

La Figure 4 représente un schéma simplifié des flux de la supply chain de l'OCP sur axe centre.

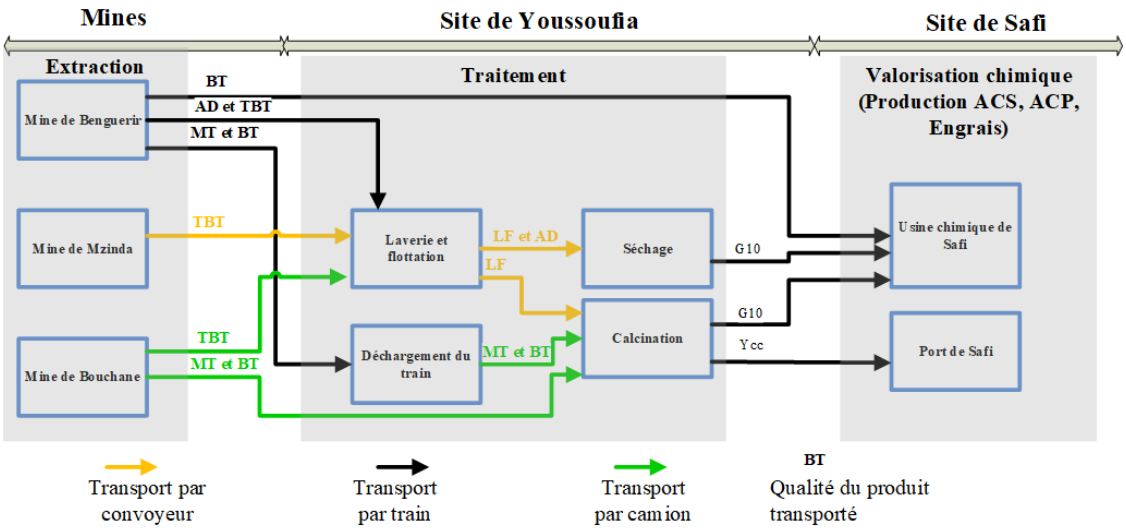


Figure 4. Cartographie macroscopique de la chaîne logistique de l'OCP Axe centre.

4.3 Découpage des panneaux et les couches phosphatées au sein de la mine de Ben Guerir à OCP-SA

Le gisement de Ben Guerir constitue la partie centrale du bassin de Gantour. Les estimations des réserves de la mine de Ben Guerir s'élèvent à 1,744 milliard de mètres cubes. Avec la cadence actuelle de production, ces réserves vont assurer une exploitation d'au moins trois siècles. De nature sédimentaire, ce gisement consiste en une alternance de couches de phosphate et d'intercalaires de stérile (le niveau non exploitable, il est considéré comme sans valeur économique, qui sépare deux couches phosphatées).

Le gisement d'exploitation de Ben Guerir est divisé en huit panneaux (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8) dont les dimensions sont un peu différentes d'un panneau à l'autre (par exemple : le panneau N°8 a presque 1,5 km de largeur et 5 km de longueur). Chaque panneau est découpé en tranchées parallèles orientées Nord–Sud et subdivisé en cases de 100 m de longueur et de 40 m de largeur, à l'exception du panneau 6 qui est orienté Est-Ouest. Le panneau 1 est exploité dans sa totalité et le panneau 8 n'est pas encore commencé. La Figure 5 présente le découpage des panneaux de la zone de Ben Guerir.

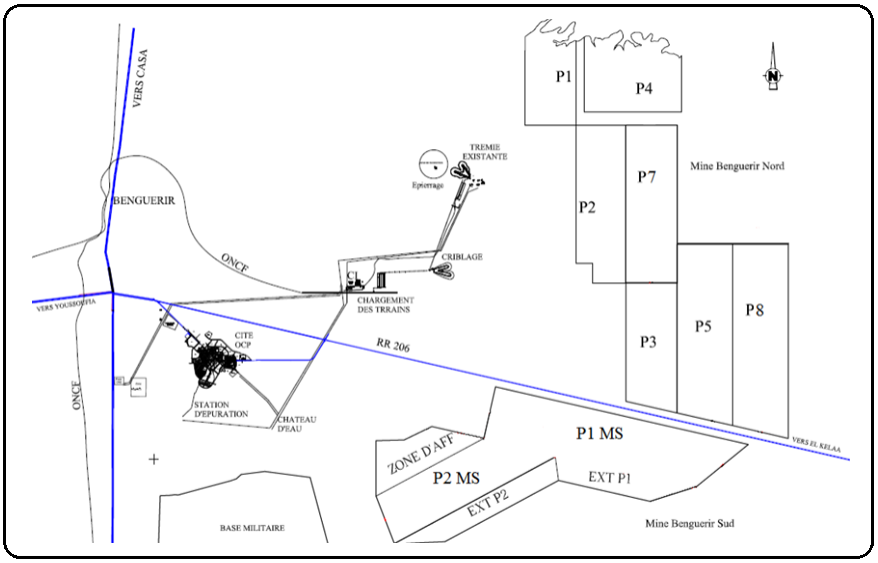


Figure 5. Découpage des panneaux au sein de la mine de Ben Guerir.

L'extraction concerne six couches de phosphate et les sillons B, A2 et X. Leurs caractéristiques physico-chimiques sont différentes selon la position stratigraphique et géographique de la couche. L'ensemble de ces couches phosphatées peuvent ne pas être toutes présentes dans un endroit à exploiter, c'est-à-dire qu'il est possible de signaler l'absence d'une ou de plusieurs couches phosphatées et d'intercalaire de stérile lors de l'extraction.

L'étude géologique a été effectuée à partir des puits qui représentent des ouvrages de prospection. Ces puits ont été implantés d'une manière régulière à une maille carrée de 250 m ou 500 m, de sorte à limiter le gisement. Suite à l'interpolation linéaire une caractérisation par case est faite pour définir plus précisément les niveaux existants ainsi que leurs compositions chimiques.

Les différentes couches sont destinées à être mélangées pour constituer les qualités demandées par les clients. Nous distinguons le profil BG (standard et Tessenderlo, ces deux qualités étant envoyées vers Safi pour la production d'acides, puis les qualités suivantes : le standard calciné, l'export, l'AD et le BG Lavé qui sont destinées à Youssoufia pour le traitement aqueux. Chaque qualité a ses propres exigences définies par la charte client en termes de : BPL, CO_2, MgO, S_iO_2, Cd, parfois même la solubilité citrique et formique.

4.4 Méthode d'exploitation au sein de la mine de Ben Guerir à OCP-SA

L'exploitation à Ben Guerir se fait à ciel ouvert. La méthode d'exploitation actuelle est une méthode sélective de récupération des couches de phosphate : le recouvrement stérile, après avoir été foré et sauté, est décapé au moyen de Draglines et de Bulldozers D11. Ensuite, on procède au Défruitage qui consiste à gerber et charger le phosphate pour le transporter via des camions. Ces opérations se répètent jusqu'à l'exploitation de tous les niveaux. Nous présenterons, dans la Figure 6, un aperçu global du processus d'extraction suivi au sein de la mine de Ben Guerir.

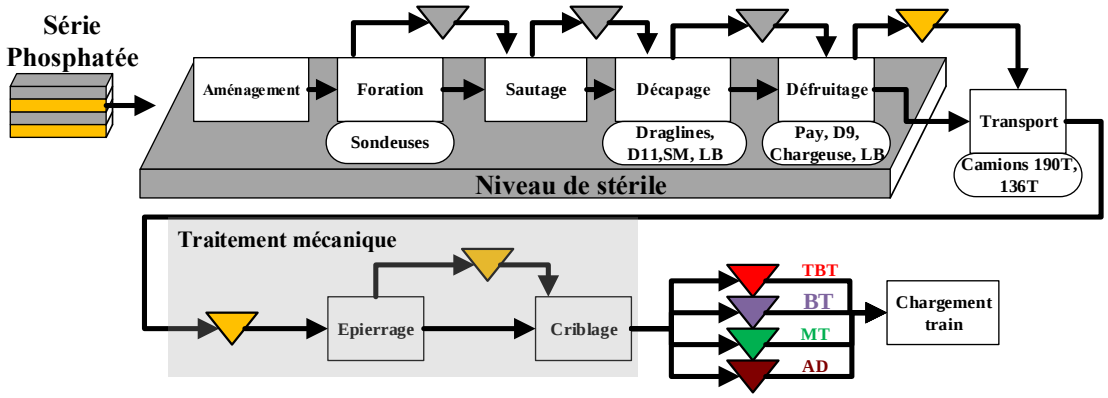


Figure 6. Description du processus global de la mine de Ben Guerir.

Le processus global au sein de la mine de Ben Guerir peut être divisé en deux parties : 1) la partie amont concerne l'extraction du phosphate incluant l'ensemble des

stades opératoires ; cette partie peut être considérée comme à flux poussé : les contraintes et les caractéristiques du gisement font que parfois on est obligé d'extraire des couches sources qui ne sont pas consommées rapidement ; 2) la partie aval concerne le traitement mécanique (épierrage et criblage) puis la constitution des qualités marchandes à partir des couches sources extraites. Cette partie est basée principalement sur la commande client. C'est pour cette raison que nous qualifions la partie aval de flux tiré (Figure 7). Il existe un point de découplage fort entre la partie amont et la partie avale dont sa gestion n'est pas facilement manipulable à cause d'un manque d'une approche méthodologique permettant de mieux gérer le couplage entre le flux poussé et le flux tiré. C'est pour cette raison qu'une réflexion approfondie est à mener afin de pouvoir proposer de approches permettant de gérer et de garantir une certaine cohérence entre ces deux parties de la chaîne, en prenant compte des interdépendances qui existent.

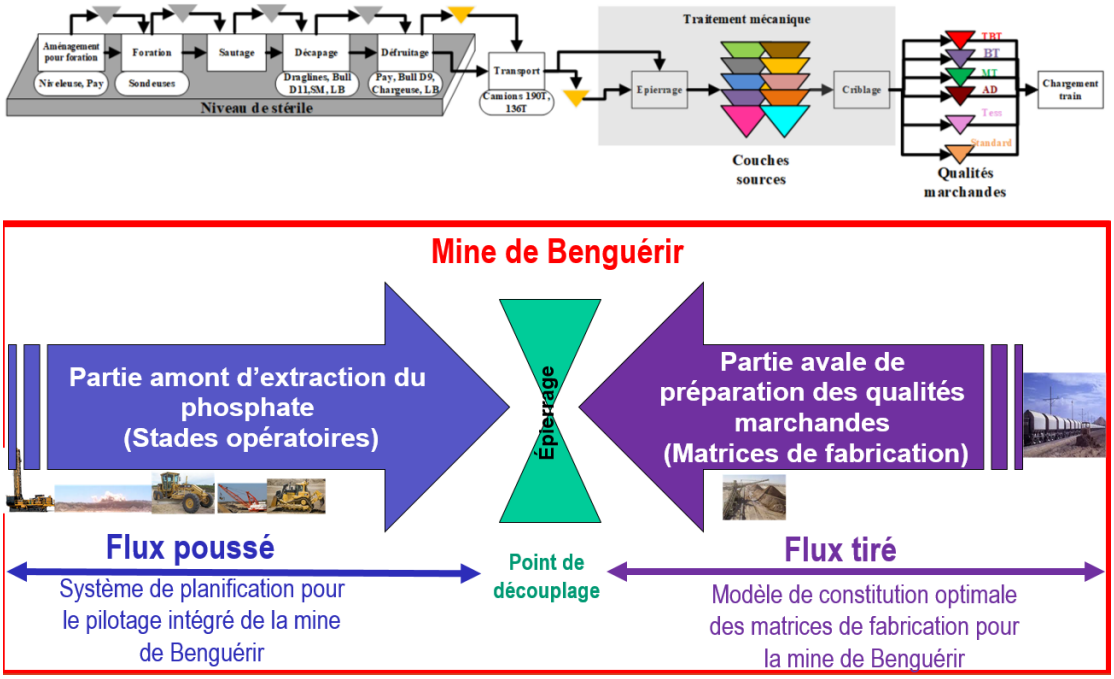


Figure 7. Confrontation entre flux poussé et tiré au sein de la mine de Ben Guerir.

Le processus extractif du phosphate se base sur les stades opératoires/opérations élémentaires suivantes :

- Aménagement du terrain,
- Foration,
- Sautage,
- Décapage,
- Défruitage,
- Transport,

- Installations fixes.

4.4.1 Aménagement du terrain

Cette phase est une étape préparatoire du terrain pour les étapes à venir. Elle consiste en premier lieu à faire l'opération du surfaçage qui a comme objectif d'enlever tous les éléments indésirables ou les obstacles existant sur la terre et de rendre la surface du terrain plus appropriée pour le déplacement de la machine qui va travailler dans cette zone. Cette étape inclut également la construction des pistes qui sont de deux types :

- **Pistes principales :** ce sont des pistes de roulage (Stots 1, 2, 3, 4, 5),
- **Pistes secondaires :** ce sont des pistes ou des accès provisoires pour faciliter l'entrée ou la sortie des machines.

Cette étape est assurée par un parc d'équipement constitué de (Figure 8) :

- 3 niveleuses (KOMATSU 5, KOMATSU 6, Caterpillar 140) mais la plupart du temps deux sont disponibles et une en maintenance.
- 2 Paydozer KOMATSU (sont partagés entre le processus d'aménagement et le défruitage),
- 1 Bull D9 ou D11,

Figure 8. Équipements d'aménagement : Niveleuse, Paydozer, Bulldozer D11 et D9.

4.4.2 Foration

La foration est un maillon dans la chaîne d'extraction. Elle consiste à confectionner des trous dans le sol pour y loger l'explosif. Il s'agit d'assurer la pénétration d'un outil dans le sol, appelé tricône, monté au bout d'une tige de 13m, et de le relever une fois la profondeur désirée est atteinte. La pénétration dans le sol est assurée par une pression hydraulique appelée « fonçage ». Par ailleurs, la maille de foration, le diamètre des trous et le fonçage dépendent de la nature du terrain. L'opération de la foration est assurée par des sondeuses (Figure 9) destinées pour le forage des trous verticaux dans le sol, disposés d'une façon bien déterminée, de telle sorte que l'on puisse utiliser des charges d'explosif

pour sauter le terrain et le rendre facile à décaper. Le parc matériel de l'OCP dispose de 4 sondeuses :

- 1 PV1 est une machine consommatrice d'électricité,
- 1 SKF Caterpillar qui consomme du Gasoil,
- 1 DKS Sindvik consommatrice du Gasoil,
- 1 45R consommatrice d'électricité.

Figure 9. Équipement de Foration : Sondeuses PV1, SKF, DKS.

4.4.3 Sautage

Cette étape a comme objectif la fragmentation du terrain par des charges explosives (dynamite posée dans les trous) des morts-terrains (couches inutiles de terrain) suivant une granulation déterminée.

Les trous forés sont remplis par l'explosif (Ammonix) qui permet de fragmenter les intercalaires durs pour qu'ils puissent être enlevés par les engins de décapage. L'explosif permet de libérer l'énergie potentielle des terrains, en un temps très court, ce qui dégage un volume gazeux qui est à l'origine de la production d'une température très élevée et d'une montée brutale de pression et par conséquent une fragmentation du massif rocheux (Figure 10).

Figure 10. Processus de Sautage.

4.4.4 Décapage

Le terrain fragmenté par le sautage est ensuite décapé pour accéder à la couche phosphatée. Le **stérile décapé est transporté** dans le cas : 1. d'ouverture d'un Box-cut

(lors d'ouverture d'un nouveau panneau on crée le Box-cut qui le divise en deux pour pouvoir accéder aux tranchées), 2. au niveau des sorties d'un panneau, 3. ou bien dans les niveaux inférieurs à exploiter sinon il est mis sur la berme (du côté de la tranchée). Cette opération est assurée par trois types d'engins (Figure 11 et Figure 12) dont chacun est utilisé selon le niveau et les caractéristiques du terrain à décaper :

- 7 Bulldozers Caterpillar D11 (5 D11T (1, 2, 3, 4, 5, 6) et 2 D11 Cat (R2, R3),
- Draglines (2 draglines 7500M ayant une vitesse de déplacement de 100m/h, 2 draglines PH, 1 dragline 200B),
- La sous-traitance,
- Nouvelles technologies :
  - 1 Surface miner : cette machine s'inscrit dans le cadre de l'apport de nouvelles technologies à l'OCP. Elle consiste à décaper le terrain sur lequel elle se situe et dégage le stérile à côté ou le remplie directement dans des camions,
  - 1 Liebherr : cet engin est fait normalement pour la reprise des cavaliers du stérile (les déblais) mais il est utilisé également pour le chargement du stérile lors du décapage.

Figure 11. Machines de décapage : Bulldozer D11, Draglines 7500M, P&H, 200B.

Figure 12. Machines de la nouvelle technologique : Surface miner, Liebherr.

4.4.5 Défruitage

C'est la phase de récupération de la couche phosphatée. La première sous opération dite de gerbage consistant à ramasser le phosphate au milieu de la tranchée d'une façon diagonale afin de faciliter le chargement et par conséquent augmenter le rendement de la chargeuse et réduire le taux de salissement. La deuxième sous opération consiste à

charger le phosphate dans des camions qui vont le transporter par la suite vers la destination souhaitée. Cette phase d'exploitation est assurée par :

- 2 Paydozer (sont partagés entre le processus d'aménagement et le défruitage),
- 11 Bulls D9 Caterpillar d'une capacité de 260m^3 / h,
- Deux grandes chargeuses Caterpillar 9094 (Figure 13) de capacité de godet de 17,3m3=35T chacune,
- Pour débloquer la situation la Liebherr et la Surface miner peuvent également être utilisées.
- Cribleuse mobile : cette nouvelle machine permet d'épierrer et de cribler le phosphate au niveau du chantier puis de charger des camions qui s'occupent d'alimenter directement la station du chargement. L'avantage de cette machine réside dans le fait de ne pas transporter le stérile jusqu'à la station d'épierrage en plus qu'elle permet de faire des économies importantes par rapport à la station d'épierrage et criblage.
- La sous-traitance.

Figure 13. Machines de Défruitage : Paydozer, Bulldozers D9, Chargeuse, Cribleuse mobile.

4.4.6 Transport

Une fois le phosphate est gerbé, il sera chargé dans des camions et transporté pour alimenter la trémie d'épierrage ou les stocks. Le moyen de transport du phosphate est choisi en fonction de la distance à parcourir. Par ailleurs il existe deux cas de figure :

- Le transport à une petite distance s'effectue par les camions de l'OCP :
  - 3 KOMATSU de capacité : 190 t,
  - TEREX de capacité : 136 t,
  - 4 UNITRIG de capacité : 136 t,
  - 4 HAULPACK de capacité : 136 t,
  - Le transport à une grande distance s'effectue par des camions sous-traités de capacité de 37 tonnes.

Figure 14. Camions 136 t, Camion 190 t.

4.4.7 Installations fixes

- Épierrage

  L'installation d'épierrage est située à 2 km de l'installation de criblage (KOCH). La liaison entre ces deux installations est assurée par le convoyeur T1. Elle est conçue pour pouvoir épierrer des couches différentes de phosphate chacune à part. L'installation est constituée de :

  - Trémies d'alimentation : Les deux trémies sont destinées à recevoir le phosphate transporté par les camions.
  - Épierrage : L'épierrage se fait par des cribles à deux étages. Le rejet des cribles (classe > 90 mm) alimente une goulotte qui déverse dans le concasseur.
  - Concassage : le concasseur à mâchoires est conçu pour concasser le refus des cribles (classe > 90 mm) et réduire les blocs à une dimension de 0 à 300 mm, pour qu'ils puissent être transportés par les convoyeurs de la mise à terril.
  - Convoyeurs : Bandes transporteuses de phosphate, liant les installations fixes et les parcs de stockage.
  - La couche épierrée sera ensuite acheminée vers le parc de stockage ou envoyée directement vers le criblage (sans passer sur ce parc) en cas d'une demande urgente.
  - Parc de stockage : le phosphate épierré est acheminé par les convoyeurs pour être stocké au niveau de ce parc à l'aide des appareils de stockage (Stackers).
  - Reprise du phosphate épierré : selon la qualité à préparer par l'aval, les couches stockées au niveau du parc de stockage seront reprises par la roue-pelle. Cette dernière est une machine entièrement automatique, qui alimente le convoyeur B7 pour déverser dans le convoyeur T1. Ce convoyeur achemine le phosphate vers la trémie de criblage avec un débit maximal de 1 200 t/h.

- Criblage

  Le phosphate épierré est acheminé par le convoyeur T1 et déversé dans une goulotte de répartition à ouverture variable en 1, 2 ou 3 positions pour alimenter les cinq trémies (A, B, C, D, E).

  - Cette opération assure une coupure sur 10 mm. Le refus des cribles (classe > 10 mm) sera envoyé par des convoyeurs à la mise à terril.
  - Le phosphate criblé est ensuite envoyé vers les stocks aval suivant la destination, pour qu'il soit chargé dans le train. En cas de demande urgente de la qualité une alimentation directe du criblage vers la trémie de la station du chargement du train est envisageable.
  - Au niveau des stocks finals : étant donné qu'on extrait des couches de minerais de teneurs différentes, une homogénéisation est nécessaire pour réaliser un mélange de la qualité désirée. Pour ce faire, une homogénéisation horizontale et verticale est assurée au niveau du stock afin de rendre le tas plus cohérent.
  - Roue-pelle : c'est une machine entièrement automatique. Elle permet la reprise du phosphate et l'alimentation des convoyeurs T14a et T14b (suivant la disponibilité) pour acheminer le phosphate vers la trémie de chargement du train, par l'intermédiaire des convoyeurs T15 et T17.

Ainsi, nous avons regroupé l'ensemble des informations liées au processus d'extraction et de traitement mécanique ainsi que le parc matériel mobilisé dans Figure 15.

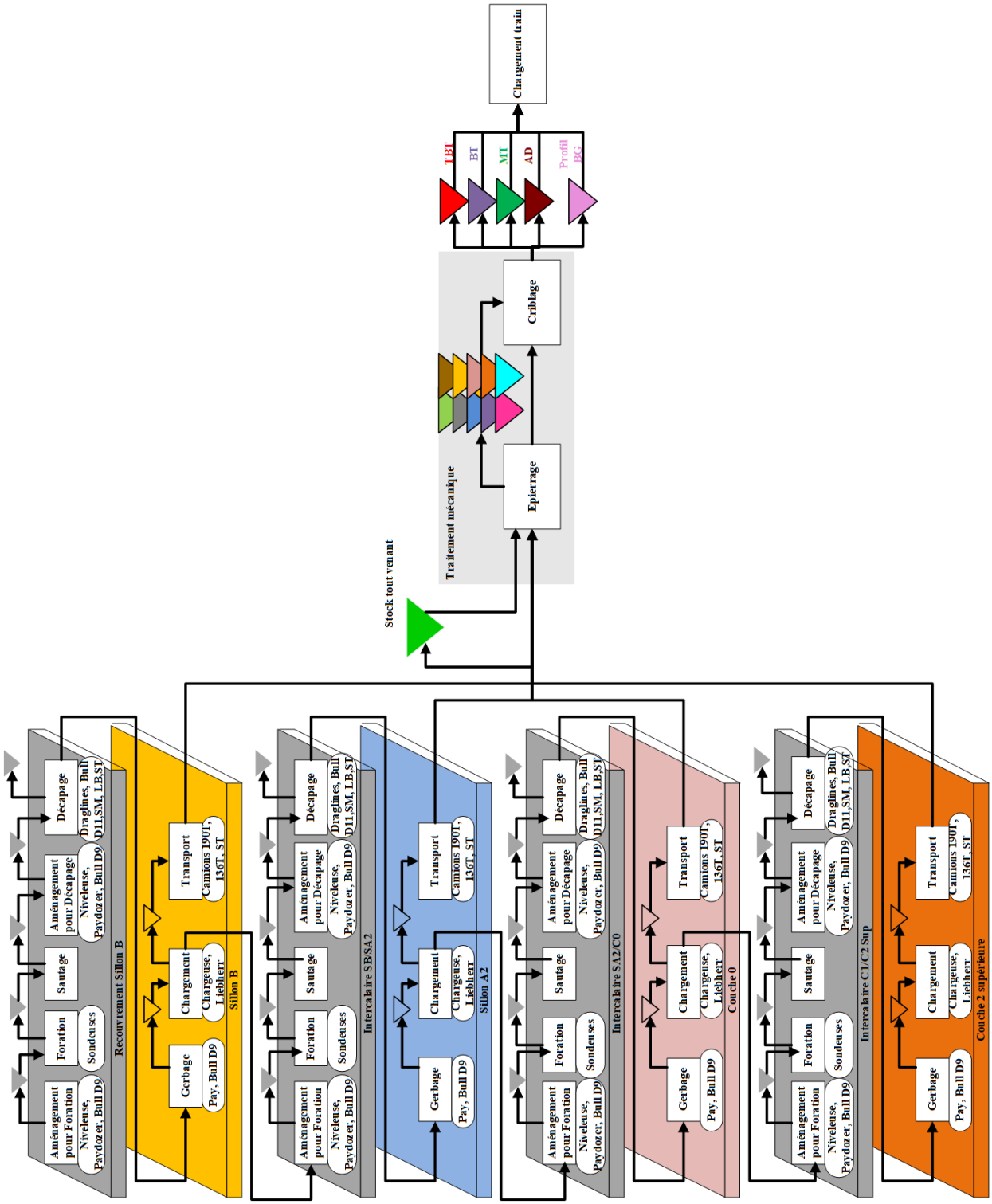


Figure 15. Processus extractif détaillé avec la prise en compte du parc matériel.

4.5 Organigramme de fonctionnement de la chaîne logistique de la mine de Ben Guerir à OCP-SA

La chaîne logistique minière au sein du site de Ben Guerir suit une logique qui peut être modélisée sous forme d'un organigramme défini sur la Figure 16.

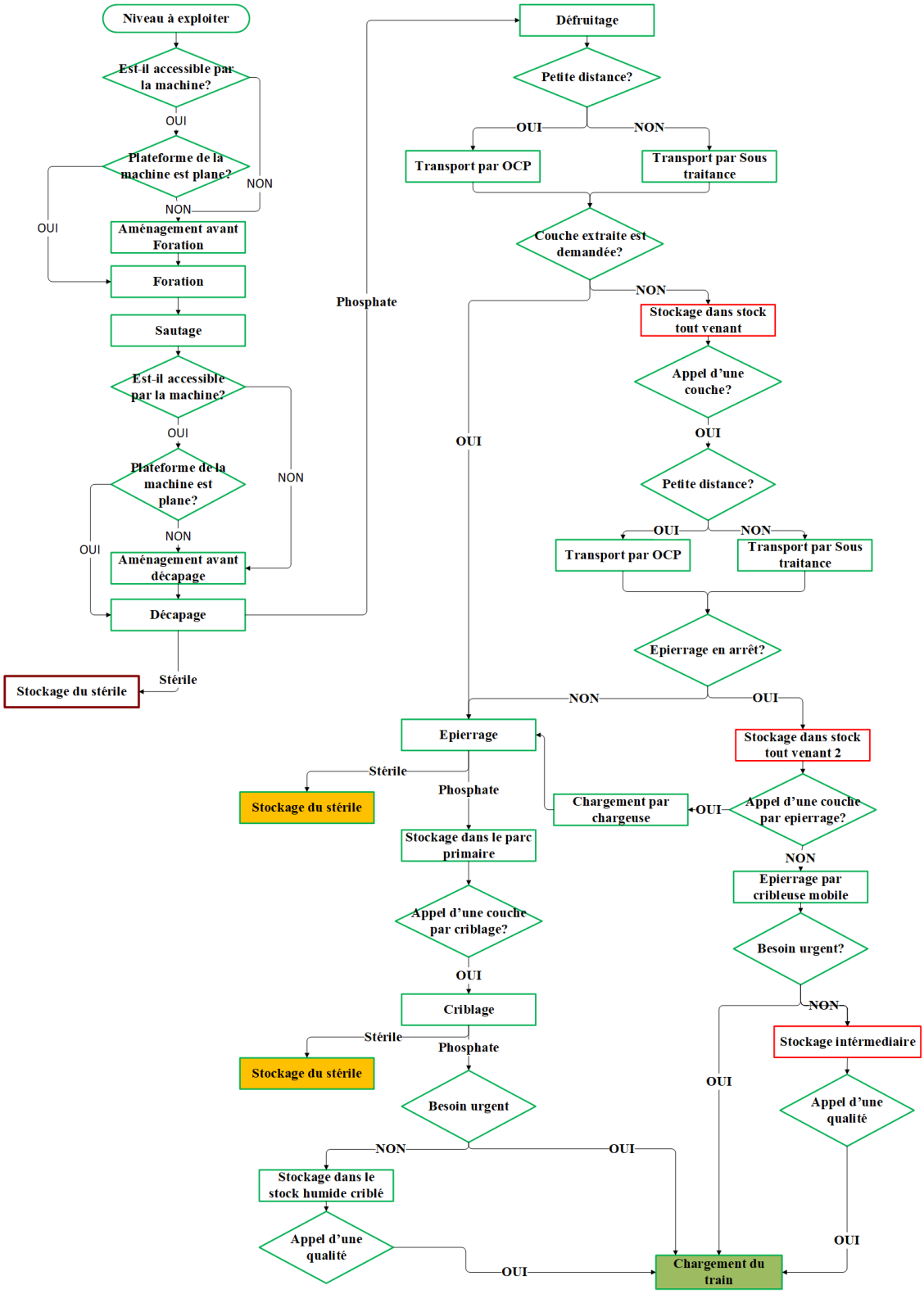


Figure 16. Organigramme de fonctionnement de la chaîne logistique de Ben Guerir.

Nous avons repéré à travers cet organigramme représentant la logique de fonctionnement du processus allant de l'extraction du phosphate jusqu'à la sortie de la mine qu'il existe

des opérations de non-valeur ajoutée qui engendrent des charges supplémentaires à l'entreprise. En effet, ces activités sont liées au stockage et au déstockage du produit provenant de la mine mais qui ne peut pas être stocké dans la zone dédiée au stockage pour des raisons multiples : arrêt d'épierrage, manque d'espace dans la zone de stockage spécialisé, un minerai non souhaité pour le moment… Ainsi, cette analyse préliminaire nous a été très utile pour pouvoir creuser encore plus dans ce sens et de pouvoir justifier qu'il existe vraiment des pistes d'amélioration très importantes dans le fonctionnement ou bien la gestion de la mine.

5 CAHIER DES CHARGES INITIALEMENT ETABLI DANS LE CADRE DE CE PROJET DE RECHERCHE

Afin d'étudier les moyens de construire une démarche de Lean Mining qui s'inscrive dans une démarche de développement durable à partir d'une analyse des opérations minières actuelles de l'OCP à Ben Guerir, la chaire de Lean Mining comprenait à sa signature trois axes de recherche :

- **Axe 1** : Comment concevoir un flux « sans perte » à savoir la mise en œuvre de processus et l'établissement des capacités qui permettent un mouvement continu dans tout le processus en limitant les interruptions, en éliminant les pertes et en valorisant les déchets ?
- **Axe 2** : Comment accroître l'efficacité globale des équipements (Overall Equipment Effectiveness OEE) miniers qui résulte de plusieurs facteurs techniques, opérationnels et économiques?
- **Axe 3** : Comment développer une green supply chain extractive intègrant simultanément un meilleur contrôle des émissions en eq CO_2 et la réduction de l'intensité énergétique ?

La thèse essaie ainsi de répondre aux défis posés par l'OCP :

- Le chapitre 3 propose une démarche d'ensemble permettant de répondre aux 3 axes ;
- Les chapitres 4 et 5 essaient de répondre aux défis posés par les axes 1 et 2 ;
- L'annexe (Analyse de la performance énergétique de la mine de Ben Guerir) s'inscrit dans l'axe 3 du cahier des charges de la chaire de Lean Mining et présente une étude réalisé conjointement par un élève ingénieur des Mines de

Paris et moi-même en 2016 et débouchant sur une cartographie des consommations énergétiques de la mine de Ben Guérir.

6 CONCLUSION

Nous avons essayé dans ce chapitre de présenter d'une façon synthétique le secteur minier et en particulier l'industrie d'extraction de phosphate au Maroc. Par la suite nous avons expliqué en détail le processus extractif utilisé dans l'industrie d'extraction de phosphate pour avoir une connaissance suffisante sur ce type d'industrie, pouvoir mieux analyser les travaux existant dans ce sens et justifier l'intérêt de ce projet de thèse.

Comme nous envisageons de mettre en œuvre une approche de Lean Mining Durable (§2.4) pour pouvoir répondre à l'ensemble des défis et enjeux rencontrés par l'industrie minière, il est primordial en premier lieu d'entamer une revue de la littérature dans ce sujet. Une recherche bibliographique sur les travaux menés dans ce sens est incontournable afin d'avoir une idée sur les avancés existantes, d'identifier leurs limites et pouvoir par la suite proposer quelque chose de nouveau et d'utile pour l'industrie minière. Le chapitre suivant résume l'analyse que nous avons menée dans ce sens.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART SUR LE LEAN MINING

1 INTRODUCTION

Face aux enjeux évoqués dans le chapitre précédent, mais dans des secteurs d'activités différents, beaucoup de grandes entreprises du monde entier se sont lancées dans des programmes de Lean Management (inspiré par la réussite de Toyota et sa capacité à faire face au changement) en vue de faire preuve de souplesse et d'adaptation aux mutations de la demande et à la pression concurrentielle. Le Lean Management est apparu comme un allié de poids pour ces entreprises afin de relever les défis urgents auxquels elles sont confrontées, comme la réduction des coûts et l'amélioration de l'efficacité et de l'efficience opérationnelles. Mais les limites des outils et méthodes du Lean Management apparaissent rapidement dès lors qu'ils ne sont pas soutenus par une approche plus globale. Un an après le lancement d'initiatives de Lean Management, de nombreuses entreprises vivent dans un ralentissement des progrès qui ne peut être surmonté avec la seule utilisation des outils et techniques ; c'est ainsi qu'une étude étendue interne[3] du cabinet McKinsey en 2012 note que 70 % des transformations opérationnelles n'atteignent pas leurs objectifs à long terme. Les logiques de transformation ne doivent donc pas se limiter à des évolutions techniques à court terme, mais doivent aussi prendre en compte de potentiels changements plus structurels à moyen et long terme.

Il est donc pertinent de s'interroger sur les modalités d'adaptation des principes du Lean Management aux opérations minières en garantissant à la fois leur durabilité et leur réussite. En effet, l'application du Lean Management sans adaptation du modèle Toyota aux spécificités d'une supply chain a des conséquences néfastes sur la gestion de l'organisation et les conditions de travail des salariés se trouvent notamment affectées de manière négative. C'est pour cette raison qu'il est primordial que les entreprises soient parfaitement conscientes avant tout que l'application du système d'organisation initial (Lean Management tel qu'il est a été appliqué par Toyota) ne répond pas aux spécificités de toutes les supply chains ce qui pourra mener à l'encontre du but recherché par le Lean Management. Pour être compétitives sur le

[3] Rapport Interne Direction Ecole des Mines de Paris et Emines de Ben Guerir

long terme, les entreprises ne peuvent donc pas se contenter d'appliquer un modèle identique à celui de Toyota.

Ce questionnement est d'autant plus intéressant que Hasle (2014) souligne, au sujet de la contextualisation du Lean à des activités autres que celles manufacturières, que : « *the most remarkable fact about research outside the manufacturing sector is the quasi non-existence of serious studies* ».

Le secteur extractif est de première transformation, par ses caractéristiques structurelles (pratiquement naturelles) interroge quant au potentiel d'adaptation de cette démarche à une réalité opérationnelle que tout semble opposer. Car comme le soulignait Sam Walsh AO, Directeur Général de Rio Tinto, dans son discours de clôture du Lean Japan Tour en novembre 2012 (Walsh 2012), au sujet du parallèle entre le secteur minier et le secteur automobile « *One manufactures highly engineered, precision vehicle components to existing specifications. It's an extremely competitive industry. It requires complex, hugely sophisticated and wherever possible automated plant and equipment. It demands first rate forecasting and scheduling, tight inventory and costs control and a keen customer focus2 it depends upon top-flight engineering, electronics and technical expertise and lean, high performance business practices.*

The other? It's digging big holes and scooping the dirt into trucks isn't it?

Well, no, it isn't, not by any means. The holes are not big, they are gigantic. So are the shovels, trucks, plants, trains, loaders and ships (...) it is different, nevertheless the scale of Rio Tinto's operations and the modernity, complexity and technological sophistication offer similarities with other complex production processes such as automotive production". »

En cela, il souligne l'intérêt d'identifier comment les approches dérivées des principes japonais du juste à temps peuvent être adaptées au contexte minier.

Alors que le Lean Management a fait une révolution dans le secteur industriel en raison des gains potentiels qu'il a apporté à l'industrie japonaise durant ces 40 dernières années, il a été appliqué ailleurs dans différents secteurs et a commencé à pénétrer même dans le secteur minier. Les questions qui se posent à ce stade sont : i) pourquoi le secteur minier a également intérêt à appliquer le Lean Management ? ii) quelles sont les différences qui existent entre la chaîne logistique de production de masse et la chaîne logistique minière qui rendent la mise en œuvre du Lean Management difficile à adopter ?

Suite à l'analyse du terrain et l'ensemble des enjeux cités précédemment (Chapitre 1), il nous semble que l'industrie minière pourrait également réfléchir à l'impact des projets de mise en œuvre du Lean Management. La naissance de

l'approche Lean Mining (Yingling *et al.* 2000) qui est une extension de la philosophie Lean Management dans l'industrie minière qui va permettre d'améliorer son efficacité et efficience tout en prenant compte de l'ensemble des contraintes et enjeux rencontrés dans ce type d'industrie.

La difficulté principale pour la réussite du Lean dans l'industrie minière provient de la prise en compte des grandes différences en termes de typologie des flux, des processus, d'organisation du travail par rapport à l'industrie manufacturière traditionnelle. Nous parlons dans ce cas de : processus continu versus des processus discrets dans les industries manufacturières, maille temporaire plus importante vis-à-vis de la minute utilisée dans des industries comme celle de l'automobile, machines assez lourdes qui se déplacent dans le chantier pour extraire de la ressource (flux maître) versus machines stables, bien maîtrisée en production de masse… Tous ces facteurs se combinent pour expliquer la réticence de l'industrie minière vis-à-vis de la mise en œuvre de l'approche Lean Management.

L'objet du présent chapitre est de mettre en perspective l'ensemble des travaux traitant le sujet du Lean Mining dans la littérature. La section 2 oppose les notions de Lean Management et de Lean Mining. Nous discutons ensuite du caractère actionnable du Lean Mining avant d'étudier les principes et les outils du Lean Management qui ont été réellement mis en œuvre en contexte minier. La dernière section propose une synthèse des travaux existants. Nous concluons ce chapitre en présentant les limites des travaux actuels traitant de Lean Mining.

2 LEAN MANAGEMENT versus LEAN MINING

Cette section discute des principes associés à la notion de Lean Management, présente les caractéristiques du Lean Mining et de la revue de la littérature que nous réalisons.

2.1 Principes du Lean Management

Le Lean management est un ensemble de principes organisationnels visant à atteindre une situation meilleure que la situation actuelle en termes d'efficacité et d'efficience, en se basant sur les moyens matériels et humains les plus justes possible. Il consiste principalement à éliminer les gaspillages et les activités de non-valeur ajoutée

(ANVA) à travers la chaîne logistique. Le Lean Management se base sur cinq principes fondamentaux (Womack et Jones 1996) :

- **Définition de la valeur du point de vue du client ;** le fondement de ce principe est d'identifier la valeur perçue par le client final en termes de caractéristiques les plus importantes et d'analyser l'adéquation du mix produit de l'organisation au marché. La complexité de ce principe, qui combine des notions de marketing avec des notions d'organisation industrielle conduit souvent à avoir des perceptions contradictoires de valeur entre différents segments de marché et même à l'intérieur d'un segment. L'incapacité à identifier exactement la valeur pourrait avoir comme conséquence des opérations potentiellement inefficaces et surtout la mise en place d'un système de production qui ne répond pas à la dynamique concurrentielle ;
- **Identification de la chaîne de valeur ;** il s'agit d'identifier l'ensemble des activités à travers toutes les parties de l'organisation qui fournissent de la valeur au client afin de souligner les activités qui n'ajoutent pas ou peu de valeur au processus ;
- **Création d'un flux sans perte ;** ce principe se concentre sur la conception d'un processus et l'établissement des capacités qui permettent un mouvement continu dans tout le processus sans une interruption, détour ou attente en éliminant les gaspillages ;
- **Tirer la production ;** il s'agit de conduire les opérations de production de manière à ce que les chaînes logistiques répondent à la demande sans surproduction ou sans stock excessif. On cherche ainsi à garantir qu'aucune activité n'est effectuée avant qu'elle ne soit exigée par une opération avale ;
- **Recherche de la perfection ;** l'élimination des éléments de non-valeur ajoutée est un processus d'amélioration continue qui doit être ancré dans une démarche constante pour améliorer les spécifications de valeur et éliminer les pertes.

Figure 17: Objectifs du Lean Management.

L'implantation du Lean Management au sein d'une entreprise se base sur une boîte à outils permettant d'améliorer l'efficacité et l'efficience de la chaîne logistique. Le Tableau 2 présente par objectif les outils du Lean Management, leurs définitions ainsi que leurs impacts.

Tableau 2 : Définition et impact des outils du Lean Management.

Objectif d'utilisation	Outil mobilisé	Définition	Impact
Identification de la chaîne de valeur (Processus)	Value Stream Mapping (VSM)	La VSM est une technique qui permet d'analyser et de concevoir les flux matériels et informationnels requis pour fabriquer un produit (Frantin 2012). Elle permet de discriminer les tâches à valeur ajoutée des tâches à non-valeur ajoutée et d'éliminer les gaspillages.	Détecter et éliminer les gaspillages
Création d'un flux sans perte (Processus)	Standardisation des processus	Déclarer la bonne pratique d'accomplir un travail (Yingling et al. 2000), afin d'exécuter la tâche avec les bonnes pratiques en affectant le même poste de travail à une autre personne	Réduire la variabilité des processus
	Total Productive Maintenance (TPM)	Système global de maintenance productive est une philosophie qui tend à faire coopérer le technicien de maintenance et l'opérateur, où ce dernier effectue une maintenance autonome (Wijaya et al. 2009).	Réduire les arrêts des machines
	Single Minute Change of Die (SMED)	Méthode d'organisation pour réduire de façon systématique le temps de changement de série avec un objectif quantifié (Yingling et al. 2000).	Réduire le temps de changement de série
	5S	5S concernent la propreté, l'organisation et l'accessibilité du lieu de travail (Wijaya et al. 2009). Les 5 mots japonais signifient : Ordonner, Ranger, Dépoussiérer, Rendre évident, Être rigoureux.	Assurer un lieu de travail organisé et accessible
	Management visuel (MV)	Il permet de rendre visible l'évolution de la maintenance et de la production par tout le monde (Dunstan et al. 2006).	Rendre visible l'évolution de la performance
	Jidoka	Le Jidoka est le synonyme de la qualité. Il interdit de laisser passer un produit s'il ne répond pas aux spécifications du client (Dunstan et al. 2006). En cas de problème, la machine s'arrête automatiquement en activant un signe qui alertera l'ouvrier chargé de la maintenance.	Arrêter automatiquement le travail suite à une anomalie
Tirer la production (Performance)	Kanban	Une gestion Kanban se matérialise par un circuit de containers et d'étiquettes entre postes avals et postes amonts. L'objectif du Kanban est de piloter la production et d'éliminer le stock inutile (Helman 2012).	Contrôler l'inventaire et éliminer les stocks inutiles
	Heijunka	L'objectif de Heijunka est d'atteindre le même niveau de production chaque jour, ce qui est possible grâce à une combinaison habile de production et de commandes (Helman 2012).	Lisser et rendre la production régulière
	Juste à temps (JAT)	JAT est un système de contrôle de production pour produire la quantité exacte de produit nécessaire au moment où elle est nécessaire. L'objectif du JAT est d'assurer l'équilibre et la synchronisation entre la quantité produite et la demande en éliminant la surproduction (Yingling et al. 2000).	Réduire les stocks
Recherche de la perfection (Personne)	Implication de l'être humain	Encourager toute la hiérarchie pour contribuer dans l'analyse des problèmes, la recherche des solutions et de la mise en œuvre des améliorations (Hattingh et Keys 2010).	Atteindre les objectifs de l'entreprise

2.2 Caractérisation du Lean Mining

La chaîne logistique minière est composée de deux types de processus : un processus d'extraction du minerai et un processus de traitement pour obtenir un produit semi-fini ou fini. Chaque processus est caractérisé par un ensemble d'opérations qui consomment des ressources matérielles et immatérielles différentes.

Une mauvaise gestion de ces ressources peut mener à une augmentation des coûts de production.

Un large consensus s'opère pour affirmer que la demande mondiale en ressource minérale continuera à croître dans les années à venir, en s'appuyant notamment sur la dynamique de développement de nouveaux pays industrialisés. On observe une concurrence accrue entre les industries minières où chacune cherchera à réduire ses coûts et améliorer sa part de marché. Par ailleurs, la réduction de ces coûts ne peut être aboutie qu'à partir d'une élimination des activités de non-valeur ajoutée qui représentent des gaspillages colossaux (ressources naturelles gaspillées, matières premières consommées…) à travers la chaîne. C'est ainsi que nous avons repris la notion de « Lean Mining » (Steinberg and Tomi 2010). Cette notion est une extension du Lean Management qui est normalement connu par sa mise en œuvre au sein des chaînes logistiques (CL) de production de masse. Le Lean Mining se focalisera sur la CL minière pour exploiter mieux les ressources naturelles avec moins de ressources matérielles consommées.

Dans le but d'analyser les recherches menées dans ce sujet, une revue de la littérature s'avère nécessaire. Ainsi, nous avons mobilisé plusieurs bases de données (bib.CNRS, Bibliost2i, SCD, JStore et EBSCO) pour chercher les articles portant sur la thématique du Lean à la mine. Nous avons utilisé différents mots-clés (Tableau 3) pour pouvoir élargir notre champ de recherche.

Tableau 3 : Mots-clés de la recherche bibliographique sur le Lean Mining avec les instructions logiques.

Base de données	AND	AND	AND NOT
bib.CNRS	(« Mining industry » OR « Lean mining » OR « Lean in mining sector », « Lean in mining industry » OR « Lean manufacturing » OR « Lean in process industry »)	(« Lean management » OR « Lean manufacturing » OR « Lean production » OR « Lean thinking »)	« Data mining »
Bibliost2i	idem		
SCD (Université Paris Ouest NANTERRE)	idem		
Jstore and EBSCO (EMINES)	idem		
Google scholar	idem		

Notre analyse traitera tout d'abord des différences justifiant l'existence du concept de Lean Mining dans la suite de cette section. La section 3 de ce chapitre traitera du caractère actionnable du Lean Mining et nous terminerons cette analyse par la caractérisation des outils et des principes du Lean Management qui ont déjà été contextualisés au domaine minier à l'aide d'une analyse des travaux empiriques du domaine.

2.3 De la chaîne logistique de production de masse à la chaîne logistique minière ou Supply Chain Minière

Pour étudier le Lean Management au sein de la mine, il s'avère primordial de définir les caractéristiques qui font que cette industrie est différente de l'environnement « normal » et « traditionnel » d'application du Lean Management. En effet, Degoun *et al.* (2015) distinguent deux types de chaînes logistiques (CL):

- La chaîne logistique discrète (CLD) ; qui est constituée d'un ensemble de processus de transformation de flux discrets, organisant de manière intégrée les processus de transformation du fournisseur jusqu'au client final, avec des logiques de production par lots ou à l'unité. Une CL dédiée à la fabrication de biens (production discrète) se décrit comme un ensemble de processus élémentaires discrets.
- La chaîne logistique continue (CLC) ; qui est constituée d'une succession de processus de transformation de flux continus, organisant de manière intégrée ces processus de transformation du fournisseur jusqu'au client final. Certains systèmes productifs sont dédiés au traitement de fluides et/ou de granulés au sens large. Dans un processus continu élémentaire, un ou plusieurs flux entrants sont admis par un processeur pour y subir un traitement ; ces flux sont caractérisés par leur nature (type de produit) et leurs débits. Du processeur sortent un ou plusieurs flux, également caractérisés par leurs natures et leurs débits.
- La chaîne logistique hybride (CLH) ; qui est constituée d'un ensemble articulé de CLD et CLC organisant de manière intégrée les processus de transformation du fournisseur jusqu'au client final, et pour lesquels les logiques de production sont à la fois par lots et en flux. Les chaînes logistiques hybrides combinent des processus discrets et continus.

Les Chaines logistiques minières sont des chaînes logistiques qui sont de nature hybride et dont les caractéristiques se rapprochent très fortement de chaine logistique continue caractéristiques de l'industrie de process; or le Lean Management a vu le jour au sein des industries automobiles caractérisées par des processus discrest. C'est pour cette raison que l'industriel minier est réticent à l'égard de la mise en œuvre du Lean Management et n'est pas convaincu de pouvoir atteindre des résultats aussi intéressants que ceux réalisés dans le contexte de la production discrète. Bien que certains outils de l'approche Lean Management puissent effectivement être difficiles à adapter en processus continu, cela ne signifie pas que l'approche est complètement inapplicable (Ahmad *et al.* 2005 ; Melton 2005 ; Radnor 2000 ; Cook et Rogowski 1996 ; Billesbach 1994). Abdullah *et al.* (2002) et Abdulmalek *et al.* (2006) examinent les aspects de la production continue susceptibles de bénéficier des techniques Lean et présentent un schéma de classification pour guider la mise en œuvre du Lean dans ce secteur.

Nous pouvons mieux comprendre les difficultés et la complexité rencontrées au sein de la chaîne minière présentées à travers une juxtaposition de caractéristiques de deux types de chaînes logistiques : Chaîne logistique de production de masse (CLPM) versus Chaîne logistique minière (CLM) (Tableau 4).

- Typologie des flux :
    - CLPM ; travaille principalement avec une logique de flux tiré, c'est-à-dire que la production est dictée par la commande. Il s'agit dans ce cas de produire juste ce qui est demandé par le client en termes de qualité et de quantité pour pouvoir satisfaire la commande client en termes de coût, de qualité et de délai. Ceci a comme objectif également de réduire les stocks au niveau de l'usine de production ;
    - CLM ; la nature du gisement ainsi que l'ensemble des difficultés et contraintes liées au terrain d'exploitation (Chapitre 1, §**4.4**) font que la partie extraction des minerais travaille avec une logique de flux poussés. Le caractère sédimentaire de la mine de phosphate, par exemple, fait que l'accès à un niveau de minerai précis nécessite l'extraction des minerais qui sont en dessus et qui seront par la suite stockés en attendant d'être utilisés.

- **Type de production :** comme expliqué en (Chapitre 1, §**4.4**), nous sommes en présence d'une production discrète en CLPM, contre une production continue en CLM.
  - *Conditions d'opérations :*
    - CLPM ; à ce niveau, les opérations sont plus maîtrisées en termes de temps (on parle d'un temps opératoire en minutes), fixes par gamme de produit. Les machines mobilisées sont simples, faciles à manipuler et programmer et qui peuvent être automatiques. L'exécution des opérations nécessite que le produit passe selon sa gamme de production par une séquence prédéfinie de machines. En plus, elles sont indépendantes des conditions de l'environnement extérieur ;
    - CLM ; à ce niveau, les opérations sont moins maîtrisées en termes de temps (on parle d'un temps opératoire de l'ordre des heures et des jours), variable en fonction des zones à extraire et des machines mobilisées. Ces dernières sont lourdes, nécessitent un capital humain qualifié qui a un impact fort sur le rendement de l'opération. L'exécution des opérations dépend fortement des conditions de l'environnement extérieur (les intempéries, la nature géologique du terrain…).
- *Environnement* de travail *:*
    - CPLM ; nous nous trouvons dans un environnement fixe qui ne change pas et qui reste stable tout au long de la chaîne ;
    - CLM ; nous nous trouvons dans un environnement variable qui peut une fois être favorable et d'autres fois difficile, en fonction des conditions spatio-temporelles, climatiques…
- *Menaces de production :*
    - CPLM ; les menaces à ce niveau sont maîtrisables et nécessitent uniquement un respect rigoureux des normes de sécurité au travail ;
    - CLM ; au sein de la mine, nous sommes en face des risques liées à la géologie du terrain et que le personnel ne peut complètement maîtriser. C'est pour cela qu'il doit être conscient des risques existants, être prêt à les affronter, et posséder des protocoles de gestion des risques en contexte de chantier.
- *Disponibilité des ressources :*

- CPLM ; les ressources ou les matières premières consommées considérées comme le flux maître ou principal sont standardisées en qualité et en quantité. C'est-à-dire que la gestion ou la planification de la production basée sur ce flux peut être considérée en grande partie maîtrisée et réalisable ;
- CLM ; au sein de la mine, les ressources minérales sont considérées comme le flux maître de la chaîne. La prévention de ses caractéristiques chimiques ainsi que leurs quantités sont très variables et cette volatilité rend les conditions d'exploitation complexes.

- *Dispersion des opérations :*
  - CPLM ; les conditions d'opération maîtrisées réduisent leur dispersion au fil du temps. Un travail plus approfondi du suivi des opérations (en se basant sur la standardisation, par exemple) peut mener à une réduction de leur variabilité ;
  - CLM ; les conditions instables et variables des opérations augmentent leur dispersion. En effet, la variabilité des conditions d'exécution des opérations mène les opérateurs à travailler en fonction de ces conditions, ce qui rend la standardisation des opérations très difficile. C'est pour cette raison que les rendements sont très variables.
- *Type de clients :*
  - CPLM ; elle travaille en B2B et BtoC ;
  - CLM ; la CLM cherche à répondre à des clients industriels.

Tableau 4 : Comparaison entre la supply chain de production de masse et la supply chain minière

Comparaison des spécificités entre la supply chain de production de masse et la supply chain minière		
	Supply chain de production de masse	Supply chain minière
Typologie des flux	Tirés	Poussés
Type de production	Discrète	Continue
Conditions d'opération	Maîtrisées	Instables/variables
Environnement de travail	Fixe	Variable
Menace de production	Pas de menace	Risques géologiques
Disponibilité des ressources (flux-maître)	Maîtrisée	Volatilité importante
Dispersion des opérations	Réduite	Dispersion importante
Type de clients	Particuliers	Industriels

3 LE CARACTERE ACTIONNABLE DU LEAN MINING

Nous étudions principalement dans cette section le caractère actionnable du Lean Mining au travers d'articles traitant de retour d'expérience du Lean Mining. La faisabilité de la mise en œuvre du Lean au sein de la mine a fait l'objet de plusieurs articles dont la démonstration de sa faisabilité varie d'une publication à un autre. C'est pour cette raison, que nous illustrons à travers cette section les diverses illustrations menées dans ce sens.

Nous avons constaté en premier lieu que les sujets de recherche traitant du Lean Mining sont peu nombreux et que le premier article publié dans ce sens semble être celui de Yingling *et al.* (2000). Cet article, cité dans la plupart des articles publiés ultérieurement, présente une étude théorique du Lean appliqué à la mine en se basant sur l'expérience des auteurs. Ils ont commencé par discuter la notion de la valeur client, puis de l'importance de ce principe et les outils permettant de définir cette valeur. En tant que tel, les auteurs ne voient aucune raison pour laquelle l'application de la définition de valeur à l'exploitation minière devrait être plus difficile que son application aux entreprises manufacturières. Ils abordent ensuite la problématique du flux au travers des outils de : standardisation du travail (avec un haut niveau de flexibilité par rapport à l'environnement manufacturier), la qualité à la source, la TPM et la flexibilité / SMED qui ont été considéré comme étant nécessaire à la stabilité.

Pour eux, un processus stable est celui qui produit des items à 100 % de qualité, qui est disponible en continu tout au long de l'intervalle de production planifié, et qui accomplit constamment sa tâche dans un temps de fonctionnement défini. Un haut degré de stabilité est une base importante, car il minimise les perturbations opérationnelles, qui sont difficiles à tolérer dans les systèmes à flux continu. Ces perturbations sont des conséquences de pannes de machine, de défauts de produit et de temps de fonctionnement variables, facteurs qui ont été minimisés dans des processus stables basés sur les systèmes Lean. Ces auteurs pensent que l'analyse de la valeur, la standardisation, la qualité à la source, la TPM, la flexibilité de la main-d'œuvre, les techniques de réduction du temps de lancement et l'approche d'amélioration continue peuvent être directement appliquées à la mine ; par contre, les techniques de gestion de flux ne peuvent pas être transférées des industries manufacturières à la mine. L'implantation du Lean est difficile et nécessite du temps, de l'implication du top management, ainsi que des investissements dans la formation.

Pour Dunstan *et al.* (2006), Rio Tinto Aluminium (RTA) est une entreprise qui a commencé son processus d'amélioration en 1995, après avoir réalisé qu'une approche plus structurée était nécessaire pour la pérennité de l'organisation à long terme. Dans ce cadre, Six Sigma a été mis en œuvre et a changé la culture de l'organisation ; d'une entreprise qui adopte une approche de lutte contre les incendies à celle qui met l'accent sur le contrôle des processus et essaye d'être en mesure d'identifier les problèmes et mettre en œuvre des mesures préventives. Ils ont alors décidé d'étendre les initiatives d'amélioration par la mise en œuvre du Lean Management, qui a encouragé l'amélioration continue au niveau opérationnel en engageant tout le personnel. Ils rapportent que Lean a atteint de bons résultats qui sont parfois « spectaculaires » en améliorant la productivité et l'efficacité à tous les sites, y compris le site minier. L'évolution des approches d'amélioration au sein de RTA leur a appris que, pour faire une amélioration durable des activités de l'entreprise une approche stratégique a été nécessaire pour assurer un changement de culture dans toute l'organisation. Ainsi, Rio Tinto Aliminium (RTA) est le premier groupe minier qui a adopté le Lean avec un déploiement qui a commencé vers la fin de l'année 2004. La réussite du Lean au sein de RTA a mené les autres business units de Rio Tinto basés en Australie (*Northeparkes Mines, a copper mining operation in Central New South Wales, Hunter Valley Operations, un groupe de quatre mines de charbon à Hunter Valeyy region de New South Wales*) à procéder de même. Le Lean

Management a été également adopté par *Rio Tinto Irone Ore*. Ces groupes ont atteint des résultats importants en appliquant une centralisation des informations (pour identifier principalement les problèmes et les résoudre par la suite), les 5S, le facteur visuel et la TPM. Ainsi, nous citons quelques exemples de ces entreprises en termes d'apport du Lean (Dunstan *et al.* 2006) :

- **RTA** affirme que la puissance du Lean réside dans une coopération des employés opérationnels et des équipes de maintenance, ce qui permet de résoudre ensemble les problèmes au niveau du lieu de travail. RTA affirme que le Lean est un outil efficace et efficient pour atteindre des améliorations continues et il joue un rôle important dans le développement de carrière pour les employés.
- **Northparkes Mines :** La mise en place des Centres d'Information Lean (*Lean information Centeres*) à Northparkes a considérablement stimulé le développement des mines souterraines en offrant une approche structurée pour améliorer la productivité. Les principaux avantages de cette approche sont que l'accès à l'information est devenu plus facile, la communication entre les équipes est améliorée et les équipes de développement sont activement impliquées dans l'identification et la résolution des problèmes qui affectent la production tout en connaissant ce qui se passe au niveau des autres activités.
- **Hunter Valley Operations :** Lean est un programme d'amélioration approprié pour les applications minières. Le concept des Centres d'Information (Information Center), l'union des employés opérationnels et les équipes de maintenance, la prise en compte et la résolution de chaque problème soulevé, représentent fondamentalement les piliers d'une approche saine du management.

À partir des voies définies par Schumpeter (1944 (1ère édition) – 1976 (5ème édition)), Klippel *et al.* (2008a) ont analysé un système de production générique dans une industrie minière afin de pouvoir définir les pistes possibles d'innovation concernant chaque voie. Klippel *et al.* (2008a,b) ont démontré la faisabilité de la mise en œuvre des principes du Lean Management à travers l'exemple de deux mines (de fluorine et d'améthyste) situées au Brésil. Les améliorations atteintes au sein de ces deux entreprises se manifestent dans : la réduction des coûts, l'amélioration de la productivité et de la qualité de l'environnement du travail, ainsi que par la réduction des attentes. Parmi les actions qui ont menées aux améliorations réalisées nous citons :

- Afin d'éviter toute attente de la machine de foration, la mine a embauché d'autres opérateurs (une personne de plus pour aider le foreur et l'autre pour les tâches support) afin de réduire la charge du foreur et pour qu'il puisse effectuer ses tâches correctement sans faire attendre la machine,
- Une correction de la position des vannes suite à des gaspillages signalés au niveau des mouvements inutiles effectués par l'opérateur à cause de l'éloignement de ces vannes,
- À cause de la ventilation insuffisante à l'intérieur du bloc de l'exploitation minière, les foreurs ont dû attendre après le dynamitage jusqu'à ce que les gaz aient été libérés. Cette situation a provoqué des attentes supplémentaires. En plus de ceci le manque d'une machine de foration de secours à l'intérieur du bloc et la distance du magasin, situé sur l'autre niveau de la mine, avaient engendré des gaspillages colossaux,
- L'utilisation d'une foration à sec augmentait le temps de traitement. C'est pourquoi une foration humide a été mise en place pour pouvoir réduire à la fois le temps de la foration et notamment le taux de génération de la poussière.

Ainsi, l'implantation du Lean Management a été exposée comme étant un concept dépassant une simple approche de management pour être une approche innovatrice qui peut apporter de la valeur à l'industrie minière. Si Klippel *et al.* (2008a,b) ont considéré le Lean comme une approche innovatrice, Wijaya *et al.* (2009) écrivent que la réussite du Lean ne doit pas être considérée comme étant seulement une utilisation de ses outils mais plutôt un changement de culture. En effet, plusieurs entreprises ont essayé d'appliquer quelques principes du Lean mais peu d'entre elles qui ont réussi à atteindre le succès de Toyota. C'est pour cette raison que Wijaya *et al.* (2009) affirment que la réussite du Lean Mining ne réside pas dans l'adaptation des outils du Lean Management mais plutôt dans la façon de faire changer la culture « *a true culture of continuous improvement* ». Ainsi, ils mettent en opposition l'approche d'innovation qui se base sur une amélioration/changement rapide et le Lean Mining qui se focalise sur de petites améliorations permanentes. Après avoir illustré les grands problèmes rencontrés au sein de l'industrie minière ainsi que les challenges à surmonter lors de la mise en œuvre des outils Lean, Wijaya *et al.* (2009) insistent sur le fait que l'efficacité globale de la production basée sur l'élimination des gaspillages, l'augmentation de la fiabilité opérationnelle et

l’assurance de la qualité ne peut être atteinte qu’avec un engagement total de toute la hiérarchie.

D’un autre point de vue également, Mottola *et al.* (2011) annoncent que l’automatisation peut être un outil important pour le Lean Mining. Ainsi, Mottola *et al.* (2011) affirment que le fait de gérer la variation par le contrôle des processus en automatisant certaines parties du processus en amont de l'exploitation minière (forage et dynamitage, le chargement et le transport, y compris le mélange) se traduirait également par un meilleur contrôle des processus en aval (tels que le concassage, le broyage et le traitement du minerai pour libérer les minéraux des produits ou des métaux contenus dans le minerai). Une telle stratégie de contrôle permettrait une boucle de rétroaction en temps opportun et utile. Les auteurs font référence à des expériences antérieures et actuelles de forage à ciel ouvert et le suivi des performances de la pelle, pour démontrer que les données de performance de la machine sont un moyen, non seulement pour caractériser l'environnement géologique et le travail dynamique, mais aussi de fournir les bases d’une automatisation. Ceci peut être assuré dans un contexte minier Lean, qui offre les moyens reconnus pour un cadre de production efficace et efficient. Le défi est alors d'intégrer simultanément l'automatisation, le contrôle des processus et les concepts Lean au travers de la mise en œuvre rationnelle et coordonnée de ces instrumentations. La collaboration interdisciplinaire conduite par un leadership cohérent sera essentielle pour le développement et le succès de la mise en œuvre du Lean. Dans cette perspective, Mottola *et al.* (2011) examinent la façon dont l'automatisation et l'intégration de ces composants du système de production de la mine entraîneraient les processus dans un état contrôlé, d’assurer la création de la valeur depuis l’amont dans le cadre du Lean Mining.

Une revue de la littérature sur l’approche Lean Mining a été effectuée par Lööw et Johansson (2015) avec une explicitation des 18 principes de Lean divisée en 4 thèmes appelés « modèle 4P » : Philosophie, Processus continue, Valeur ajoutée et Résolution de problème. Ils tenteront également de fournir des recommandations pour la mise en œuvre de ces principes. On constate que certaines parties du concept sont adaptées à la mise en œuvre et que d'autres parties nécessiteront une modification du concept de Production Lean ou dépendent du développement technologique futur. Toutefois, l'industrie minière est prête à entamer cette approche. Lööw et Johansson (2015) affirment que pour être compétitive, l’exploitation minière devra rationnaliser

le secteur en mettant en place le Lean et son application lors de la production. Le projet I²Mine est financé par l'union européenne, l'exploitation minière est standardisée par un manuel qui consiste à fournir des conseils pratiques sur la conception du lieu de travail, sur l'organisation.

Hattingh et Keys (2010) affirment que le génie industriel est considéré de plus en plus au sein des entreprises comme étant une discipline qui peut être utilisée pour améliorer la productivité et l'efficacité globale des entreprises. Elle fait appel à de nombreuses philosophies, principes, méthodologies et outils pour optimiser les systèmes et les processus, maximiser l'utilisation des ressources et par conséquent augmenter la valeur perçue par le client. Malgré les difficultés rencontrées au sein de la mine, ces auteurs insistent sur le fait que le génie industriel en tant que discipline devrait être également une partie intégrante de la mine comme l'ingénierie, l'exploitation minière ou la géologie. Elle peut s'appliquer à tous les aspects de la chaîne de valeur minière, y compris l'exploration et la conception de nouvelles mines ainsi que la production quotidienne et la maintenance des mines existantes ; de l'extraction physique du minerai jusqu'au traitement final du produit qui est vendu au client. Par ailleurs, Hattingh et Keys (2010) insistent sur deux éléments : la standardisation du travail comme étant le facteur clé permettant de réduire la variabilité des processus et par conséquent planifier adéquatement les tâches et identifier efficacement les causes des problèmes. La garantie des améliorations des entreprises est liée au degré de durabilité de ses initiatives. C'est pour cela qu'il faut instaurer une approche d'amélioration continue impliquant toute la hiérarchie et alignant les employés avec les objectifs stratégiques de l'entreprise ce qui les habilite à contribuer efficacement à atteindre les objectifs fixés. En outre, ils affirment qu'il faut entamer une logique de long terme au lieu de la prise de nouvelles initiatives tous les deux ans dans le cadre d'un nouveau « Projet X ».Dans cette perspective, Hattingh et Keys (2010) examinent deux approches pour la mise en œuvre des initiatives d'amélioration continues et durables :

a) Anglo American Thermal Coal approach

- L'approche déployée dans une mine de charbon Anglo-Américaine consistait à placer un ou deux ingénieurs industriels comme gestionnaires d'optimisation afin de faciliter la compréhension sur place ainsi que de fournir une expertise si nécessaire. Le niveau des personnes choisies est un facteur critique de succès dans le déploiement de l'optimisation et de l'amélioration

de la mine. L'approche utilisée par l'équipe d'optimisation implique une analyse initiale intensive de l'ensemble de la chaîne de valeur de la mine afin de s'assurer que les initiatives sont alignées avec la stratégie d'entreprise. Des mesures soigneusement conçues sont ensuite utilisées pour le suivi des performances et l'identification des possibilités d'amélioration. Ces opportunités sont ensuite transformées en des projets.

- Thermal Coal considère que l'étape la plus importante pour assurer la viabilité à long terme du programme d'amélioration est d'assurer un soutien de la haute direction ainsi que la bonne compréhension des objectifs. Cela implique souvent de souligner la nécessité et l'importance du changement et comment l'optimisation permettra à la mine d'atteindre l'excellence opérationnelle. Bien que cette entreprise de charbon ait connu une certaine résistance au changement dans certains cas, mais une meilleure compréhension du processus à tous les niveaux a permis de faire changer les avis.
- Thermal Coal a également tenté d'engager les employés à des niveaux inférieurs en mettant en œuvre un type d'initiative de type boîte à suggestions. La mise en place de ces suggestions est liée au degré de compréhension de chacun par rapport à son rôle dans la chaîne de valeur.

b) Approche Sandvik trans4mine- Chelopech mine, Bulgaria

Sandvik trans4mine est une division de Sandvik qui conclut un partenariat avec un client minier pour accroître l'efficacité du système et des processus. Cette division est composée d'une équipe d'ingénieurs industriels et des spécialistes opérationnels qui utilisent une approche systémique pour comprendre les relations entre les activités et les départements dont le but ultime est d'optimiser l'efficacité du cycle. Dans le but d'assurer la durabilité de la réussite des interventions de Sandvik, cette dernière a instauré une nouvelle approche qui se base sur trois niveaux :

- L'identification des problèmes de base et l'encadrement des projets qui vont les résoudre,
- La mise en place d'un système de mesure et d'un cadre d'amélioration continue,
- La mise en place d'une culture entièrement intégrée d'amélioration continue au sein de la mine elle-même,

Sandvik trans4mine a utilisé cette nouvelle approche à la mine Chelopech en Bulgarie, dont le but est d'accélérer la production de 1 million de tonnes par an à 2 Mtpa de 2010-2012. Pour ce faire, l'équipe de Transvastine de Sandvik a aidé la mine à effectuer une vérification des systèmes, à identifier les carences du système et à développer un modèle de production Excel avec un outil de simulation dynamique. La simulation et le modèle serviront à prévoir les besoins futurs de la flotte en fonction de la performance actuelle des mines et à identifier les possibilités d'amélioration (afin d'optimiser les besoins en flotte et les coûts opérationnels associés).

La nouvelle approche se base principalement sur la méthodologie structurée Six Sigma, DMAIC (définir-mesurer-analyser-améliorer-contrôler) permettant de :

- Définir dès le début le but et de quantifier les objectifs à atteindre,
- Effectuer une première vérification dans la mine afin d'évaluer leur performance,
- Mettre en place des mesures pour identifier rapidement les problèmes et les projets d'amélioration les plus critiques,
- Faire participer les employés de la mine à toutes les étapes de ce processus pour obtenir l'appui de l'initiative et tirer profit de la richesse des connaissances et de l'expérience qu'ils ont. Grâce à ce processus, l'équipe minière obtient également une appréciation complète de la méthodologie de résolution de problèmes qui est utilisée.

Une fois les projets d'amélioration identifiés, ils sont par la suite détenus et gérés par la direction de la mine. Cette étape est une composante critique dans la nouvelle approche de Sandvik trans4mine. L'équipe de Sandvik trans4mine agit par la suite comme coach qui guide l'équipe de la mine dans le processus de résolution de problèmes, dans le transfert des compétences pour garantir la durabilité à long terme. Le manager du projet de Sandvik trans4mine, Mike Andrews, affirme que l’équipe a veillé à ce que les acteurs locaux de Chelopech deviennent les propriétaires du processus et la méthodologie s'assure que les causes profondes sont traitées par opposition aux influences symptomatiques. L'objectif ultime étant que Chelopech mène de manière indépendante les processus et les méthodologies mis en œuvre sur une base durable.

À partir de ces deux illustrations, Hattingh et Keys (2010) affirment que pour assurer une approche plus soutenue à l'amélioration des entreprises minières, il faut :

- lier toutes les initiatives à l'objectif global de l'organisation,
- viser la durabilité à long terme et éliminer les solutions rapides et de court terme,
- assurer la participation et le soutien du niveau supérieur,
- suivre un processus structuré pour identifier les causes profondes et résoudre les problèmes,
- mobiliser des ingénieurs industriels comme entraîneurs et facilitateurs,
- tirer profit des connaissances et de l'expertise locale pour résoudre les problèmes,
- impartir les connaissances acquises et les compétences en résolution de problèmes à tous les niveaux de l'organisation,
- lier les initiatives aux mesures du rendement,
- impliquer les employés dans l'établissement des cibles.

Steinberg and De Tomi (2010) présentent une étude axée sur la valeur minérale / chaîne d'approvisionnement minière à un niveau élevé, en mettant le focus sur l'importance et la façon de mettre en œuvre l'approche Lean au sein de l'industrie minière. Ils annoncent que les entreprises minières jouent un rôle très important durant les dernières décennies dans le progrès de l'économie des pays en cours de développement tel que le Brésil. En effet, même si ces entreprises signalent une croissance de sa productivité, cela n'empêche d'annoncer qu'il existe des pistes d'amélioration significatives d'efficacité qui nécessitent un changement au niveau stratégique et managérial. Ils affirment que les processus séquentiels qui composent la chaîne de valeur minérale ont été traités pendant plusieurs années, sans qu'il y ait une modernisation significative. Ces processus ont été structurés de telle façon à ce que les variations de la qualité et de quantité soient absorbées au cours de son acheminement. C'est pour cette raison que la chaîne de valeur minière a incorporé des processus improductifs et obsolètes qui doivent être éliminés pour pouvoir améliorer l'efficacité et l'efficience de l'organisation. Pour atteindre ceci, ils estiment que l'approche Lean est capable d'atteindre ceci même si la garantie de la réalisation de cette amélioration est difficile à maintenir en raison de la nature intrinsèque de l'incertitude géologique. Ces auteurs insistent sur le fait que la mise en place du Lean se base en premier lieu sur une cartographie de la chaîne de valeur permettant de détecter les activités sans valeur ajoutée au produit, du point de vue du client, afin de

les éliminer. Suite à cette étape, le réseau logistique est amélioré par l'application de modèles managériaux avancés. Pour illustrer l'importance de la définition de la valeur, ces auteurs ont proposé le tableau de synthèse suivant (Tableau 5):

Tableau 5. Lean thinking transforming old practices (Steinberg and De Tomi 2010).

De	A
Conformité Se concentrer exclusivement sur l'efficacité. Posture : "Je peux vivre avec ça". Les changements ne sont pas nécessaires	Engagement Engagement dans le processus de changement culturel
Complexité Orientations pour perpétuer des processus complexes et accepter des pertes dans la chaîne de valeur	Simplicité Une orientation pour les processus dont le succès est mesuré par sa rapidité et sa simplicité
Tolérance à l'erreur Acceptation d'une certaine marge d'erreur et des mesures correctives indisciplinées qui en découlent	Élimination de l'erreur Six Sigma est un objectif constant dans tout ce qui est fait. Conseils pour augmenter le niveau Sigma des processus
Mesures faibles Mesures financières incomplètes ou ambiguës ; Sans processus d'inspection de l'impact sur les résultats de l'entreprise	Mesures fortes Mesures financières solides, documentées et alignées sur les résultats de l'entreprise ; Système de suivi formel pour le développement de projets
Analyse Départementalisation des opérations. Résistance passive aux changements et impossibilité virtuelle de succès dans des projets pluridisciplinaires	Collaboration Une mentalité de collaboration et un modèle informel standard de discussion et de débat sur des projets pluridisciplinaires
Impatience Style d'urgence. Attaquer les avantages moins importants et de courte durée. Déclaration de victoire prématurée sur les résultats	La discipline Mettre l'accent sur le long terme et la durabilité des résultats. Discipline dans la méthode

Steinberg and De Tomi (2010) confirment que les résultats obtenus suite à l'analyse faite durant le déploiement du Lean représentent, pour la direction, un facteur-clé, d'une part, pour pouvoir mieux comprendre les étapes de la chaîne de valeur minière et les canaux logistiques qui les relient et, d'autre part, pour la prise de décision intelligente axée sur la demande client avec une flexibilité importante

(réduction du temps de production…), au lieu d'une production pour stock qui représente des coûts immobilisés.

Les auteurs soulignent également l'importance d'une participation proactive regroupant tous les membres de la chaîne (producteur, distributeur) pour avoir une connaissance approfondie du système et, par conséquent, de réussir à atteindre la qualité souhaitée. Ils ajoutent qu'il faut constamment chercher les meilleures façons de faire pour créer de la valeur à travers la chaîne. Les auteurs ont traité le concept du Six Sigma comme étant un composant-clé de l'amélioration de l'efficacité. Il permet aussi de trouver des réponses claires à la différence entre les résultats prévus et les résultats réels d'exploitation minière.

Helman (2012) affirme que la spécificité des sociétés minières est principalement due au fait que le processus de fabrication est réalisé dans l'environnement naturel tel que le sous-sol afin d'extraire le minerai du gisement. Cette activité est caractérisée par une volatilité et une incertitude élevées. Ces dernières affectent directement la technologie utilisée pour fonctionner, l'organisation du processus de production, sa continuité dans le temps, son efficacité peut être contrôlée par la qualité de la production minière et la qualité du produit. Sinon, l'industrie minière pourrait être plus compétitive et plus efficace par rapport à d'autres industries. Cependant, cette compétitivité pourrait être atteinte en utilisant certains éléments de la méthodologie Lean. Ces auteurs affirment que l'industrie minière est assez différente des autres industries et que plusieurs aspects liés à la production et l'organisation du travail qui doivent être pris en compte.

L'amélioration de la productivité est devenue une nécessité pour l'industrie indienne du charbon contrainte de respecter l'objectif fixé par le gouvernement indien de parvenir à une forte croissance économique et d'industrialiser la nation pour le bien-être des citoyens indiens. L'industrie indienne a dû faire face au défi d'identifier les gaspillages et de maintenir un bon profit au sein du marché. La seule solution pour parvenir à ceci est de réduire le coût total de production. C'est dans ce contexte que Ade et Deshpand (2012b) montrent l'apport de l'application du Lean au sein d'une industrie d'extraction de charbon. Cette dernière a réussi à atteindre une amélioration importante en commençant par une classification des problèmes selon des catégories afin d'identifier les gaspillages les plus importants à traiter. Cette étude a pu mesurer le degré de difficulté rencontré au niveau des conditions des travaux exécutés par les

opérateurs. Par la suite, une analyse de l'efficacité humaine globale a été menée (calcul du temps de repos nécessaire pour les opérateurs afin d'augmenter leur efficacité, analyse de l'énergie humaine dépensée par les opérateurs, analyse de disponibilité et de la performance). Le résultat de cette étude était de proposer d'implanter un système mécanique pour transporter la main-d'œuvre (réduire le temps de déplacement, augmenter la disponibilité énergique de la main-d'œuvre, assurer un temps de travail efficace pour la production). Ceci contribue à augmenter la production, l'efficience humaine, la disponibilité des opérateurs et la réduction des factures médicales. Ces auteurs affirment que l'identification des gaspillages doit s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue sans fin. Ils ajoutent qu'à la suite de la mise en place du Lean, l'industrie minière de charbon a réussi à atteindre des résultats très remarquables, en termes d'amélioration de sa productivité. Ils indiquent que la concurrence mondiale exige la mise en œuvre efficace d'outils Lean dans l'industrie minière charbonnière et qu'il faut davantage de recherches sur la transposition des outils Lean à l'industrie de process.

Ade et Deshpand (2012a) ont traité un problème des ressources utilisées (outillages). Suite à une analyse des activités, ils ont constaté que 75 % du dysfonctionnement des trépans est dû au profil défectueux de l'outil pendant le processus d'affûtage causant ainsi d'énorme temps d'attente et de réduction de sa durée de vie. Ils montrent qu'à la suite de la mise en œuvre du Lean, des gains significatifs ont été atteints : augmentation de la productivité avec moins d'effort humain, utilisation efficace des ressources (moins de trépans, de meules, de puissance électrique, d'énergie humaine), amélioration de la culture de travail.

Selon Muduli *et al.* (2012), les industries minières sont considérées comme étant les plus polluantes de l'environnement. Pour y remédier, différentes approches sont implantées de plus en plus pour pouvoir diminuer l'impact sur l'environnement. Ces auteurs ont entamé une étude basée sur l'identification des facteurs et des sous-facteurs empêchant l'implantation de management de la chaîne logistique green (GSCM).

O'Connor et Turnham (1991) affirment qu'une faible capacité des investissements, l'utilisation d'une technologie traditionnelle, des conditions pauvres de travail des opérateurs possédant de compétences « médiocres » mènent à une réduction de la productivité et une maintenance défaillante des équipements. Ces

conditions de travail provoquent par conséquent une forte consommation d'énergie et des gaspillages en production ce qui rend la mine l'industrie plus polluante (Barve et Muduli 2011). Cependant, ce type d'industrie est très réticent à l'égard de la mise en œuvre du GSCM. Muduli *et al.* (2012) exposent les freins à cette mise en œuvre :

- un grand manque d'information (manque de connaissances professionnelles environnementales pour les gestionnaires miniers, la non-disponibilité générale d'informations sur la protection de l'environnement, la non-conscience des risques pour la santé liés aux secteurs miniers) ;
- manque d'une pression suffisante de la part de la société (par exemple : les organismes qui s'intéressent particulièrement aux questions environnementales liées à l'exploitation minière sont très rares en Inde…) ;
- mauvaise législation ;
- contraintes liées aux capacités : des fonds substantiels sont essentiels pour soutenir les besoins en infrastructure, en information et en main-d'œuvre des activités de GSCM.

Une approche théorique matricielle (GTMA) a été utilisée pour quantifier l'impact négatif de ces obstacles sur la mise en œuvre de la GSCM. Une évaluation de la résistance inhibitrice des barrières aidera les décideurs à les classer et décidera d'un plan d'action qui permettra une utilisation optimale des ressources disponibles en période de pénurie de ressources.

Melton (2005) affirme qu'il existe peu de personnes ne connaissant pas l'approche Lean mais que peu d'entre eux y croient et implémentent réellement le Lean en contexte minier ou d'industrie de process. Pour cet auteur, le Lean est une révolution qui consiste non à appliquer des outils, ou de changer quelques étapes dans le processus manufacturier mais plutôt un changement complet de l'organisation. Pour illustrer les bénéfices du Lean pour l'industrie de process, Melton (2005) montre que la définition de la chaîne de valeur, la communication, l'introduction du Kanban et du management visuel permettent de réduire le temps de cycle, d'assurer une définition précise de la valeur client (livraison et qualité), de réduire le stock, de mettre fin aux barrières fonctionnelles. Pour Melton (2005), la démarche de mise en œuvre du Lean dans une industrie de process peut être décrite comme suit :

- commencer par un processus de fabrication ;
- construire une petite équipe inter fonctionnelle ;

- veiller à ce que les cadres supérieurs démontrent leur soutien ;
- s'assurer que tous les changements sont basés sur un processus rationnel de données structurées ;
- communiquer efficacement le succès.

Pour assurer un développement à long terme du Lean dans l'industrie de process, il recommande de :

- communiquer les succès durables de la mise en œuvre au sein de l'organisation ;
- examiner la chaîne de valeur d'un client ou d'un ensemble de clients ;
- examiner les processus métiers ainsi que les processus physiques et appliquer le même processus rationnel de données structurées, basé sur l'utilisation d'équipes transversales habilitées à mettre en œuvre le changement ;
- continuer à chercher les gaspillages, à vérifier la valeur que vous livrez aux clients, à garder le contrôle des flux comme étant une partie de votre culture d'entreprise.

En guise de conclusion, Melton (2005) affirme que suite au climat de changement qu'a connu l'industrie de process, plusieurs entreprises se sont améliorées après adoption de techniques relativement simples. Ainsi, Melton (2005) affirme que le Lean Management apportera à l'industrie de process des améliorations de la performance sur l'ensemble de sa supply chain, de la matière première (souvent une ressource minérale… au produit final).

Castillo *et al.* (2014) présentent trois projets de développement minier au Chili qui ont été sélectionnés pour étudier l'impact d'une mise en œuvre du Lean. Cela a permis une comparaison des analyses effectuées. Le critère de sélection des projets était leurs implications dans des activités similaires, permettant leur comparaison par une analyse croisée. Plusieurs problèmes ont été identifiés au stade du diagnostic et ont été classés en catégories pour améliorer leur compréhension. Les principaux problèmes identifiés étaient liés à l'utilisation du temps et des ressources (la planification), et des systèmes de gestion. Pour planifier la mise en œuvre du Lean Mining, un programme d'amélioration et de recherche a été créé. Ce programme a été utilisé pour les trois études de cas de manière identique. À travers cette étude, la performance organisationnelle a été évaluée à l'aide de 5 critères :

- interférences,

- efficacité temps,
- productivité,
- progrès physique,
- fiabilité du programme.

Le second critère évalué pour mesurer l'impact du Lean Mining est la performance du management projet. À l'origine 14 variables avaient été choisies pour évaluer ce critère. Seules 9 sont retenues, les autres n'ont aucun impact remarquable sur le projet. On peut regretter qu'aucune explicitation des éléments permettant d'évaluer la pertinence des variables choisies n'a été abordé. L'étude mise en place montre que le Lean Mining améliore en certains points la performance d'une organisation d'exploitation minière. Des améliorations ont été réalisées sur le flux de travail, la capacité de production, la fiabilité opérationnelle, la productivité et le temps d'utilisation. Le Lean Mining a également une forte influence sur la performance organisationnelle : communication améliorée, désir d'apprendre, accentuation du client et le travail en équipe.

Indrawati and Ridwansyah (2015) traitent le cas d'une industrie de minerai de fer qui est actuellement capable de produire jusqu'à 12 % de l'objectif fixé. Le risque de pertes subies par l'entreprise est un réel frein à la production. Les gaspillages sont en effet une non-valeur ajoutée au cours du processus. Afin d'apporter des mesures correctives pour diminuer le taux de défectuosité du produit, l'amélioration continue doit être utilisée pour optimiser au maximum la production et minimiser les pertes. Pour résoudre ce problème une recherche a été entamée en se basant sur la méthode Lean six sigma. En premier lieu, le travail s'est concentré sur l'analyse des gaspillages en utilisant la cartographie des flux. Ensuite, la capabilité des processus de fabrication est évaluée. Puis, l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et leurs criticités (AMDEC) est utilisée comme un facteur de base dans l'élaboration du programme d'amélioration continue. Les résultats obtenus montrent que la performance de la qualité est à 2,97 sigma. Il existe 33,67 % des activités de non-valeur ajoutée et 14,2 % des activités non nécessaires de non-valeur ajoutée qui se produisent au cours du processus de fabrication. Sur la base de l'analyse, les défauts du produit, le traitement inapproprié, l'attente et les défauts de fabrication sont les gaspillages qui se produisent fréquemment à travers le processus de fabrication. Le programme d'amélioration continue qui a été développé se base sur la refonte du collecteur de

poussière, l'établissement d'une procédure opérationnelle standard de pesage, l'installation de vibromètre et d'une usine d'azote à proximité.

Une grille d'analyse des articles traités dans ce sens est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6. (a)Grille d'analyse des articles du Lean Mining

N° article	Auteur (s)	Année	Type de mine					Article est basée sur				Proposition de méthodologie de mise en œuvre du LM généralisable				Faisabilité de mise en œuvre du Lean Mining est axée sur
			Fer	Charbon	Acier	Bauxite (Aluminium)	Fluorine te améthyste	Etude théorique	Expérience et connaissance de l'auteur	Expérience des mines	Etude terrain	Prise en compte	Générale	Pour un problème précis	Généralisable à toutes les mines	
1	Hattingh et Keys	2010		X						X		X	X			Génie idustriel doit être une partie intégrante de la mine
2	Steinberg et De Tomi	2010						X				X	X			Modélisation et l'amélioration de la chaîne de valeur minière et l'approche "*Lean Thinking*" permettant de transformer les anciennes pratiques
3	Helman	2012							X							Adaptation des outils du Lean Management à la mine
4	Ade et Deshpand	2012a		X							X					Analyse des activités
5	Ade et Deshpand	2012b		X							X	X		X		Classification des problèmes, la détection des gaspillage doit s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue
6	Muduli et al.	2012						X								Quantification des barrières et obstacles de la green sypply chain management dans les mines
7	Melton	2005									X	X	X			Le Lean est un changement complet de l'organisation
8	Castillo et al.	2014									X	X	X			La mesure de l'impact de la mise en œuvre du Lean Mining montre une forte influence sur la performance organisationnelle minière
9	Indrawati et Ridwansyah	2015	X								X	X	X			L'amélioration continue doit être utilisée pour optimier la production et minimiser les gaspillages
10	Wijaya et al.	2009							X							La réussite du Lean ne doit pas être considérée comme étant seulement une utilisation de ses outils mais plutôt un changement de culture
11	Yingling et al.	2000							X							La mise en œuvre du LM nécessite du temps, de l'implication du top management et des investissements dans la formation
12	Dunstan et al.	2006	X	X		X				X		X	X			L'implication de tout le personnel est nécessaire pour la réussite du Lean à la mine . Le LM doit être instaurée commeétant une approche stratégique pour assurer un changement de culture dans toute l'organisation
13	Mahapatra et Mohanty	2007						X								L'amélioration continue est considérée comme étant un point de départ pour initialiser le Lean dans les processus continus
14	Klippel et al.	2008a					X				X	X	X			Le Lean est un concept dépassant une simple approche de management pour être une approche innovatrice qui peut apporter de la valeur à l'industrie minière
15	Klippel et al.	2008b					X				X	X	X			L'innovation est considérée comme étant le facteur clé permettant d'assurer la survie des entreprises. Le Lean Management, les concepts d'ingénierie minière et de génie industriel peuvent être appliquées comme de nouvelles méthodes de management au sein des mines
16	Mottola et al.	2011						X				X	X			L'automatisation peut être un outil important pour le LM. Gérer la variation par le contrôle des processus en automatisant certaines parties du processus en amont de la mine se traduirait également par un meilleur contrôle des processus en aval. Le défi est d'intégrer simultanément l'automatisation, le contrôle des processus et les concepts Lean au travers la mise en œuvre rationnelle et coordonnée de ces instrumentations
17	Lööw et Johansson	2015						X								Certaines parties sont adaptées à la mine et d'autresnécessiteront une modification ou dépendent du développement technologique futur. Pour être compétitive, l'exploitation minière devra rationnaliser le secteur en mettant en place le Lean et son application lors de la production

La section suivante discutera du type de principe et du type d'outils issus du Lean Mining qui ont déjà été mis en œuvre en contexte minier.

4 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES Principes et outils du Lean MINING mis en œuvre en contexte minier.

Cette section discute des principes particuliers et des outils spécifiques issus du Lean Management et qui ont été utilisé en contexte minier.

4.1 Les principes du Lean Management étendu au contexte minier.

À partir des lectures réalisées, nous avons constaté que tous les principes du Lean Management, ne peuvent être appliqués directement au secteur minier à cause de sa structure différente de celle de l'industrie manufacturière traditionnelle (Helman, 2012).

Suite aux différents articles analysés, nous avons constaté également que l'ensemble des recherches effectuées sur la mise en œuvre du Lean Mining affirme que les principes du Lean Management doivent être adaptés voire réécrits pour pouvoir être utilisés dans le monde de la mine. À partir de la recherche bibliographique que nous avons réalisée, nous avons recensé les conditions d'application de chacun des principes du Lean Management (discutés dans le paragraphe §2.1 de cette section) dans les divers articles sélectionnés :

- *Identification de la valeur client*

  Le premier principe du Lean Management met l'accent sur la satisfaction du client final. Il convient pour cela de l'identifier, de caractériser ses besoins, et d'y répondre avec des coûts et des efforts minimums.

  En ce qui concerne le secteur minier, la plupart des produits miniers ont des qualités et des prix fixés par le marché. Il n'y a donc pas de différenciation des produits entre les industriels (Wijaya *et al.* 2009) et le rôle des clients est bien moins important que celui des marchés boursiers. Certains articles soulignent cependant la nécessité de réduire la variabilité de la qualité du produit et de prendre en compte les exigences du consommateur final (particulier) ainsi que

les caractéristiques de l'ensemble de la chaîne (Yingling *et al.* 2000) afin de satisfaire à la fois les contraintes internes et les exigences externes.

Il est également à signaler que le secteur minier a des clients indirects (société, gouvernement, médias…) dont les intérêts ne concernent pas la qualité du produit mais plutôt la qualité derrière le produit, tels que l'environnement, le bien-être humain, ou la prospérité économique de la société (Wijaya *et al.* 2009).

- *Chaîne de valeur*

  Le Lean Management préconise une analyse profonde des activités et des tâches de l'entreprise afin de distinguer celles qui apportent de la valeur ajoutée au produit final, de celles qui sont inutiles. Pour ce faire, il s'agit d'identifier et d'éliminer les 7 types de gaspillage dans le processus et de standardiser le travail pour réduire la variabilité de l'exécution des tâches. Il convient de plus de cibler les améliorations en fonction de la stratégie commerciale adoptée (Hatting et Keys 2010).

  Une analyse de la réponse à certains des gaspillages est proposée en se basant sur les articles de Yingling *et al.* (2000) et de Wijaya *et al.* (2009):

  - **Attente** : Celle-ci peut être assez importante au sein de la mine, notamment lors du déplacement des équipements mobiles. L'étude des prestations et des coûts doit être effectuée pour déterminer l'utilisation optimale de l'ensemble des ressources (internes ou externes) à mobiliser afin de réduire les différents types d'attente.
  - **Surproduction** : La plupart des produits miniers peuvent être intégralement vendus, et les capacités de production sont souvent limitantes. La surproduction ne semble donc pas être un réel gaspillage.
  - **Processus de fabrication :** Le processus extractif fait appel à différents types d'équipements qui peuvent être dédiés à une opération précise ou polyvalents pour plusieurs opérations. Ainsi, il est primordial de fiabiliser le processus extractif et d'améliorer son taux de disponibilité sinon un arrêt de production peut survenir. Comme les ressources mobilisées sont assez lourdes à déplacer, sur des distances longues, il est nécessaire d'en tenir compte dans la planification afin d'assurer à la fois la variabilité requise des minerais extraits et également de minimiser les ANVA liées aux déplacements des machines.

- **Mouvement** : Les pertes dues à des excès de mouvement et de déplacement (personnel, machines, …) dans l'industrie minière peuvent conduire à des pertes réductibles. Il convient de faire une analyse de poste précise pour pouvoir standardiser et d'automatiser ainsi les opérations (Ade et Deshpand 2012b).
- **Stock** : il est l'un des facteurs de gaspillages les plus difficiles à maîtriser dans l'industrie minière, car la rupture de stock est bien plus pénalisante que le coût des stocks, ce qui conduit à considérer un stock important comme une solution acceptable dans ce domaine (le stock de minerai extrait ne coûte pas grand chose à l'industriel s'il n'est pas utilisé car il ne l'a pas acheté à un fournisseur mais extrait de son gisement) . Pourtant, certains auteurs soulignent les pertes importantes qu'il entraîne, notamment lors des écoulements de stock. Il est ainsi intéressant d'augmenter la fiabilité des équipements afin de pouvoir diminuer ceux-ci.
- **Transport** : Il s'agit de définir le mode de transport adéquat, le dimensionnement des équipements, le lieu de ramassage, la définition de la forme du matériel à transporter…
- **Talent humain** : Il est d'usage de dire que le facteur humain détient 70 % du potentiel d'amélioration dans l'industrie minière. C'est pour cette raison qu'il est primordial de l'impliquer dans la boucle d'amélioration.

- *Typologie des flux*

  L'étude des flux est le sujet le moins traité des articles étudiés, pour une raison simple : lors de l'extraction, les flux sont poussés, c'est-à-dire que les opérations minières suivent le rythme imposé par la production amont (Helman 2012). Or, le Lean Management vise à tirer les flux, et à produire en fonction des commandes. L'industrie minière est connue par la constitution des stocks important le long de sa chaîne pour maintes raison (pallier la variation et aux changements géologiques, assurer le couplage entre l'amont (l'extraction du minerai) et l'aval (préparation des qualités), …). La constitution de ces stocks peut représenter une perte engendrant des charges supplémentaires (Wijaya *et al.* 2009), de gros progrès semblent être nécessaires à entamer dans le domaine. Plusieurs auteurs affirment que les principes manufacturiers sont applicables à l'industrie minière, mais il ne semble pas très réaliste par exemple d'appliquer

les outils du Juste à Temps (Kanban, Heijunka…) à l'ensemble de la chaîne minière, d'où la nécessité d'adaptation des outils du Lean au secteur minier.

Il est par exemple judicieux d'appliquer le JàT (Juste à Temps) et ses outils dans les secteurs plus adaptés à ceux-ci, comme pour les entrepôts et le déploiement des pièces Helman (2012), ou au traitement. D'une manière générale, il semble qu'une adaptation soit nécessaire afin d'appliquer la philosophie Lean aux flux miniers (Wijaya *et al.* 2009).

- *Gestion Ressources Humaines*

  L'ensemble de la littérature concernant le Lean Management insiste sur l'importance de la participation du personnel à tous les niveaux, et en particulier au niveau des opérateurs. Le système Lean repose en effet notamment sur l'amélioration continue (Kaizen), les 5S, ou la Maintenance Productive Totale (TPM) qui sont indissociables d'un engagement fort de l'employé dans son travail. Le Lean Mining doit donc aussi comporter cet aspect essentiel du Toyotisme, et prendre l'ensemble du personnel en compte dans la transformation du management de l'entreprise (Ade et Deshpand 2012b). Pour cela, plusieurs moyens peuvent être considérés :

  - L'approche utilisée dans une mine de charbon Anglo-Américaine (Hattingh et Keys 2010) consistait à placer un ou deux ingénieurs industriels, à utiliser des boîtes à suggestion et à mettre en place une structure de support. Cela avait pour but d'apporter aux opérateurs une bonne compréhension du processus de transformation du management.
  - Il est également important, par des mesures d'incitation et en donnant une sécurité relative de leur travail aux employés, d'assurer un transfert de savoir efficace et standardisé afin d'assurer une amélioration efficace des postes de travail (Yingling *et al.* 2000).

4.2 Les Outils du Lean Management contextualisés au secteur minier

Le Toyotisme et le Lean Management ont chacun à leur tour développé des outils permettant l'amélioration de l'organisation industrielle. La plupart sont utilisés avec succès dans l'industrie manufacturière et dans les services, mais leurs modes d'utilisation peuvent varier selon le secteur ou le poste considéré. A partir d'une lecture des retours d'expérience issus de la littérature scientifique, nous avons listé

les outils classiques du Lean Management (§2.1) afin de préciser leur intérêt et leurs conditions d'applicabilité à l'industrie minière

- *Total Productive Maintenance (TPM)*

  La TPM est un système global de maintenance productive visant la participation à tous les niveaux, y compris au niveau opérateur. Le but est de maîtriser parfaitement l'outil de production afin de fiabiliser les opérations et de pouvoir éliminer certains gaspillages et de rendre possible l'application des principes du Lean (le JIT par exemple).La maintenance est, en raison de l'importance de l'outil de production, une fonction essentielle pour l'activité minière. L'existence d'aléas importants liés à l'environnement difficilement maîtrisable oblige les entreprises à développer une maintenance préventive efficace et des mécanismes de fiabilisation. Il peut d'ailleurs être judicieux d'augmenter la fréquence de maintenance (Helman 2012) lors d'une transformation Lean, afin de pouvoir tirer les flux et diminuer les stocks.

  Certains articles soulignent le problème du manque de coopération entre les opérateurs et la maintenance (Wijaya *et al.* 2009) L'application de la TPM comprend la maintenance autonome, afin de détecter et corriger les problèmes éventuels le plus tôt possible, et d'utiliser le point de vue précieux de l'utilisateur de la machine. Pour cela, il est indispensable de former l'opérateur pour qu'il ait les compétences suffisantes concernant les bonnes pratiques de la maintenance. La coopération entre l'utilisateur final et le développeur d'un équipement est aussi encouragée.

- *Standardisation*

  La standardisation des opérations est essentielle dans une transformation Lean. Comme rappelé par les articles de Wijaya *et al.* (2009) et Hattingh et Keys (2010) la standardisation a plusieurs objectifs :

  - réduire le temps du processus ;
  - établir le temps standard qui est nécessaire pour l'équilibrage des lignes afin de répartir la charge de travail et pour l'interaction entre les différentes sections d'une organisation ;
  - éviter les variations de la manière dont le travail est effectué, facilitant par la suite le contrôle qualité et la détection des problèmes.

Elle reste assez difficile à atteindre pour certaines activités soumises à des aléas comme celles de l'extraction (variation de la topographie, l'épaisseur, la dureté, accidents…). Certains articles préconisent l'adoption des standards correspondant aux conditions les plus défavorables, afin de gagner en stabilité du processus et en amélioration continue ce qu'on perd en travail supplémentaire (Wijaya *et al.* 2009).

La standardisation des opérations a tout de même été appliquée avec succès dans plusieurs cas (Ade et Deshpand 2012b) ; c'est d'ailleurs parfois le principal aspect du Lean Management qui est retenu par les entreprises minières car il permet d'améliorer les conditions d'exploitation des gisements.

5S et Management visuel

Les 5S (ordonner, ranger, dépoussiérer, découvrir des anomalies, rendre évident, être rigoureux) et le management visuel sont des pratiques assurant une méthode de travail rigoureuse très utile à la mise en place du Lean et à l'introduction à ses autres principes Wijaya *et al.* (2009). Leur application permet une détection immédiate des problèmes, et est le premier pas vers une adoption du Lean au niveau opérateur.

Les sites d'extraction sont bien sûr peu adaptés à l'adoption d'une propreté absolue, et il convient donc d'adapter les critères du 5S à chaque étape de la chaîne de la mine en fonction de ses caractéristiques propres (Helman (2012). Certaines activités comme la gestion de stocks de pièces détachées et les ateliers peuvent appliquer directement la norme 5S comme dans les autres industries utilisant le Lean Management parce que leurs activités ressemblent aux postes de travail « traditionnels ».

Si l'application du 5S peut sembler naturelle à la plupart des employés d'une entreprise après les formations nécessaires, elle peut être problématique en cas d'utilisation de la sous-traitance (Wijaya *et al.* 2009). En effet, si la sous-traitance automobile se présente souvent sous la forme de longs partenariats, ce n'est pas toujours le cas dans l'industrie minière, et il convient de se préparer à des difficultés à ce niveau.

- *Kanban et Heijunka*

  Afin de tirer les flux et de lisser la production (Heijunka), l'industrie manufacturière peut utiliser le système de cartes Kanban. Celui-ci permet une remontée d'informations le long de la chaîne de valeur afin d'adapter la

production amont à celle aval.Or, comme cité précédemment (chapitre 1), les flux miniers sont rarement tirés et cela n'est pas l'objectif de la plupart des systèmes miniers (Wijaya *et al.* 2009). En outre, le processus minier est continu, ce qui impliquerait d'adapter le fonctionnement des étiquettes (Kanban). Ainsi, si son utilisation reste intéressante dans les activités annexes de la mine comme la gestion de pièces détachées (Helman 2012), elle semble peu pertinente sur la chaîne des produits miniers.

- *Jidoka*

  Le Jidoka (ou autonomation) est un ensemble de mécanismes d'arrêt ou d'alertes permettant l'avertissement de l'opérateur en cas de fonctionnement d'un équipement sous des conditions non prévues. Elle a par exemple été appliquée à une chargeuse afin de vérifier que l'opérateur extrait le produit de la bonne pile, en l'avertissant dans le cas contraire. De manière générale, compte tenu de la tendance de distanciation de l'opérateur et de l'automatisation des équipements Wijaya *et al.* (2009), le Jidoka semble être une innovation incontournable.

- *Valorisation de l'être humain*

  Avec un turnover élevé, l'emploi d'un grand nombre de personnes (dont de la sous-traitance), l'industrie minière souffre parfois d'un manque de compétences rendant l'implication des opérateurs à la transformation Lean impossible (Wijaya *et al.* 2009).

  Des efforts sont souvent faits afin de réduire ces freins au développement, comme la mise en place de systèmes de tutorat et de formations croisées afin d'assurer la transmission de savoir. L'implication des contremaîtres peut aussi être d'une grande aide pour les formations ne concernant pas la maîtrise des équipements (Helman 2012).

5 SYNTHESE des TRAVAUX.

Suite à cette recherche bibliographique, dont une grille d'analyse est présentée dans le Tableau 7 nous avons déduit qu'il est intéressant de mettre en œuvre l'approche du Lean Management au secteur minier, compte tenu de son apport potentiel important au processus. La proposition d'une méthodologie de mise en œuvre du Lean Mining s'avère être primordiale avec une proposition d'approches et de méthodes qui font du

LM une approche de haut niveau organisationnel basée sur une refonte des pratiques minières traditionnelles et dépasse l'application de la boîte à outils du Lean Management.

Tableau 7. (b)Grille d'analyse des articles du Lean Mining

N° article	Auteur (s)	Année	Principes du Lean					Outils du Lean											Refonte et proposition d'approches et méthodes	Mise en oeuvre de l'approche proposée sur un terrain réel
			Définition de la valeur du point de vue du client	Identification de la chaîne de valeur	Création d'un flux sans perte	Tirer la production	Recherche de la perfection	Standardisation	TPM	SMED	VSM	5S	Management visuel	Jidoka	Kanban	Heijunka	Juste à temps	Implication de l'être humain		
1	Hattingh et Keys	2010		X	X		X	X										X		
2	Steinberg et De Tomi	2010		X	X		X											X		
3	Helman	2012	X	X	X			X	X			X	X				X	X		
4	Ade et Deshpand	2012a	X	X	X		X													
5	Ade et Deshpand	2012b	X	X	X		X	X												
7	Melton	2005	X	X									X					X		
9	Indrawati et Ridwansyah	2015		X			X													
10	Wijaya et al.	2009	X	X	X			X	X			X	X					X		
11	Yingling et al.	2000	X	X			X	X	X	X										
12	Dunstan et al.	2006		X			X		X			X	X					X		
13	Mahapatra et Mohanty	2007	X	X	X							X		X						
14	Klippel et al.	2008a		X	X															
15	Klippel et al.	2008b		X	X															
16	Mottola et al.	2011			X													X		
17	Lööw et Johansson	2015	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		

Helman (2012) confirme la faisabilité d'une méthodologie Lean Mining pour accroître l'efficacité de l'extraction minière. Il affirme également que les premières étapes de sa mise en œuvre devraient se focaliser sur l'analyse des processus miniers, afin de déterminer les outils qui répondront aux mieux aux besoins de l'optimisation des processus d'exploitation minière. Leur proposition d'adaptation des outils du Lean au secteur minier est résumée dans le Tableau 8.

Tableau 8. Adaptation des outils du Lean au secteur minier (Helman 2012).

Méthode/outil	Adaptable ?	Implantation possible
Juste à temps	Oui	Système de commande et tous les entrepôts
Une pièce par flux	Pas directement	Organigramme des machines et des opérateurs, cross-training
Maintenance productive totale	Oui	Tous les véhicules et convoyeurs
5S	Oui	Stockage, ateliers d'outils et autres salles où est tout équipement ou matériel
Kanban	Oui	Entrepôts à la Chambre machinerie lourde, des machines, en bas de l'arbre
Heijunka	Oui	Tous les lieux couverts par Kanban
Amélioration continue	Oui	Mineurs, contremaître

Malgré le travail réalisé par (Helman, 2012), pour de nombreuses entreprises, il existe trop peu de justification pour la mise en œuvre du LM (Detty et Yingling 2000). Ainsi, la première étape dans notre travail consistera à analyser les travaux menés au sujet des approches et méthodologies suivies pour la mise en œuvre du LM. Ainsi, nous avons effectué une recherche bibliographique qui a comme objectif de :

- Définir le périmètre des maillons de la CLM et le degré de pertinence de la granularité pris en compte dans l'approche proposée,
- Définir les décisions de management et de pilotage pris en compte par chaque article au sujet du LM,
- Tester la réalité des expériences empiriques (outils, approche, modèles appliqués…),
- Mesurer la généricité et le caractère réutilisable des travaux proposés.

Yingling *et al.* (2000) annoncent que les outils du Lean Management tels que la TPM (Total Productive Maintenance), la flexibilité de la main-d'œuvre et l'approche d'amélioration continue peuvent être directement appliquées à la mine, tandis que les techniques de gestion des flux doivent être adaptées selon le contexte minier. Dunstan *et al.* (2006) ont annoncé que la démarche des entités de Rio Tinto a permis d'améliorer grandement les processus d'exploitation grâce à une centralisation

des informations (pour faciliter l'identification des problèmes et leurs résolutions par la suite), les 5S, le facteur visuel et la TPM. Les améliorations atteintes au sein des deux mines (de fluorine et d'améthyste) étudiées par Klippel *et al.* (2008a,b) sont dues aux actions menées au sein de ces deux entreprises se manifestent par : la réduction des coûts, l'amélioration de la productivité et de la qualité de l'environnement du travail, ainsi que par la réduction des délais.

Mahapatra et Mohanty (2007) montrent que pour les entreprises à processus discret, les méthodes et les procédures d'amélioration de la productivité sont considérées comme étant le meilleur axe pour démarrer le déploiement du Lean Management. À l'inverse, pour les entreprises à processus continu, comme les exploitations minières, l'amélioration continue est considérée comme étant le point de départ vers l'initiation du LM.

Wijaya *et al.* (2009) annoncent que la réussite du LM est principalement lié à un changement de culture. Hattingh et Keys (2010) insistent sur le fait que le génie industriel en tant que discipline devrait être également une partie intégrante du système minier. Elle peut s'appliquer à tous les aspects de la chaîne de valeur minière, y compris l'exploration et la conception de nouvelles mines ainsi que la production quotidienne et la maintenance des mines existantes ; de l'extraction physique du minerai jusqu'au traitement final du produit. En se basant sur deux approches appliquées dans la mine de charbon et dans le but d'améliorer l'efficacité opérationnelle des entreprises minières, Hattingh et Keys (2010) suggèrent de prendre compte des points suivants :

- Le génie industriel doit devenir une approche intégrée dans les opérations minières,
- La résolution structurée des problèmes doit remplacer les solutions de court terme pour atteindre les objectifs de production,
- L'engagement dans le processus et son appropriation doivent impliquer tout le monde au sein de l'organisation.

Steinberg et De Tomi (2010) insistent sur le fait que la mise en place du LM se base en premier lieu sur une cartographie de la chaîne de valeur permettant de détecter les ANVA. Suite à cette étape, le réseau logistique est amélioré par l'application de modèles managériaux avancés. Steinberg et De Tomi (2010) définissent la transformation des pratiques suite à la mise en œuvre du LM

(Engagement, simplicité, élimination de l'erreur, mesures fortes, collaboration, discipline). Les auteurs ont traité le concept du Six Sigma comme étant un composant clé pour améliorer l'efficacité et trouver des réponses à la différence entre les résultats prévus et réalisés d'exploitation minière. Mottola *et al.* (2011) affirment que l'automatisation peut être un outil important pour le LM. Ainsi, ils affirment que le fait de gérer la variation par le contrôle des processus en automatisant certaines parties du processus en amont de l'exploitation minière se traduirait également par un meilleur contrôle des processus en aval. Mottola *et al.* (2011) examinent ainsi la façon dont l'automatisation et l'intégration des composants du système de production de la mine entraîneraient les processus dans un état contrôlé, d'assurer la création de la valeur depuis l'amont de la chaîne ce qui représente l'un des principes du LM. Helman (2012) affirment que les premières étapes de la mise en œuvre du LM devraient se focaliser sur l'analyse des processus miniers, afin de déterminer par la suite les outils qui répondent le mieux aux besoins d'optimisation des processus d'exploitation minière. Ainsi Helman (2012) proposent une analyse d'adaptation des outils du Lean Management au secteur minier. L'étude menée par Ade et Deshpand (2012b) pour détecter les difficultés rencontrées au niveau des conditions des travaux exécutés par les opérateurs a mené à proposer d'implanter un système mécanique pour transporter la main-d'œuvre. Ade et Deshpand (2012a) ont traité un problème des ressources utilisées (outillages). Ainsi, Ade et Deshpand (2012a) prouvent que suite à la mise en œuvre du LM des gains intangibles ont été atteint : l'augmentation de la productivité avec moins d'effort humain, l'utilisation efficace des ressources, l'amélioration de la culture de travail. Rosienkiewicz (2012) propose un algorithme qui permet de structurer la façon avec laquelle il faut procéder pour collecter les données, les informations et les mesures dans le secteur minier afin de tracer une cartographie des flux.

Selon Melton (2005), la démarche de mise en œuvre du LM peut être décrite comme suit : 1. Commencer par un processus de fabrication. 2. Construire une petite équipe interfonctionnelle. 3. Veiller à ce que les cadres supérieurs démontrent leur soutien. 4. S'assurer que tous les changements sont basés sur un processus rationnel de données structurées. 5. Communiquer efficacement le succès.

L'étude mise en place par Castillo *et al.* (2014), qui n'explicite pas clairement ses fondements, montre que le LM améliore en certains points la performance d'une organisation d'exploitation minière. Des améliorations ont été réalisées sur le flux de

travail, la capacité de production, la fiabilité opérationnelle, la productivité et le temps d'utilisation. Le LM a également une forte influence sur la performance organisationnelle : communication améliorée, désir d'apprendre, accentuation du client et le travail en équipe. Indrawati et Ridwansyah (2015) traitent le cas d'une industrie de minerai de fer qui est incapable d'atteindre son objectif de production. Pour résoudre ce problème, une recherche a été entamée en se basant sur le LM. En premier lieu, le travail s'est concentré sur l'analyse des gaspillages en utilisant la cartographie des flux. Ensuite, l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et leurs criticités (AMDEC) est utilisée comme un facteur de base dans l'élaboration du programme d'amélioration continue. Abdullah (2003) a présenté dans sa thèse une taxonomie des industries de processus et localisé le moment de la discrétisation du processus. Ensuite il a cartographié l'état actuel du système minier puis il a quantifié les résultats obtenus en utilisant les outils du Lean Management. Un modèle de simulation a été utilisé afin d'améliorer la cartographie élaborée et d'évaluer la carte future des flux.

Suite à cette analyse bibliographique, il s'est avéré que les travaux effectués dans le thème du LM s'appuient sur l'un des éléments suivants :

- une mise en œuvre des méthodes de Lean Management en contexte minier sans adaptation,
- une expérience de l'auteur à partir de laquelle une généralisation de la mise en œuvre de cette approche est faite,
- une résolution d'un problème bien spécifique au sein d'une entreprise, qui a permis d'améliorer le rendement à un niveau bien précis du processus et qui est considérée comme étant une mise en œuvre de l'approche LM généralisable à toutes les autres industries,
- des méthodes et des études de cas mais qui n'expliquent pas les choix et les fondements retenus et à partir desquels des conclusions en sont tirées pour prouver la généralisation de l'approche,...

Ainsi, nous pouvons clairement constater que la justification de la mise en œuvre de l'approche LM est traitée d'une façon très limitée, avec une vision très locale basée sur une transition non explicite du Lean Management au LM et que les outils proposés pour l'aide à la décision sont contextualisés et qu'aucune démarche n'est réutilisable. Ce manque de visibilité globale et généralisable de l'approche LM

peut principalement être dû à un manque de compréhension approfondie d'une part de l'approche et d'autre part du contexte minier et de ses interdépendances.

6 CONCLUSION

Pour pouvoir se positionner par rapport aux travaux existant, il était indispensable d'effectuer une analyse bibliographique approfondie. Cette dernière avait comme objectif de faire un benchmark sur les travaux existant sur l'approche Lean Mining et de connaître l'avancée de la recherche dans ce domaine. En effet, l'objet de ce chapitre était d'analyser l'ensemble des articles sur plusieurs aspects : méthodologie suivie ou développée pour la mise en œuvre du Lean Mining, comment et à quel point les travaux existant justifient ou soutiennent cette approche, quels sont et comment les principes du Lean Management ont été transposés dans le secteur minier, quel est le degré d'adaptabilité des outils du Lean Management dans l'industrie minière, quels sont les fondements retenus pour justifier la mise en œuvre de cette approche et dans quelle perspective cette approche a été adoptée.À la fin de cette analyse, nous avons relevé qu'il existe fort peu de travaux dans le thème de Lean Mining abordant les points suivants :

- **Méthodologie adoptée pour la mise en œuvre du Lean Mining** : pour entamer un projet aussi complexe que celui de la mise en œuvre du Lean Mining, nous pensons qu'il est indispensable de définir une méthodologie structurée pour pouvoir éclaircir et encourager les responsables miniers à entamer ce projet. En plus, la chaîne minière est assez complexe, du coup il est primordial d'essayer de décortiquer la méthodologie en des étapes élémentaires pour mener à bien le projet. Les résultats de cette analyse bibliographique justifient le choix du chapitre suivant qui porte sur la proposition de la méthodologie ASCI (Analyse, Spécification, Conception, Implantation) (Ref Tchernev ou Gourgand et Kellert) pour le Lean Mining.
- **Briques logicielles pour l'aide à la décision :** L'interdépendance spatio-temporelle qui caractérise la chaîne minière, rend difficile la prédiction de l'impact de la décision prise. Ce point est un facteur-clé qui explique la démotivation de l'industrie minière à l'égard de la mise en œuvre du Lean Mining. Tant qu'il n'existe pas de travaux concrets permettant de définir en quoi il peut servir concrètement l'industrie minière et comment pon eut-on chiffrer

quantifier son impact sur le reste de la chaîne. Un système d'aide à la prise de décision pour l'industrie minière aura comme objectif de pouvoir reproduire la réalité et par la suite de tester l'impact de différentes décisions en prenant compte de : l'état du gisement, le programme de maintenance, la disponibilité des machines, les demandes à satisfaire… Les décisions prises dans le processus extractif auront comme impact sur : l'évolution des stocks de minerai, l'occupation des machines mobilisées, la satisfaction de la demande…Il s'agira également de tester l'apport par exemple d'un nouvel investissement (achat d'une nouvelle machine, extension d'une usine de traitement, ajout d'une capacité supplémentaire de stockage…) pour pouvoir trancher par la suite en fonction des objectifs fixés reliés à la démarche de Lean Mining. L'apport de la création d'un système d'aide à la décision (chapitre 4) pour l'industrie minière permettra de tester différentes décisions et d'évaluer l'impact de chacune sur toute la chaîne. Si les résultats obtenus ne sont pas faisables ou réalisables, il s'agira dans ce cas de revenir sur les données d'entrée et d'en évaluer d'autres. Ceci permettra de travailler en boucle rétroactive jusqu'à l'atteinte d'une solution permettant d'assurer une confrontation entre l'amont et l'aval de la chaîne et par conséquent d'assurer une performance globale de la chaîne. Ainsi, nous devrions être en mesure de convaincre les mineurs de l'importance du Lean Mining.

- **Nouvelles méthodes d'organisation industrielle :** l'évolution des conditions d'exploitation minière fait que l'industrie minière a besoin de sortir de la logique basée sur de l'expérience et d'avoir le courage de voir autrement et de développer de nouvelles approches qui peuvent ne pas être forcément innovatrices mais au moins nouvelles et qui puissent intégrer une certaine réactivité vis-à-vis des conditions actuelles. C'est pour cette raison que nous avons cherché à travailler dans le cadre de la mise en œuvre du Lean Mining sur une nouvelle approche organisationnelle pour prouver que le changement d'approche est également possible dans l'industrie minière et que cela pourra apporter des gains énormes. Nous espérons que ce travail montrera que si les approches traditionnelles pouvaient résoudre les problèmes, les nouvelles approches peuvent nous garantir des gains énormes sur toute la chaîne. Elles nous permettront d'éviter la génération des problèmes préalablement vécus et également les gaspillages et les activités de non-valeur ajoutée. Nous présenterons effectivement dans le chapitre 5 une nouvelle instrumentation basée sur une méthode d'organisation

industrielle qui permet de supplanter une logique traditionnelle très ancienne et qui a permis de réaliser des gains intéressant dans la logique de meilleure gestion des ressources, d'amélioration de la qualité de minerai produit et de meilleure satisfaction de la demande. Malgré les réticences qui pouvaient y avoir pour adopter la nouvelle approche (ce qui relève parfaitement de la résistance au changement), les mineurs avaient signalé un grand intérêt vis-à-vis de l'approche qui a été validée sur le terrain et qui est même généralisable sur d'autres contextes.

- **Aspect énergétique dans la mine** : Les activités minières sont généralement considérées comme les « coupables » de l'épuisement et la détérioration des ressources naturelles, la génération des problèmes climatiques et des gaspillages, des émissions des gaz ainsi que de la création des perturbations dans l'écosystème. Pendant longtemps, les entreprises minières ont eu tendance à améliorer leurs activités de production sans tenir compte de l'impact environnemental ; c'est encore le cas de beaucoup d'entre elles. Ce type d'industrie a une grande responsabilité à l'égard des ressources naturelles, parce qu'elles doivent assurer, au cœur de leur stratégie, un compromis entre leurs objectifs de production industrielle et les exigences environnementales. Par essence, leur production vise à exploiter une ressource finie. Dès lors, le cœur de métier de cette industrie suppose que l'exploitation du minerai doit être réalisée de manière responsable, en évitant le gaspillage de la ressource primaire. De plus, l'industrie minière consomme différents types d'énergie parfois de manière excessive engendrant des émissions de CO_2 plus fortes que nécessaire. Pour instaurer un management qui permet de répondre d'une part, aux objectifs de production de l'entreprise minière, par la réduction de ses charges et amélioration de son efficacité et efficience à partir de ce que nous avons appelé « Lean Mining » et d'autre part, prendre en compte l'impact environnemental et réduire par exemple l'émission de CO_2 ; nous pensons qu'il est nécessaire d'intégrer dans ce projet l'aspect énergétique (annexe).

Les quatre principales limites repérées dans les travaux existant au sujet du Lean Mining justifient la structuration des chapitres de notre manuscrit. L'objet du chapitre suivant (chapitre 3) intitulé « Méthodologie ASCI (Analyse, Spécification, Conception, Implantation) pour le Lean Mining » est de répondre à la première limite

signalée suite à l'analyse des travaux existant et de proposer un cadre général incluant la dimension aide à la décision dans une perspective de management industriel ; les chapitres (4) et (5) répondent respectivement à la deuxième et à la troisième limite évoquée tandis que l'annexe montre comment la dimension énergétique pourrait être modélisée et prise en compte à l'aide d'une cartographie des émissions de CO_2.

CHAPITRE 3

PROPOSITION DE LA MÉTHODOLOGIE ASCI (ANALYSE, SPÉCIFICATION, CONCEPTION, IMPLANTATION) POUR LE LEAN MINING

1 INTRODUCTION

Les risques associés au processus décisionnel, quel que soit son niveau, dans un projet minier sont élevés en raison du comportement imprévisible du minerai à extraire, de l'importance des investissements pour réaliser un projet, des marchés fluctuants des minerais, des conditions politiques comme géo-minières particulières (Govinda Raj, Vardhan, and Rao 2009). Tous ces facteurs font que l'industrie minière reste réticente à l'égard de la mise en œuvre de nouvelles approches, cherchant plutôt à capitaliser sur l'expérience passée.

La chaîne logistique minière (CLM) est composée de plusieurs entités permettant ainsi de passer du minerai vers un produit fini ou semi-fini. Le processus d'exploitation minier est un processus complexe regroupant plusieurs activités qui interagissent entre elles pour pouvoir fonctionner et atteindre les objectifs fixés. La pression accrue durant les dernières décennies par des contraintes législatives et environnementales comme par le marché pousse les CLM à analyser leurs opérations et éliminer leurs gaspillages sous une contrainte de développement responsable et à devoir affronter une concurrence mondialisée. Notre chapitre cherche à proposer une démarche méthodologique pour l'aide à la décision permettant la construction d'outils issus de la simulation à événements discrets (SED) et de la Recherche Opérationnelle actionnant les leviers du Lean Management dans le contexte de la CLM. Azzamouri *et al.* (2017, 2018) montrent qu'il n'existe pas d'approche actionnable pour le LM combinant amélioration continue des processus miniers et aide à la décision, en plus du niveau de finesse que l'on souhaite modéliser n'est pas pris en compte dans les travaux existants.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie permettant de tester « in vitro » par des approches simulatoires et informatiques les actions de LM associées à une mise en place du LM puis de les mettre en œuvre in vivo si les résultats sont pertinents.

La combinaison des approches mobilisées peut être une avancée pour les exploitants miniers et nous illustrons l'intérêt de notre démarche dans le cadre d'une mine à ciel ouvert d'extraction du phosphate à OCP-SA.

Nous présenterons en premier comment nous intégrons le LM dans la démarche ASCI (Analyse, Spécification, Conception, Implantation) pour l'industrie minière (§2) et sa mise en œuvre au sein de l'industrie du phosphate OCP-SA (§3), avant de conclure (§4).

2 MÉTHODOLOGIE ASCI (ANALYSE, SPÉCIFICATION, CONCEPTION, IMPLANTATION) POUR LE LEAN MINING

Face aux problèmes méthodologiques, conceptuels et empiriques que pose le déploiement d'outils et de démarche de LM, nous proposons d'étendre la démarche ASCI (Gourgand et Kellert 1991 ; Tchernev 1997 ; Fénies 2006) sur les problèmes de LM. Cette démarche sépare, pour un domaine, en l'occurrence les systèmes miniers et pour un type de problème, en l'occurrence les problèmes de LM les éléments qui sont « génériques » dans la phase de modélisation d'un domaine de ceux qui sont contextualisés dans la phase de modélisation d'un système. Cette section présente la démarche d'ensemble que nous mobilisons et caractérise le processus de modélisation du domaine du LM. La section suivante présente la mise en œuvre de notre démarche sur l'axe centre de OCP SA.

2.1 Cadre méthodologique d'ensemble

Le composant méthodologique ASCI (Fénies 2006) constitue un schéma directeur par lequel chacun arrive à travailler de manière individuelle comme collective dans le cadre d'un projet de recherche sur l'aide à la décision. Fénies (2006) définit le composant méthodologique ASCI comme un méta-modèle méthodologique permettant de concevoir des objets de recherche pour l'aide à la décision. La mise en œuvre de ce méta-modèle par la sélection d'un positionnement épistémologique conjuguée avec une ou plusieurs méthodes et approches de modélisation permet de caractériser une méthodologie de modélisation.

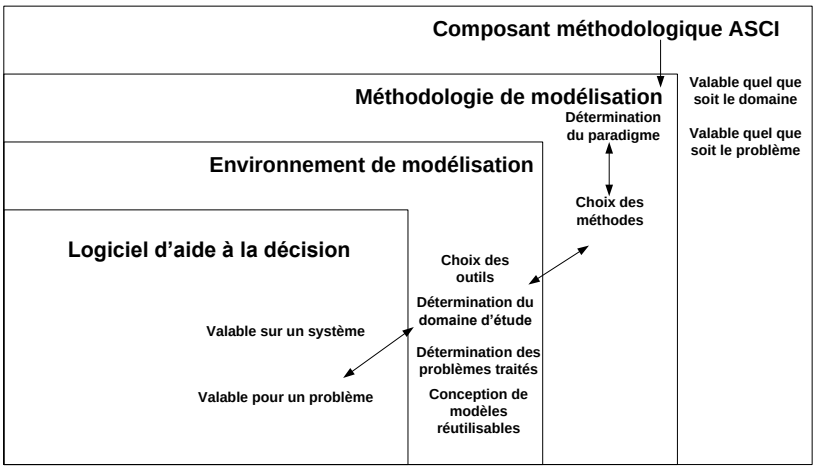


Figure 18. Du composant méthodologique ASCI au logiciel d'aide à la décision pour un système complexe.

Lors d'un projet de recherche, nous supposons que le composant méthodologique ASCI est utilisé par l'ensemble des équipes de recherche travaillant sur le projet de recherche. Ce composant est une trame qui permet à l'équipe de chercheurs, experts en modélisation, de positionner leurs travaux (travaux dédiés à un système donné, ou inversement travaux valides pour l'ensemble du domaine) et d'organiser d'un point de vue méthodologique un programme de recherche sur les modèles et outils d'aide à la décision pour le domaine étudié. La démarche ASCI propose une démarche générique (indépendante du domaine étudié) qui à l'aide d'un enchaînement de tâches permet de constituer le modèle générique de connaissance (obtenu pendant les étapes d'analyse et de spécification en comparant les similitudes entre les systèmes appartenant au domaine (Sarramia 2002) de cette classe de système et de réaliser la bibliothèque de composants logiciels pour une famille de problèmes pendant les phases de conception et d'implantation. Ainsi, dans ASCI :

- Phases d'analyse et de spécification sur le domaine expliquent comment formaliser et modéliser de manière générale pour le domaine (dans notre cas les systèmes miniers) ; le résultat de cette phase est un modèle de connaissance générique exploitable pour tout système de la classe ;
- Phases de conception et d'implantation expliquent comment on va pouvoir produire des briques logicielles pour l'aide à la décision (dans notre cas, comment nous allons pouvoir coupler des modèles contenant approche de simulation sur le LM).

Le modèle de connaissance générique pour une classe de système (un domaine) se décompose en trois sous-systèmes :

- Sous-Système Physique (SSP), constitué de l'infrastructure du système ;

- Sous-Système Logique (SSL) qui représente toutes les entités de flux (financiers, humains, matériels) ;
- Sous-Système Décisionnel (SSD) qui contient les règles de gestion et de pilotage des moyens physiques et agit sur le sous-système logique et le SSP (les règles de gestion, l'attribution des ressources, l'attribution des moyens de transport…) pour assurer la gestion et la maîtrise des processus et par conséquent satisfaire les objectifs du système.

La bibliothèque de composants et le modèle de connaissance générique sont ensuite exploités par exemple pour la construction d'un outil d'aide à la décision pour un système particulier de cette classe de systèmes. À partir de cette démarche méthodologique, la construction et l'exploitation du modèle de connaissance d'un système spécifique et de modèles d'action (programmes informatiques dédiés au système) dans un contexte d'aide à la conception et à la décision, sont appelées processus de modélisation.

La Figure 19 présente l'instanciation du composant méthodologique ASCI pour produire cette méthodologie de modélisation. Ainsi, la partie de gauche présente la phase de modélisation du domaine tandis que la partie de droite présente le processus de modélisation d'un système du domaine. Les autres paragraphes de cette section proposent les concepts valables sur le domaine du LM tandis que le chapitre 4 présentera le résultat de la mise en œuvre de notre démarche sur le système réel constitué par la supply chain minière de l'axe centre de l'OCP.

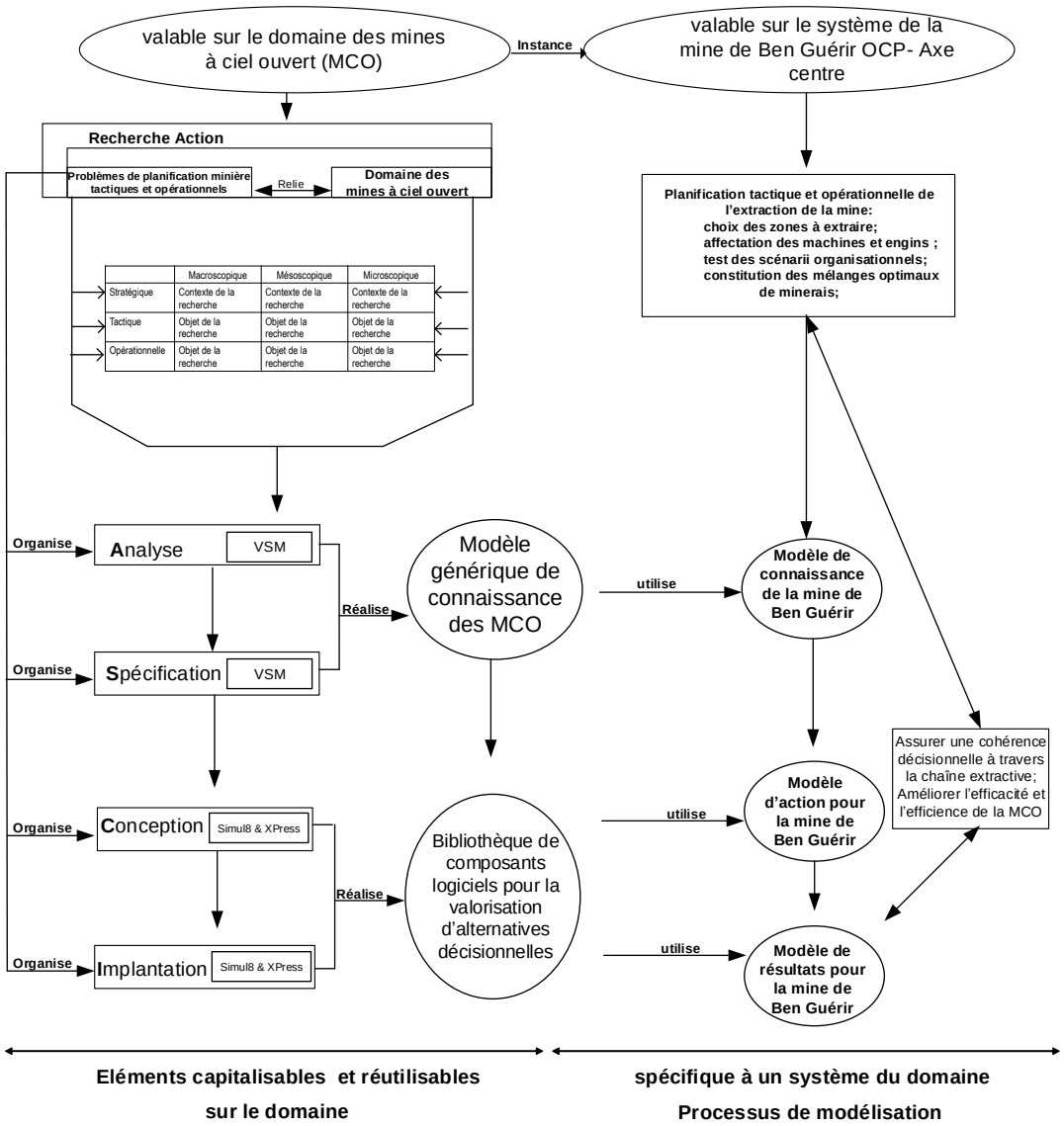


Figure 19. Instanciation du Composant méthodologique ASCI pour la méthodologie par processus multiples et incrémentiels dans le contexte de notre projet de recherche.

2.2 Analyse et Spécification pour le domaine du Lean Mining

Nous définissons en §2.2.1 l'ensemble des sous-systèmes composant la chaîne minière, ensuite en §2.2.2 les relations liant ces sous-systèmes entre eux. Nous élaborons en § 2.2.3 la définition des clusters composant la chaîne minière avant de proposer la démarche « *FALM* » en §2.2.4.

2.2.1 Définition des sous-systèmes composant la chaîne minière

Nous définissions en suivant la méthodologie ASCI les sous-systèmes composant la chaîne minière (Figure 20).

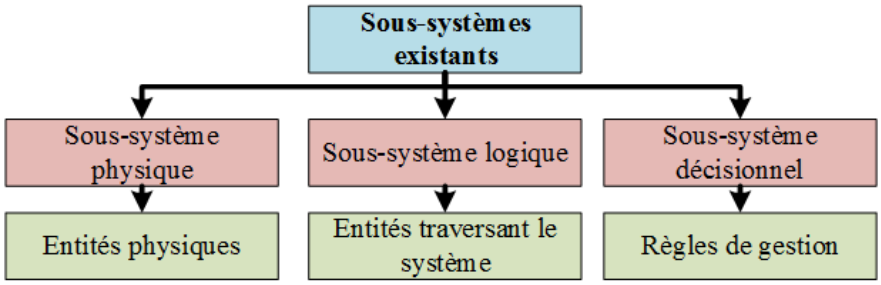


Figure 20. Définition des sous-systèmes composant la chaîne minière.

Nous décomposons le système extractif global en trois sous-systèmes :

- **Sous-système physique :** représente l'ensemble des entités physiques qui composent le système et contribuent fortement à sa dynamique. Il comprend l'ensemble des unités de fabrication et de stockage, leurs répartitions géographiques et leurs connexions, la description de l'équipement de manutention et l'emplacement des capteurs et des actionneurs. De plus, il modélise les trajectoires des matériaux (Kellert *et al.* 1997). Ainsi, une entreprise minière avec des réserves aussi importantes que possibles ne peut jamais faire sortir ses produits sans qu'il y ait un patrimoine physique qui contribue à l'extraction du minerai. Ce SSP se manifeste par des ressources matérielles et immatérielles : de grosses machines et engins qui sont dédiés et/ou partagés entre les opérations élémentaires d'extraction, des zones de stockage des minerais de base ou des produits fini/semi-fini, des convoyeurs et moyens de manutentions liant les différentes entités, des systèmes d'information ainsi que des ressources humaines qualifiées,
- **Sous-système logique :** est composé de nomenclatures et de gammes de fabrication, de la génération et de l'administration des ordres de fabrication. Les entités appartenant au SSL et composant les flux du système sont, d'une part, des composants (flux de matières) et des lots de composants, et, d'autre part, des ordres de fabrication, des ordres de livraison, etc (Kellert *et al.* 1997). Au sein d'une entreprise minière, cela peut englober l'ensemble des éléments qui circule dans le système : les minerais de base, les produits semi-finis, les produits finis ou même les rebuts qui sont générés également sous forme d'outputs du processus (qui sont susceptible d'être réexploités). Or, la préparation de ces produits peut ne pas suivre

une nomenclature figée comme c'est le cas des autres industries. Ceci est dû à une variation spatio-temporelle des caractéristiques des minerais qui pousse à travailler avec des mélanges dynamiques pour pouvoir réduire les stocks et les ANVA (§4.3.2). La génération du SSL ne peut avoir lieu sauf si le SSP existe.

- **Sous-système décisionnel :** les SSP et SSL ne peuvent fonctionner que s'il existe des règles bien précises qui les gèrent, sinon une production aléatoire se générera. Il est composé de l'ensemble des politiques de gestion et des règles de décision (planification de la production, planification des besoins en matériaux, contrôle et surveillance de la fabrication et de la manutention) (Kellert *et al.* 1997). Au sein de la mine, ce sous-système inclut l'ensemble des règles de gestion définissant la logique et le fil conducteur à suivre dès le premier stade opératoire du processus extractif. Cela permettra d'assurer la cohérence décisionnelle entre les différentes entités de la CLM et également de garantir la satisfaction du client tout en prenant compte des contraintes du processus. Le SSD englobe l'ensemble des décisions liées aux zones à extraire (qui doivent implicitement permettre de constituer les commandes clients), les affectations des machines et la planification de leur maintenance, le stockage et le déstockage des minerais de base et des produits…

2.2.2 Relation entre les trois sous-systèmes composant la chaîne minière

Les sous-systèmes définis dans §2.2.1 entrent dans une relation d'interdépendance forte qui rend la gestion du système global sensible à tout changement dans l'un des sous-systèmes. Le système extractif global se base principalement sur l'infrastructure, ce qui représente le pilier physique de l'organisation. Cette infrastructure au sein de l'industrie minière est composée de maintes ressources de différentes natures : minières, matérielles, immatérielles et humaines. Ces composants ne peuvent entrer en jeu sauf s'il existe des manœuvres qui peuvent être définies par ce qu'on appelle les règles de gestion. Ces dernières assurent l'affectation de l'infrastructure disponible dans la CLM et permettent de les faire mobiliser dans une perspective de la garantie d'une cohérence décisionnelle entre les différentes entités. À l'égard de ces règles de décision, nous avons les flux qui circulent à l'intérieur de la CLM et qui sont de différents types. Ces flux sont configurés par les règles de gestion et réalisés par l'infrastructure du système global (Figure 21).

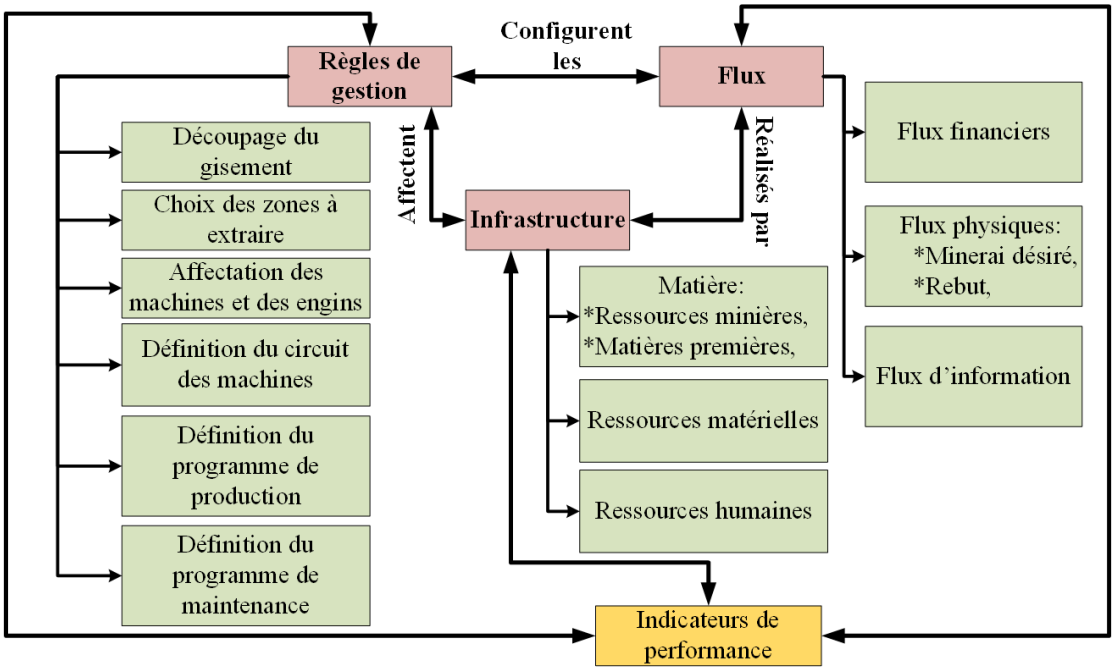


Figure 21. Interaction entre les sous-systèmes composant la chaîne minière.

2.2.3 Définition des rubriques/entités/clusters composant la chaîne minière

Dans le cadre du déploiement de l'approche Lean Management au sein de la mine et en se basant sur ses principes, il est primordial en premier lieu de définir la valeur-client pour laquelle le client est prêt à payer. Deuxièmement, il s'agit de définir la chaîne de valeur c'est-à-dire l'ensemble des activités et des opérations menant à la valeur attendue par le client. Toute activité qui sort de ce périmètre est considérée comme étant une ANVA pour le client. C'est pour cette raison qu'avant d'entrer dans la phase d'analyse du système minier, il est primordial de présenter et de comprendre les entités qui entrent en interaction dans la chaîne extractive.

La CLM est composée dans la plupart des cas de plusieurs stades ou opérations élémentaires assurant maintes fonctionnalités afin de passer de la ressource minérale brute au produit semi-fini ou fini prêt à être utilisé par le client interne ou externe. Cette chaîne est composée en grande partie des éléments suivants : 1. la phase d'extraction du minerai qui se base sur différentes opérations élémentaires exécutées par des machines dédiées ou polyvalentes. À ce stade nous pouvons également inclure la phase de traitement mécanique ou de broyage consistant à éliminer les grains de grande dimension. 2. La fonction de constitution des mélanges ou ce qu'on appelle le « blending » permet de préparer à partir des couches de minerai extraites des qualités ou des produits (semi-fin ou fini) respectant des spécifications bien précises exigées

par le client. 3. Le stockage du minerai de base pour un éventuel blending ou du produit fini pour expédition. 4. Traitement aqueux ou thermique pour l'enrichissement du minerai. 5. Traitement ou valorisation chimique visant à produire des produits ayant une transformation chimique importante. 6. Le transport du minerai, du produit semi-fini ou fini se présente sous différentes formes et pouvant lier les différentes entités.

Ainsi, la chaîne logistique minière peut être considérée comme étant une réunion de plusieurs rubriques ou entités que l'on peut qualifier également de « clusters ». Chaque « cluster » représente une fonction principale pouvant ou pas composer la CLM. Pour chaque « cluster » nous définissons l'ensemble des composants pouvant tous ou en partie assurer cette fonction principale (Figure 22).

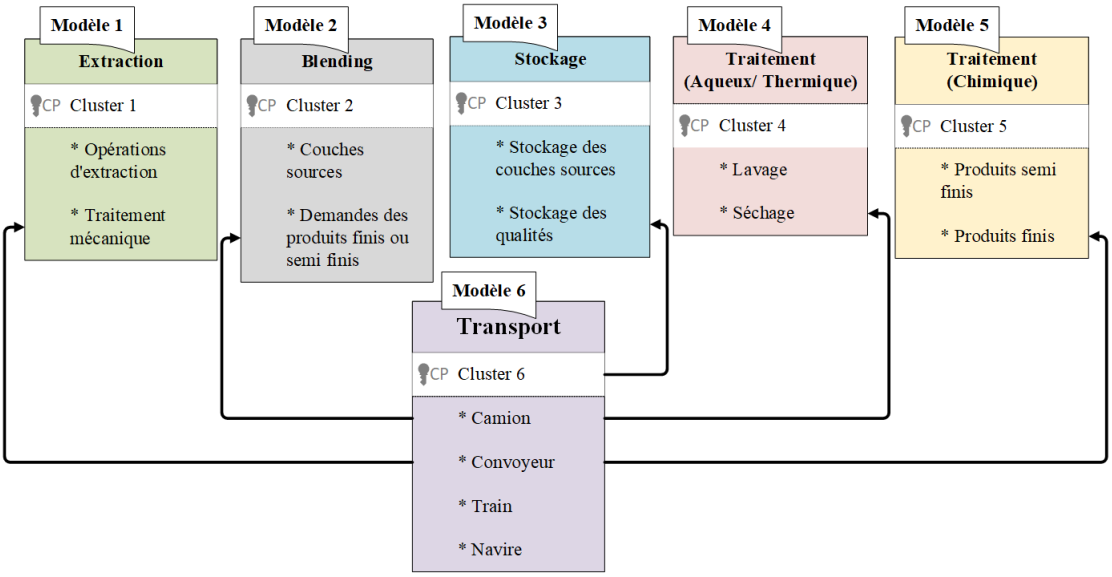


Figure 22. Définition des clusters processuels composant la chaîne minière.

Ainsi, la CLM est une réunion de différents types de flux liant les entités composant la chaîne étudiée. Une meilleure gestion de cette dernière nécessite une connaissance pointue de l'ensemble des interactions existant afin d'assurer une cohérence entre les clusters. Or, la complexité de la chaîne rend difficile la prédiction de ces incohérences, d'où l'intérêt de proposer des outils et des modèles informatiques basés sur la simulation ou l'optimisation au niveau des différentes rubriques pouvant aider à une meilleure prise de décision. Dans notre cas, nous avons développé des modèles pour les clusters 1 et 2 (§4.3.1 et §4.3.2) ce qui fera l'objet du Chapitre 4 et 5 respectivement.

.

2.2.4 Caractérisation de la démarche « *FALM* »

La plupart des industries minières hésitent d'entamer des projets du Lean Mining à cause de plusieurs facteurs relevant principalement d'un manque (1) : de clarté, d'explication et d'études bien approfondies sur le concept du Lean Mining dans sa logique d'approche d'amélioration de la CLM ; de clarté sur la démarche englobant toutes les étapes à suivre pour la réussite de ce projet ; d'exemples réels et concrets sur des entreprises qui ont réussi ce projet ; de moyens de mesure et de prédire les résultats pouvant atteindre suite à la mise en œuvre de cette approche ;… C'est pour cette raison qu'après avoir défini l'ensemble des sous-systèmes constituant la chaîne minière (§2.2.1), les relations d'interdépendances qui existent entre eux (§2.2.2) ainsi que les rubriques/entités/clusters pouvant tous ou en partie composés une CLM bien particulière (§2.2.3); nous présenterons dans ce qui suit la démarche nommée « *Flow Analysis for Lean Mining » (FALM)* définissant l'ensemble des étapes à suivre pour garantir une certaine rigueur et par conséquent la réussite du projet de mise en œuvre du Lean Mining Figure 23.

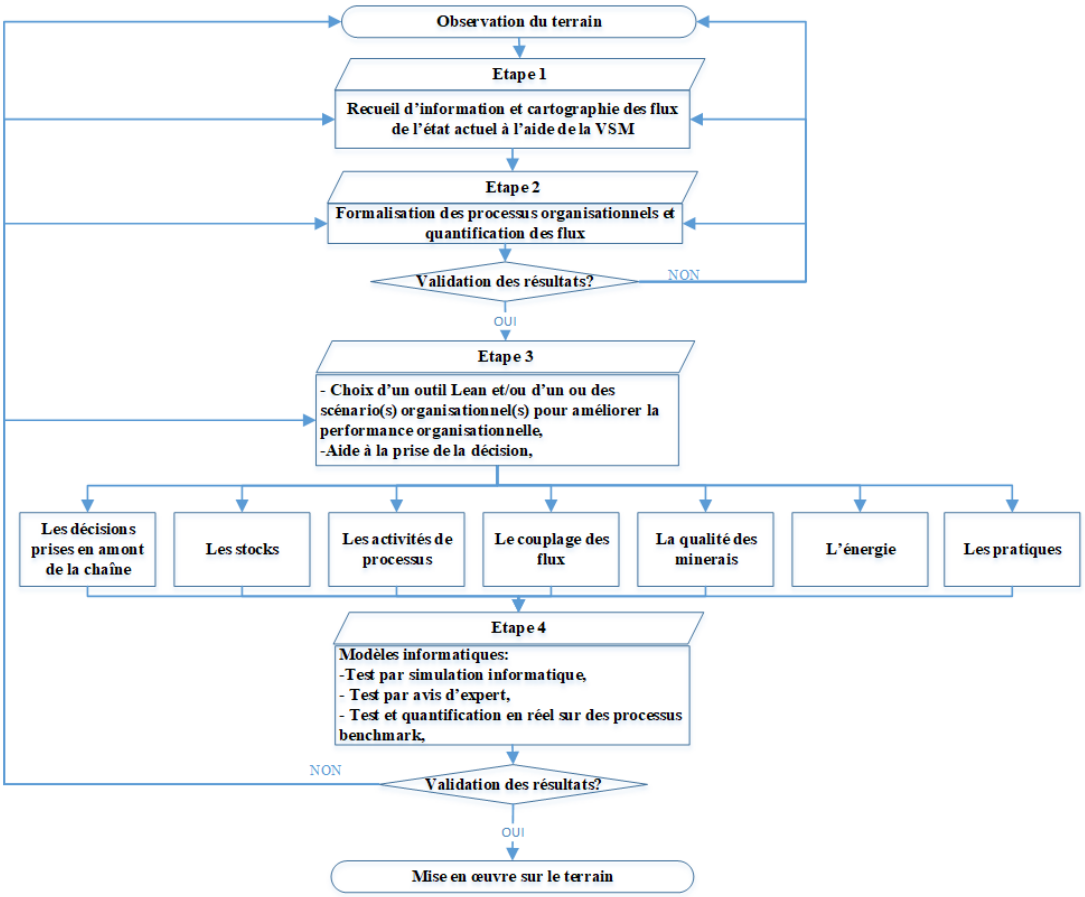


Figure 23. La démarche « *FALM* ».

La mise en œuvre du Lean Mining commence avant tout par une observation approfondie du terrain pour pouvoir mieux comprendre l'existant et les relations qui existent entre les entités et les sous-systèmes (§ 2.2.1, §2.2.2, §2.2.3) afin d'analyser l'ensemble des flux constituant la CLM. Ainsi, le « FALM » se base sur cinq étapes principales :

- **Etape 1** : Recueil d'information et cartographie des flux de l'état actuel à l'aide de la VSM

  La réussite d'un projet est liée principalement au degré de compréhension de la problématique posée pour pouvoir par la suite proposer la solution la plus adéquate. Or, une mauvaise compréhension de la problématique mène à proposer des solutions pour le mauvais problème. C'est pour cela que nous proposons comme première étape dans le développement du projet Lean Mining de commencer par une compréhension et analyse bien approfondie de l'état existant. Il s'agit en premier lieu de réaliser un diagnostic pointu de l'état actuel de toute la chaîne logistique allant de l'extraction du minerai jusqu'à expédition du produit

fini permettant ainsi de comprendre et d'analyser l'ensemble des interdépendances qui existent entre les différentes entités de la chaîne.

Cette étape consiste à se mettre à la place du flux maître et de suivre son enchaînement et l'ensemble des stades et transformations subis. Pour réussir cette mission, il faut se baser principalement sur les observations et les visites du terrain, les interviews avec toute la hiérarchie (ouvriers, cadres, directeurs…), les questionnaires, les rapports et documentations de l'organisation, les réunions (quotidiennes, hebdomadaire…). Cette première phase est considérée comme étant la phase de constitution du « modèle de connaissance » défini comme étant une formalisation dans un langage naturel ou graphique de la structure du fonctionnement de ce système (Gourgand et Kellert 1991). Selon Raghu et Vinze (2007), le modèle de connaissance est l'agrégation d'informations et de données permettant de représenter les interactions, les collaborations et les associations entre les entités du système sous forme de workflow sans qu'il y ait aucun élément de la solution mise en œuvre. Cette étape exige la fiabilité et la cohérence des données représentées ainsi que leur validité dans le temps quelles que soient les évolutions apportées au système lors de son utilisation. La construction de ce modèle nécessite en premier lieu une définition claire et fine du périmètre et des limites du système étudié, de détecter les vrais problèmes existants, la source de ces problèmes et par conséquent de formaliser les processus organisationnels correctement pour une proposition éventuelle de meilleures solutions.

Pour mener à bien cette phase, nous avons proposé de cartographier la chaîne afin de définir les activités de non-valeur ajoutée ainsi que la détection des gaspillages de tous les ordres dispersés dans la chaîne de valeur et de leurs sources.

L'environnement du travail d'une entreprise minière est très large et variable ; ce qui rend l'observation et la prise des mesures très difficiles par rapport à une industrie de production de masse. C'est pour cette raison que la VSM traditionnelle élaborée pour les industries manufacturières, où l'environnement du travail est plus stable, reste limitée. Nous pouvons ajouter également que les VSM élaborées jusqu'à présent dans le secteur minier ne prennent pas en considération l'analyse de la consommation énergétique. Par ailleurs, nous développerons dans la figure 3 un synoptique d'analyse de la CLM représentant l'ensemble des éléments qui doivent être mesurés dans la mine afin de schématiser une carte de l'état actuel qui

nous permettra de détecter les gaspillages à éliminer et les ressources à réduire. Cette cartographie doit prendre compte des éléments suivants :

- Les opérations de transformation : la chaîne d'extraction et de traitement du minerai au sein d'une industrie minière est composée de plusieurs opérations/activités ou stades opératoires allant de l'extraction du minerai, passant par le traitement mécanique et chimique et arrivant à la production du produit semi-fini ou fini. Pour assurer le pilotage global de cette chaîne, il est primordial en premier lieu de l'identifier en détail et de comprendre l'ensemble des interdépendances existantes entre les différentes opérations et activités. En effet, la performance globale de la chaîne dépend de la performance de chaque activité, mais notamment de la performance des liaisons qui existent entre elles. Ainsi, il s'agit dans cette phase de définir une partie du sous-système physique (§2.2.1) définir : l'ensemble des opérations et activités existantes tout au long de la chaîne, les paramètres d'entrée et de sortie à respecter au niveau de chaque opération, les liaisons pouvant ou pas exister entre ces opérations, les contraintes techniques ou fonctionnelles de chaque opération et les difficultés pouvant survenir au niveau de chaque opération.
- Équipements mobilisés : restant toujours au niveau du sous-système physique (§2.2.1), il est primordial de définir le parc matériel pouvant être mobilisé au niveau des opérations de transformation prédéfinies. À cet effet, il s'agit de définir : les différents types d'équipement à mobiliser au niveau de chaque opération, les opérations pouvant ou pas être exécutées par chaque équipement, leurs fonctionnalités, les contraintes et/ou les limites techniques liées à chaque équipement, les paramètres de mesure (rendement, débit, capacité, la vitesse de déplacement, la consommation spécifique en électricité, gasoil, fuel…), les convoyeurs existants (spécificités, vitesses, débit, capacité, acheminements possibles…). Le choix de l'équipement à mobiliser au niveau d'une opération précise a un impact direct sur le temps de traitement. Comme la chaîne extractive est un processus continu, nous ne pouvons pas définir le temps opératoire par unité de produit. C'est pour cela que le temps de traitement au niveau d'une opération dépend principalement de :

  -L'équipement qui va exécuter cette opération : chaque équipement a son propre rendement qui varie en fonction du niveau à traiter,

- Le niveau à traiter : chaque niveau est caractérisé par sa dureté, son état (ondulé, plat…), son accessibilité (niveau inférieur ou supérieur)…

- Zones de stockage : le sous-système physique (§2.2.1) englobe également les stocks. En effet, il est très important de : repérer les différents stocks existants à travers la chaîne, définir la nature des produits stockés et déstockés au niveau de chaque stock, leurs capacités de stockage (capacité minimale et maximale), les contraintes de stockage, la nature d'alimentation de chaque stock (convoyeurs, camions, équipements…), les débits d'entrée et de sortie, le rôle et l'intérêt de chaque stock.
- Les produits et les flux : il s'agit à ce niveau d'identifier les entités appartenant au sous-système logique (§2.2.1). Il est parfaitement nécessaire de définir les différents produits (flux de matières) qui transitent à travers la chaîne : 1. Produits de valeur (produits semi-fini ou fini), 2. Produits de non-valeur (produits extraits mais non vendus, ce qui est nommé dans la littérature minière par le « waste ») ; l'ensemble des flux et des acheminements possibles par produit, le point de départ et d'arrivée de chaque produit, l'ensemble d'opérations et d'activités qui existent entre les deux points, la nature du produit en entrer et en sortie de chaque opération, la nature du produit pouvant être traité par chaque équipement. Chaque opération peut être à la fois le fournisseur de l'opération suivante et le client de l'opération précédente. C'est pour cette raison qu'il est aussi important de définir le flux de passation de commande, sa nature, ses exigences.
- Attentes de l'opération : dans le cadre des principes du Lean Management, il est important d'identifier la chaîne de valeur. C'est pour cela nous devons définir d'une façon très précise les attentes et la valeur de chaque opération en commençant par la toute première étape de la chaîne. Comme chaque opération peut être considérée comme étant le client de l'opération précédente et le fournisseur de la suivante, il s'agit de définir pour chacune d'entre elles : ses inputs, ses outputs, ses paramètres, ses attentes par rapport à l'opération précédente, ce qu'elle doit assurer pour l'opération suivante. Ainsi, nous pouvons définir les exigences de chaque opération et par conséquent de détecter d'éventuelles sources de problèmes et de gaspillages.

- Indices de performance : chaque opération composant la chaîne extractive a : 1) une valeur ajoutée pour l'amont et pour l'aval suite à l'accomplissement de son objectif ; 2) pour accomplir sa mission, elle a besoin des ressources (l'être humain, les équipements, l'information, les ressources financières) ; 3) la réunion de 1 et 2 nous mènent à l'obtention des résultats spécifiques. L'évaluation de chaque opération en prenant compte ces trois éléments représente la mesure de la performance. Ainsi, la mesure de la performance globale au niveau d'un stade opératoire est basée sur trois principaux éléments : la pertinence (le rapport entre les objectifs initiaux et les ressources acquises pour les atteindre), l'efficience (le rapport entre les résultats obtenus et les ressources mobilisées) et l'efficacité (le rapport entre les résultats obtenus et les objectifs fixés) de l'opération. Afin de détecter les écarts existant et par conséquent de trouver la source des gaspillages permettant de mettre en œuvre l'action correspondante, il est primordial en premier lieu de bien définir ses indicateurs de performance, de les caler selon chaque élément et de veiller surtout à ce que cela soit bien respecté.
- Personnes mobilisées : la cartographie des flux doit également inclure la quantification des ressources humaines. Il s'agit de définir au niveau de chaque opération et activité la nature de la ressource humaine à mobiliser (qualifiée, non qualifiée), son nombre,
- Énergie mobilisée : comme la chaîne de transformation du minerai est composée de maintes opérations et activités ainsi que des équipements variés, la consommation énergétique doit avoir un poids lourd dans les charges de l'industrie minière. C'est pour cette raison que nous avons intégré dans le processus de cartographie des flux l'aspect énergétique qui doit parfaitement être intégré dans le processus de quantification et d'analyse de la chaîne minière. Ainsi, nous devons au niveau de chaque opération/activité et équipement définir : le type d'énergie consommée, la consommation spécifique, les paramètres de mesure de cette consommation, les facteurs pouvant faire augmenter cette consommation.
- Flux informationnel : pour assurer une compréhension plus détaillée de la chaîne, il est fondamental d'identifier le flux informationnel. En effet, un manque d'information ou de partage incorrect d'information entre les

différentes entités de la chaîne contribue fortement à la création des problèmes et rend difficile l'identification des gaspillages et l'analyse de la chaîne.

Une fois tous les éléments prédéfinis ont été schématisés, il est nécessaire de valider la carte élaborée avec les gens du terrain afin de garantir la fiabilité des données recueillies et assurer la pertinence des étapes suivantes.

Une fois la phase de validation de la cartographie de l'état actuel est réalisée, nous passons par la suite à *l'étape d'analyse*. Cette dernière consiste à quantifier sur un horizon temporel significatif et à décor chiquer le :

- Processus extractif du minerai en amont de la chaîne : le processus de planification de l'extraction, l'affectation des équipements, la priorisation des minerais à extraire,
- Processus de traitement en aval situé après l'extraction : le processus de préparation des qualités finies ou semi-finies, le couplage entre ce processus aval et celui d'amont,
- Zones de stockage à travers toute la chaîne : en plus de la quantification des stocks, il s'agit d'analyser le niveau de stockage en relation avec : les opérations, les processus amont et aval parce que le stock peut être défini comme étant un résultat des décisions prises en amont et aval et les expéditions finales. Cette analyse va nous permettre de définir les stocks de non-valeur ajoutée, le degré de sur-stockage existant et de définir par la suite les stocks optimaux permettant à la fois de satisfaire le client et d'assurer un lissage des flux et des stocks bas à travers la chaîne.
- Aspect énergétique à travers toute la chaîne : il s'agit de définir et d'analyser les opérations ou les équipements les plus consommateurs d'énergie et d'identifier les sources de ces problèmes pour proposer par la suite des pistes d'amélioration.

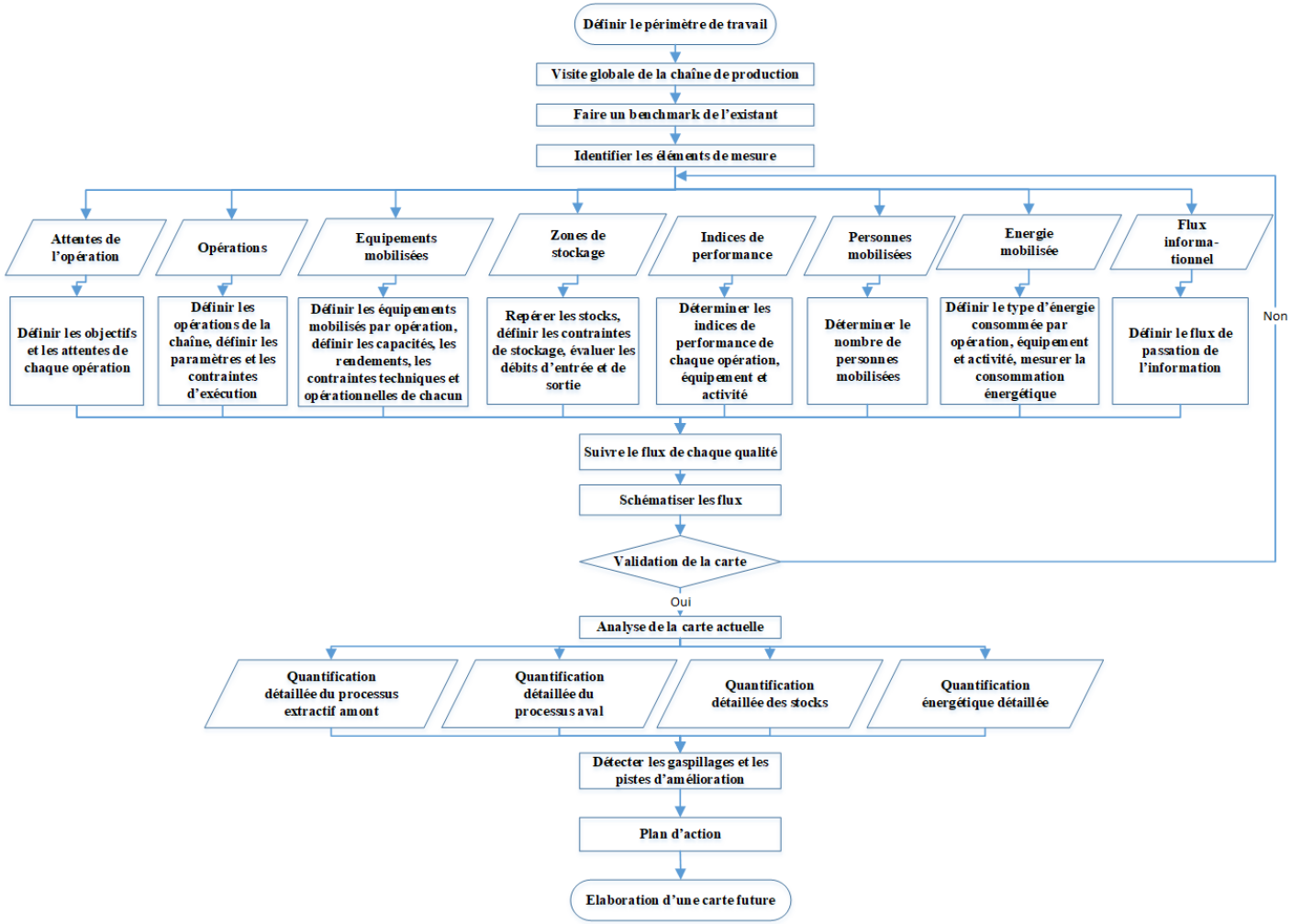


Figure 24. Synoptique d'élaboration de la VSM.

- **Etape 2** : Formalisation des processus organisationnels et quantification des flux

  Les processus organisationnels représentent la colonne vertébrale de la chaîne logistique qui peut grandement augmenter la performance de l'entreprise. C'est pour cela que la recherche de l'identification des dysfonctionnements et de leurs causes au niveau de chaque processus doit prendre une forme dynamique. Par ailleurs, chaque processus doit être accompagné d'un ensemble d'indicateurs de performance qui peuvent servir comme miroir pour refléter la santé du processus. Cette étape consiste à formaliser chaque processus organisationnel (temps de cycle, rendement, taux de disponibilité, le débit…) ainsi que quantifier chaque flux matériel (débit d'entrée, débit de sortie, capacité maximale, capacité minimale…) et informationnel (nature, fréquence…). Ensuite, il s'agit de les analyser afin de localiser les dysfonctionnements et les gaspillages empêchant d'avoir un mouvement continu sans rupture, détours ou attente à travers toute la chaîne logistique.

  Nous nous sommes intéressés premièrement à la quantification des stocks et deuxièmement à la quantification des consommations énergétiques, processus par processus et chantier par chantier. Le premier aspect consiste à instaurer une nouvelle vue pour la mine qui vise à réduire les stocks et éviter la surproduction qui consomme de la ressource naturelle. Tandis que la réduction des consommations énergétiques réduit à la fois les coûts et l'emprunt carbone de l'entreprise minière.

  - **Quantification et analyse des stocks**

    Afin de remédier aux variations et l'instabilité de l'environnement minier, du processus extractif et de la demande, les entreprises minières ont tendance à construire des stocks gigantesques à travers la chaîne. Or, pour répondre à l'objectif du Lean Mining, nous avons réfléchi à briser la logique traditionnelle des stocks et intégrer la notion de réduction des stocks même dans l'industrie minière et de tendre les flux. C'est pour cela nous avons procédé au repérage des stocks existants à travers toute la chaîne, à la quantification de l'alimentation et des prélèvements au niveau de chaque stock, la quantification de la demande finale à satisfaire et pour laquelle toutes les entités doivent contribuer et collaborer pour la satisfaire. Il s'agira

de définir un niveau optimal de stock empêchant la rupture et permettant de produire juste ce qui est demandé en prenant compte de l'ensemble des contraintes de la chaîne (aux variations et l'instabilité de l'environnement minier…). La Figure 25 représente la démarche suivie.

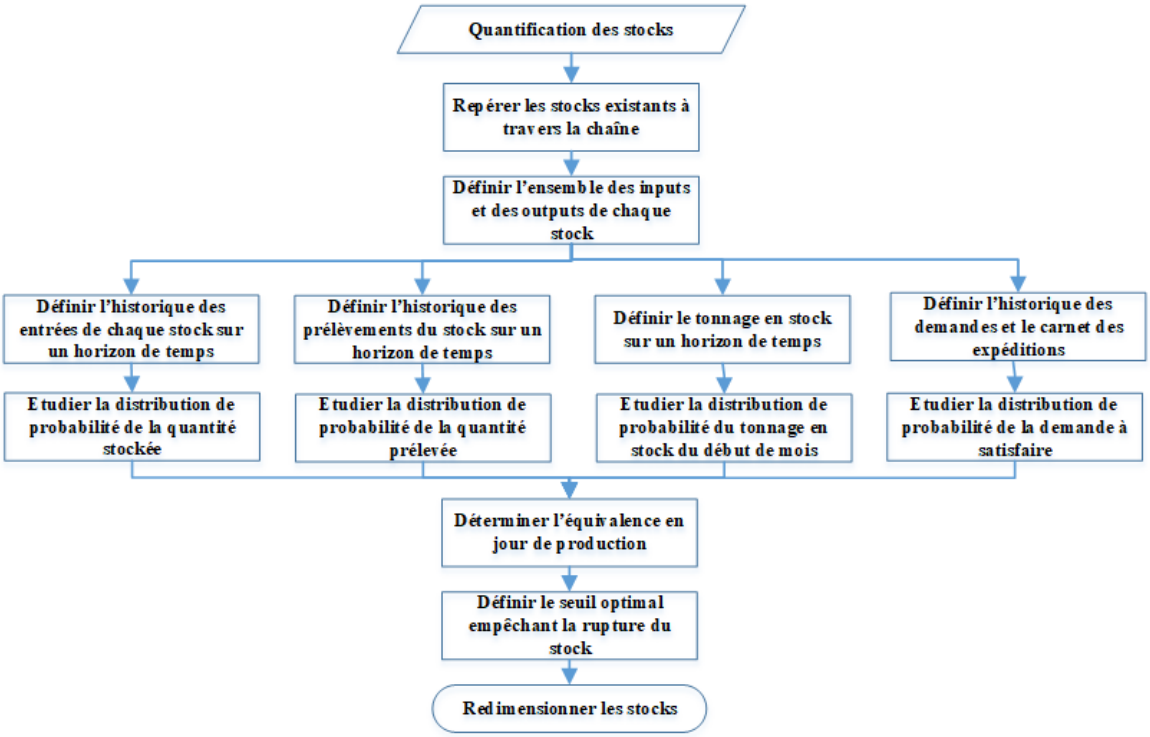


Figure 25. Méthodologie de quantification et d'analyse des stocks.

- **Quantification et analyse énergétique**

  Le Lean Management vise à réduire la consommation de toutes les ressources afin de produire plus, mais la plupart des applications du Lean au secteur minier ne prennent pas en considération l'aspect énergétique. Par ailleurs, les installations d'extraction et de traitement de minerai consomment différents types d'énergie : électricité, eau, gasoil, fuel, gaz naturel, qui représente un pourcentage important des coûts d'exploitation minière. Cette consommation énergétique importante augmente fortement les charges financières de l'entreprise et contribue également à détériorer l'environnement. Dans le cadre d'intégration des entreprises minières dans le développement responsable de l'écosystème, elles ont donc intérêt à réduire la consommation des ressources énergétiques pour réduire leurs coûts et émissions du CO2. Pour cette raison, nous avons proposé la démarche présentée dans la Figure 26 permettant d'assurer un Lean Mining Responsable (la mise en œuvre de cette approche à OCP-SA est détaillée en §3).

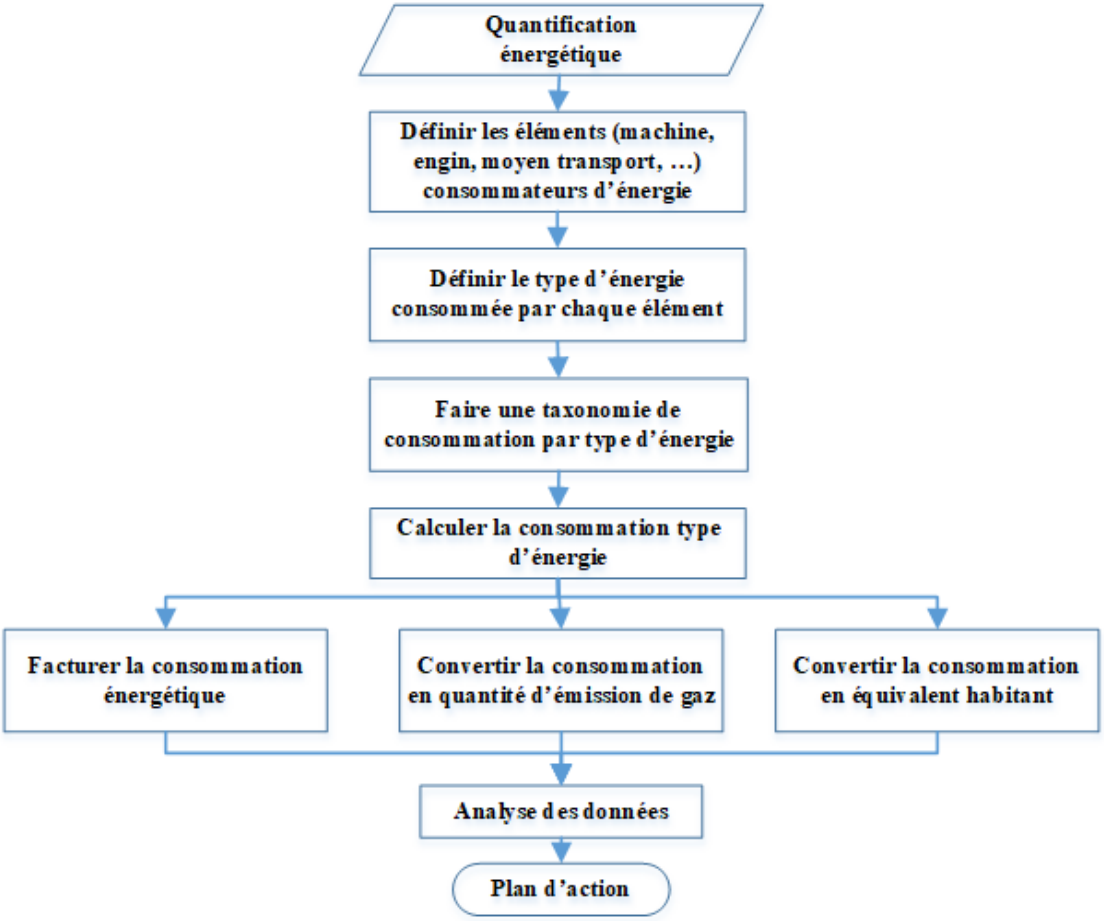


Figure 26. Méthodologie de l'analyse énergétique.

Les mesures des consommations énergétiques au niveau de chaque atelier et installation doivent être converties en termes d'émission de gaz et d'équivalent d'habitants afin de chiffrer le niveau de la consommation énergétique. Par la suite, cette quantification permettra de proposer des plans d'action afin de baisser la consommation énergétique et de réduire l'émission de CO_2 (pour plus de détails voir Chapitre 6).

- **Etape 3** : Choix d'un outil Lean et/ou d'un ou des scénarios(s) organisationnel(s) pour améliorer la performance organisationnelle et la prise de décision

Après avoir analysé les processus organisationnels formalisés et les flux quantifiés ; il s'agit par la suite de choisir, pour chaque problème, un outil de la boîte à outils qui est susceptible de lui apporter une solution. Or, comme la gamme de ces outils au sein de la mine n'est pas aussi suffisante, nous envisageons de tester différents scénarios organisationnels liés au processus extractif, à la gestion

de stock, à la préparation des qualités… et de mesurer leur impact sur la chaîne logistique dans sa globalité et ainsi d'améliorer la performance de l'organisation.

- **Etape 4 : Test**

Cette étape consiste à mesurer et analyser l'impact des décisions prises sur la CL globale avant sa mise en œuvre sur le terrain. Par ailleurs, une fois l'outil Lean susceptible d'améliorer la performance de la chaîne est choisi et /ou l'ensemble des scénarios organisationnels ont été définis, il s'agira par la suite de prouver l'apport et l'intérêt de chaque proposition. Par ailleurs, nous avons proposé trois types d'évaluation de la mise en œuvre d'un outil :

-Test par simulation informatique : ce type d'évaluation se base sur une simulation par outil informatique permettant de se baser sur les exigences des processus de la chaîne et les données statistiques intégrées au début de la simulation pour présenter une vue dynamique de la chaîne logistique. En outre, elle permet de présenter les résultats obtenus, en termes d'impact sur l'efficacité et l'efficience de l'organisation, suite à l'intégration d'un outil ou de scénario déterminé et susceptible d'être simulé.

- Test par avis d'expert : ce type d'évaluation permet de tester l'impact de la décision prise sur la résolution du problème détecté suite à l'expérience requise d'un expert du domaine. Cette expérience pourra servir à définir les avantages et les inconvénients d'une telle intégration et de trancher par la suite dans sa mise en œuvre.

- Test et quantification en réel sur des processus benchmark : cette évaluation permet de tester l'impact de mise en œuvre d'un outil ou d'une décision en faisant un benchmark sur des processus similaires.

La fin de chaque étape fera l'objet d'une phase de validation des résultats. En cas où nous obtenons une solution faisable et réalisable nous passons à l'étape suivante sinon une rétroaction vers l'étape précédente est effectuée.

2.3 Conception et implantation pour le Lean Mining

Les phases d'analyse et de spécification montrent que les systèmes miniers sont totalement différents des systèmes traditionnels de production. Nous avons proposé pour la plupart des clusters identifiés précédemment des briques logicielles pour l'aide

à la décision et des nouvelles méthodes d'organisation industrielles (§2.2.3 représente les clusters processuels, l'objectif de chaque modèle développé et l'interaction qui existe entre eux) :

- **Cluster 1 « Extraction » :** nous avons développé le Modèle 1 en se basant sur la SED pour la planification de la partie extractive. En effet, la prise en compte de l'ensemble des éléments définis précédemment pour la caractérisation de la mine, augmente le nombre de variable. C'est pour cette raison que l'optimisation de la partie extractive est inexploitable avec la prise en compte de la granularité de notre modèle. En effet, la modélisation mathématique est faisable, tandis que sa résolution reste inexploitable (Azzamouri *et al.* 2017, 2018) (§4.3.1),
- **Cluster 2 « Blending » :** nous avons développé le Modèle 2 en se basant sur l'optimisation pour construire les mélanges. En effet, le point de découplage entre le flux poussé en amont et le flux tiré en aval, nous a menés à réfléchir à construire ce modèle qui va permettre de construire à partir des couches existantes dans le stock les différentes qualités demandées par le client en respectant ses exigences en termes de qualité et quantité. Cette logique écrase la logique de nomenclatures figées pour qu'elles soient dynamiques au fil du temps et en fonction des couches extraites sur l'horizon de planification. La construction des mélanges ou le blending dynamique va permettre de réduire les stocks au niveau de la mine et également les ANVA (Azzamouri et Giard 2017, 2018),
- **Cluster 3 « Stockage » :** la CLM est caractérisée par des imprévues et pour remédier à ceci, l'industrie minière a tendance à extraire et à stocker. À partir d'une analyse des stocks nous avons constaté que nous pouvons surmonter cette logique et d'instaurer également au sein de la mine la logique de flux tiré. Ainsi, une partie de ce concept est introduite dans le modèle 2 et un modèle plus global sera développé par la suite,
- **Cluster 4 « Traitement aqueux » et Cluster 5 « Traitement chimique » :** une analyse de ces deux clusters est déjà faite ce qui aboutira à la construction des modèles permettant un routage diminuant les ANVA.
    - **Cluster 6 « Transport » :** nous avons effectué une analyse de ce cluster au niveau de la partie extractive que nous avons introduite dans le modèle 1 et un modèle plus global sera conçu.

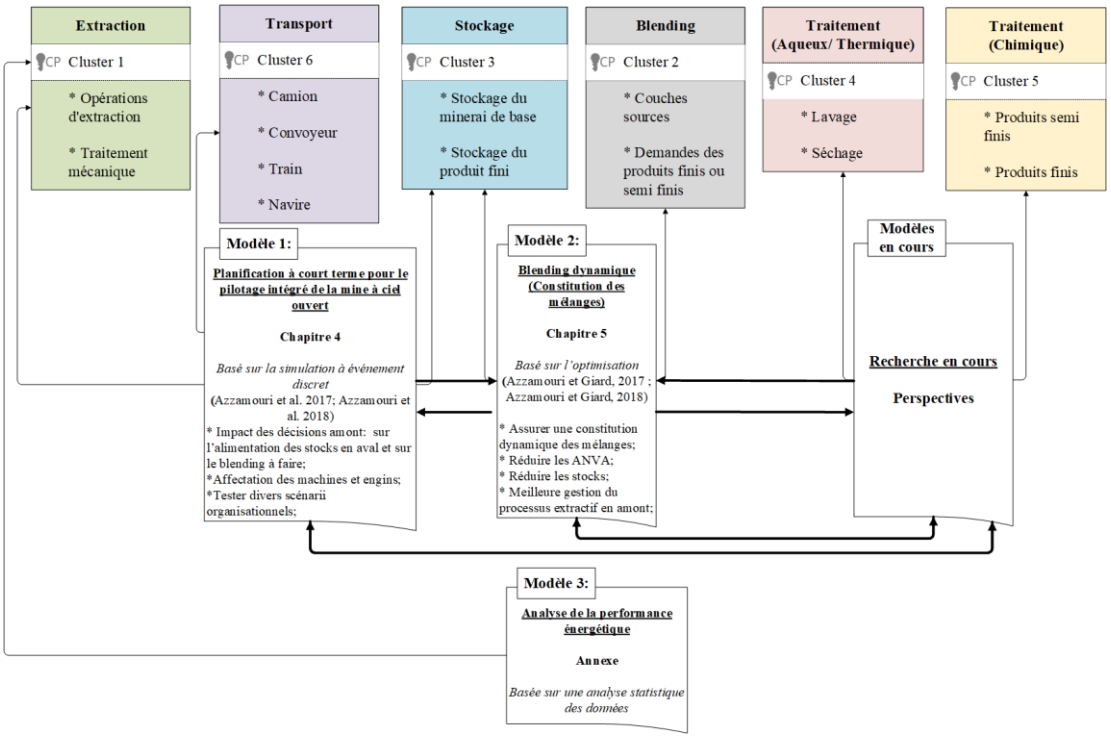


Figure 27. Conception des briques logicielles relativement au cluster processuels.

La mise en œuvre de la démarche sur le système réel de l'axe centre est présentée dans la section suivante.

3 PROCESSUS DE MODELISATION DU SYSTEME MINIER « AXE CENTRE DE L'OCP » A L'AIDE DE LA DEMARCHE ASCI_LM

Le premier paragraphe détaille le contexte de l'étude, tandis que les paragraphes suivants détaillent la mise en œuvre du processus de modélisation d'un système réel à l'aide d'ASCI_LM.

4.1.Étude du contexte : Industrie d'extraction du phosphate à OCP-SA Axe centre

OCP-SA détient un tiers des parts du marché mondial de l'exportation de phosphate sous toutes ses formes. Elle est caractérisée par un enchaînement d'entités productives intégrées partant de l'extraction de minerai de phosphate et allant jusqu'à la livraison au client final en acide phosphorique et engrais. OCP est le premier producteur et exportateur mondial de phosphate sous toutes formes. Il est aussi l'un des plus grands producteurs d'engrais au monde. La chaîne logistique de l'OCP est composée de quatre sites miniers et deux complexes chimiques qui se répartissent sur trois axes : axe nord, axe centre et axe sud. Le travail présenté par la suite est développé au sein de l'axe

centre. Le processus d'extraction au sein de l'OCP se fait à ciel ouvert des couches du phosphate à caractère sédimentaires (sera détaillé en §4.2).

4.2.Construction des modèles de connaissance pour OCP-SA Axe centre

4.2.1. Définition des rubriques et sous-systèmes composant la chaîne minière à OCP-SA

La structure géologique de la mine à ciel ouvert du phosphate à OCP-SA (anciennement Office chérifien des phosphates) est connue par un caractère sédimentaire composé d'une alternance de couche de stérile (sans valeur économique) et de phosphate, dont les caractéristiques physiques et chimiques varient d'une zone à une autre. Le processus d'extraction minier est composé d'un ensemble d'opérations élémentaires dont quelques-unes sont dédiées uniquement au stérile et d'autres au phosphate. Ce processus extractif est réalisé par un parc matériel hétérogène regroupant des machines qui sont dédiées à des opérations élémentaires et d'autres qui sont partagées. L'ensemble des couches extraites sont destinées à être stockées pour qu'elles entrent par la suite dans un processus de blending. Ce dernier consiste à préparer les qualités demandées par le client en termes de quantité et de qualité (composant chimiques). La disponibilité de ces couches est le résultat des décisions prises en amont de la chaîne sur les zones à extraire ainsi que l'affectation des machines. Tous ces éléments composant la mine entrent dans une interdépendance spatio-temporelle qui rend difficile l'évaluation des décisions sur la gestion du processus minier. Ce dernier combine deux types de flux : flux-poussés en amont (partie extraction) et flux-tirés en aval par la demande client (constitution des mélanges). Ce caractère combinatoire des flux nécessite une gestion originale du point de découplage entre les deux maillons de la chaîne (Figure 28).

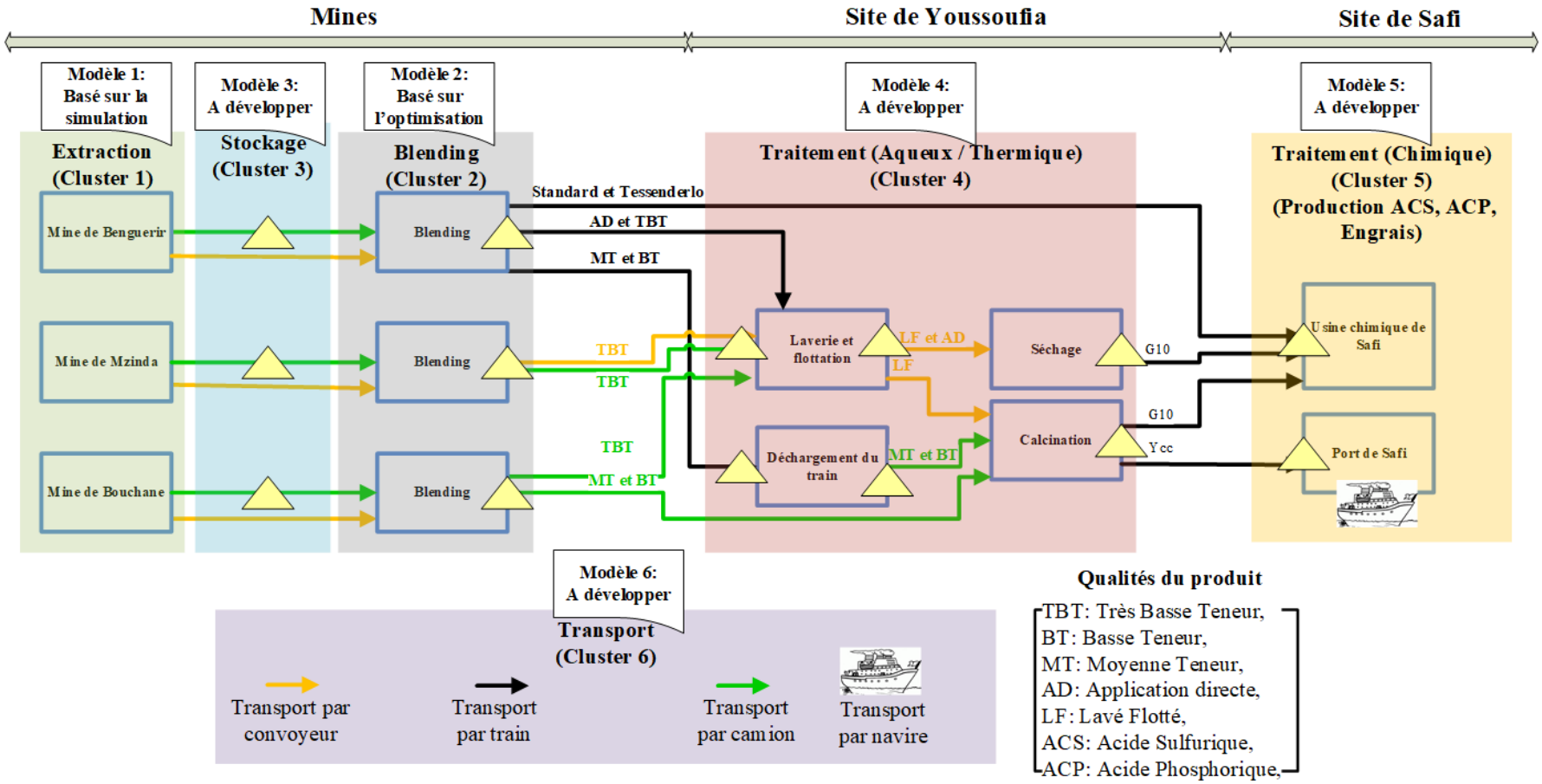


Figure 28. Rubriques composant la chaîne minière à OCP-SA.

La définition des sous-systèmes (Figure 20) composant la chaîne minière et leurs interactions (Figure 21), nous ont été très utiles pour construire une vision claire sur l'ensemble des éléments à prendre compte dans le présent travail au sein de OCP-SA.

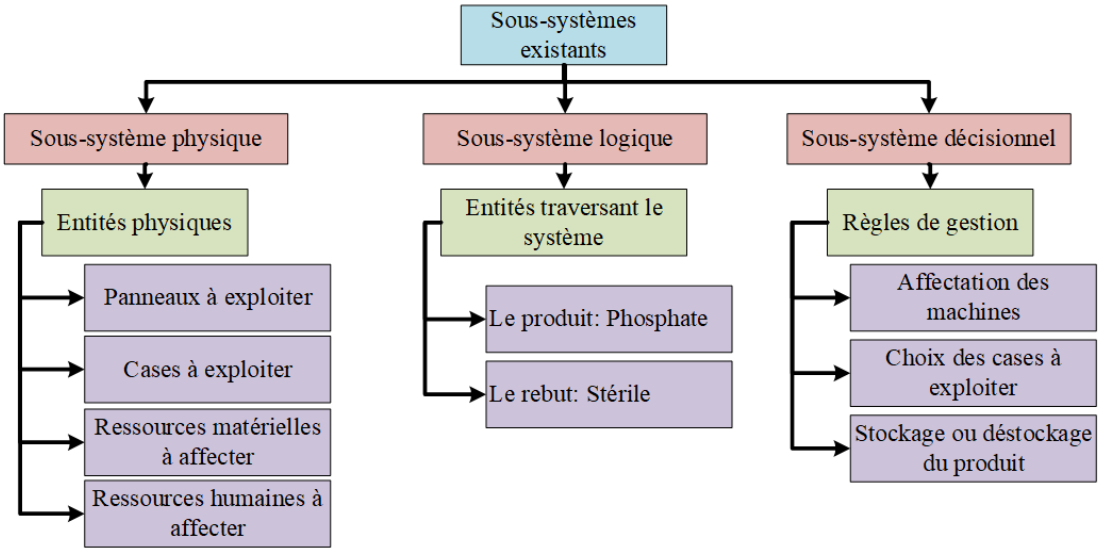


Figure 29. Illustration des sous-systèmes à OCP-SA.

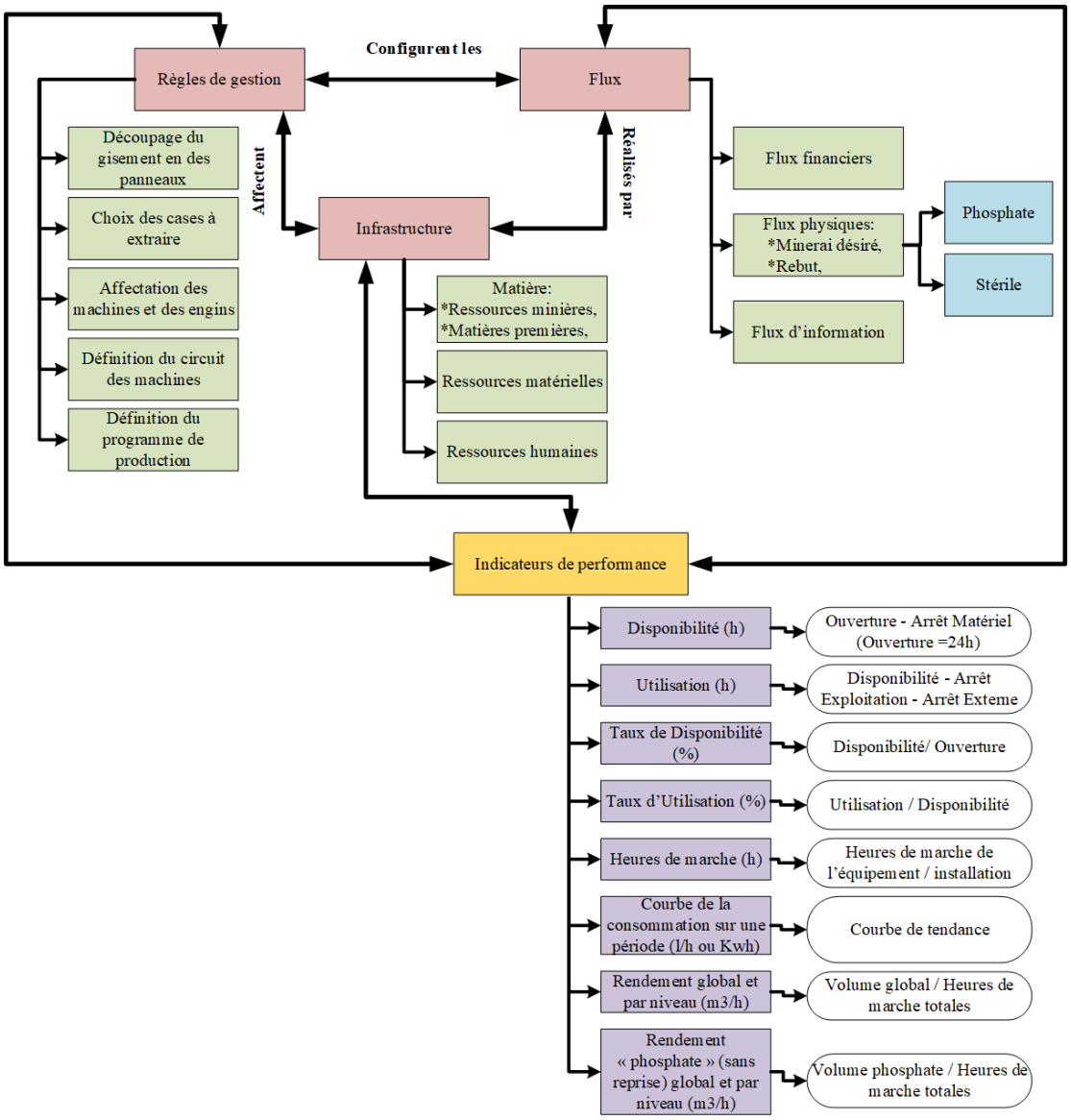


Figure 30. Illustration d'interaction entre sous-systèmes à OCP-SA.

4.2.2. Élaboration de la cartographie des flux dans la chaîne minière OCP-SA Axe centre

Dans le cadre du LM nous avons décidé avant toute analyse ou proposition d'amélioration de procéder par une cartographie de la chaîne allant de l'extraction du minerai jusqu'à la production et l'expédition vers le client en passant par les différents maillons de la chaîne (Azzamouri *et al.* 2 016). Une fois que cette cartographie des flux a été développée, nous avons procédé à une analyse dont les conclusions sont :

- Au niveau de la chaîne logistique globale (du client des industries chimiques à l'exploitant minier) :

- Toute décision prise à un maillon défini a des effets qui se propagent en amont et en aval de la chaîne,
- Forte interdépendance décisionnelle entre les différents sous-systèmes de la chaîne logistique ce qui empêche tout pilotage local et nécessite une vision globale lors de la prise de décision,
- L'information concernant la demande client remonte de l'aval de la chaîne vers son amont (le sens contraire du flux physique) dans une logique de pilotage et de définition des décisions à prendre.

- Au niveau du système minier :
  - Il existe différents types d'opérations élémentaires (aménagement, foration, sautage…) qui sont fortement reliées entre elles.
  - Le caractère sédimentaire de la mine à ciel ouvert (couches superposées) fait que l'accès à une couche n'est accessible sauf si la couche qui est dessus (même si elle n'est pas demandée) est déjà extraite. Ceci mène l'extraction du minerai à suivre en quelque sorte une logique de flux poussé alors que l'aval de la chaîne est caractérisé par un flux tiré par la demande client. Ceci fait que le point de découplage entre ces deux maillons nécessite une intelligence décisionnelle entre le « poussé » et le « tiré ».
  - Le flux poussé en amont de la chaîne minière, la forte variabilité du terrain et les incidents liés à une variation de la demande en aval de la chaîne sont des éléments parmi d'autres qui mènent à la constitution des stocks de minerai au sein de la mine afin de surmonter toute anomalie ou imprévue,
  - L'évolution des stocks de minerai est le fruit des décisions prises en amont de la chaîne. Si on décide de creuser à un endroit donné ceci signifie qu'on pousse la production du minerai apparent ainsi que ceux qui sont en dessous. Or les zones à extraire diffèrent entre elles (en couches du minerai et en caractéristiques chimiques du même minerai). Il s'ajoute à ceci le temps nécessaire pour la préparation de la couche qui dépend également du choix de la zone à exploiter. Il s'agit d'ajouter un autre paramètre qui entre dans l'évaluation des alimentations des minerais qui est l'affectation des machines pour chaque zone. En effet, chaque machine ne peut être affectée qu'à des niveaux précis avec un rendement défini. Le caractère hétérogène du parc matériel mobilisé fait que le déplacement des machines ne se fait pas aléatoirement. Il s'agit de définir des groupements de cases à exploiter afin

d'éviter les déplacements fréquents des machines. Ainsi, plusieurs paramètres entrent en jeu et affectent directement les alimentations des stocks de minerai qui entrent par la suite dans un processus de blending pour assurer la demande client. Nous avons déduit que la prévision des évolutions des stocks de minerai est le résultat des décisions prises en amont et aval de la CLM.

- Les zones prêtes à être transportées au niveau du chantier font également objet d'une décision à prendre. En effet, la décision d'ordonnancement de ces alimentations (minerai à transporter par période) joue fortement sur l'évolution des stocks de minerai de base et par conséquent sur la préparation des mélanges.
- Nous avons également constaté qu'en cas de dépassement des capacités de stockage des inputs, des manipulations particulières (stocks intermédiaires) peuvent être effectuées.

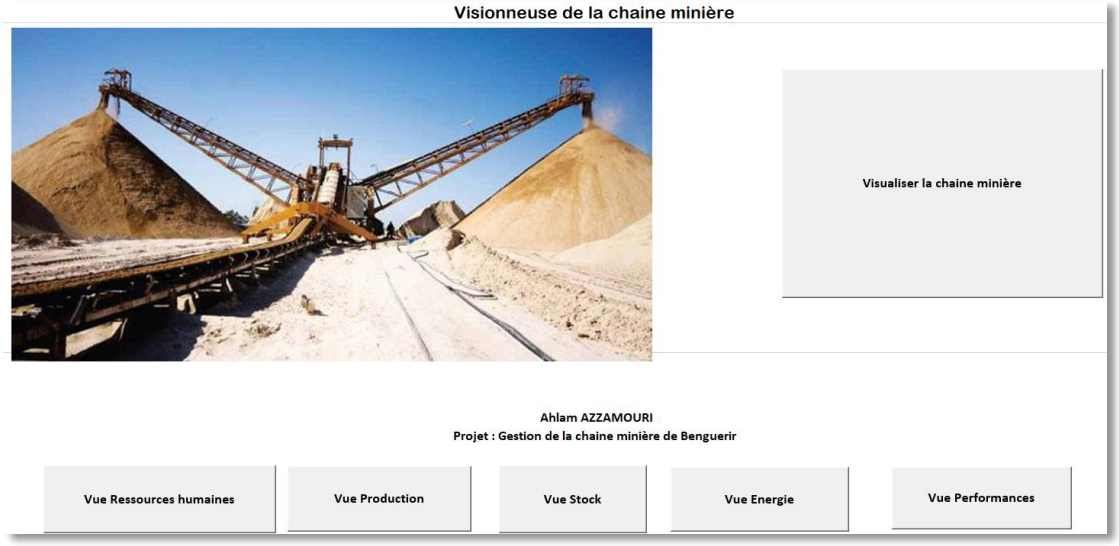
La gestion de la chaîne logistique minière est une combinaison de plusieurs aspects et qui doivent être traités en parallèles, et une gestion réussie de cette chaîne ne peut aboutir qu'à la suite à une analyse de différentes vues. En effet, le Lean mining responsable se base sur une analyse bien particulière qui consiste à voir la chaîne minière à partir de plusieurs angles dont chacun permettra de définir les liaisons, les jonctions qui existent entre les différents processus pour aider à la prise de décisions dans une vision globale. Nous avons, dans le cadre du management visuel, travaillé sur une l'élaboration d'une VSM dynamique basée sur une logique de multiples vues. Le choix de la vue dépend de la spécialité de la personne superviseur. Ainsi l'évolution des paramètres qui lui correspondent sera affichée sur un échéancier bien défini et au niveau de chaque processus. Cette visualisation permettra de détecter et de comparer les spécificités des processus entre eux (nécessité de plusieurs RH, consommation forte d'énergie…) et les anomalies de la chaîne, en plus de définir des plans d'action en fonction de ce qui a été détecté. Le tableau de bord (Figure 33) que nous avons construit est divisé en cinq vues (qui sont susceptibles d'être élargies) :

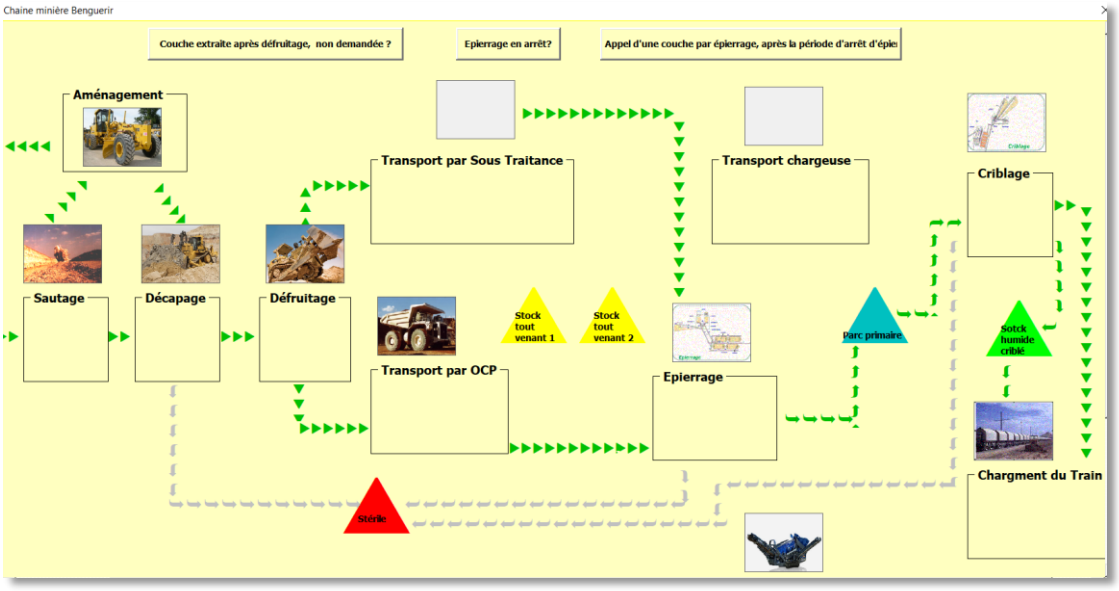
- **Vue sur les ressources humaines** : La CLM mobilise un effectif important de ressources humaines dans les différentes opérations et avec une variation de la qualification exigées par chaque stade opératoire. La vue « ressources humaines » permettra de : visualiser les caractéristiques des ressources humaines exigées par chaque processus, définir le ou les processus qui sont plus critiques, ou qui demande un nombre important d'effectif, définir le niveau de qualification exigé

par chaque opération, ... Les informations nécessaires à ce niveau peuvent inclure : le service, la catégorie (**1.Catégorie 1** : TAMCA (Techniciens Agents Maitrises et Cadres Administratifs), OE (Ouvrier Employé), AP; **2. Catégorie 2** : PM (Petite Maîtrise), HM (Haute Maîtrise) et AP pour la catégorie des TAMCA, PC (Petite Catégorie) et GC (Grande Catégorie) pour la catégorie des OE), le niveau d'ancienneté, le code, la qualification, l'affectation, le processus,…

- **Vue sur l'énergie** : comme la CLM est composée d'un parc matériel important et des ateliers consommant différents types d'énergie à savoir principalement : l'électricité, le gasoil et l'eau. Une mauvaise gestion et un manque de supervision de la consommation de ces ressources génère forcement des charges énormes pour l'entreprise. Par ailleurs, il est primordial de rendre facilement visible ces consommations afin de détecter l'ensemble des défaillances à travers la chaîne. Ainsi, la vue sur l'énergie va permettre d'afficher pour chaque processus les consommations en fonction des engins mobilisés et du type de l'énergie consommée sur l'horizon temporel souhaité.
- **Vue sur la production** : Cette vue nous permettra de visualiser l'évolution de la quantité réalisée et prévue de chaque qualité du minerai sortie au niveau d'un seul processus ou bien à la sortie d'une succession de processus sur un horizon du temps bien précis.
- **Vue sur le stock :** Les industries minières ont tendance à augmenter leurs stocks afin d'empêcher la rupture et de satisfaire complètement le client, mais sans tenir compte de l'impact négatif du stockage inutile du produit dans le stock. C'est pour cette raison que la vue sur les stocks nous permettra de visualiser et de suivre sur un horizon temporel ce qui est stocké, déstocké et ce qui existe réellement au niveau de chaque stock de la chaîne.
- **Vue sur la performance** : La performance de la CLM de l'OCP est mesurée à partir de plusieurs paramètres. Une vue sur la performance des équipements et toutes les ressources mobilisées s'avère intéressante afin de quantifier l'écart entre la performance atteinte et celle prévue pour détecter par la suite les causes de cette différence. Les indicateurs de performance mesurés pour chaque machine et processus au sein de l'OCP sont : Le taux de disponibilité (TD), le taux d'utilisations (TU), l'OEE (overall equipement effectiveness), l'unité d'œuvre (UO), les heures de marche (HM), le rendement (Rend).

Nous avons développé une application informatique (sous VBA dans le cadre d'un projet informatique en 2ème année du cycle ingénieur) permettant de visualiser la chaîne sous ces différentes « vues ». Cette logique de vues multiples permettra de faciliter la détection des gaspillages à travers la chaîne et d'assurer par conséquent une logique de pilotage intégré de la CLM et de contribuer notamment à l'amélioration de sa performance globale.





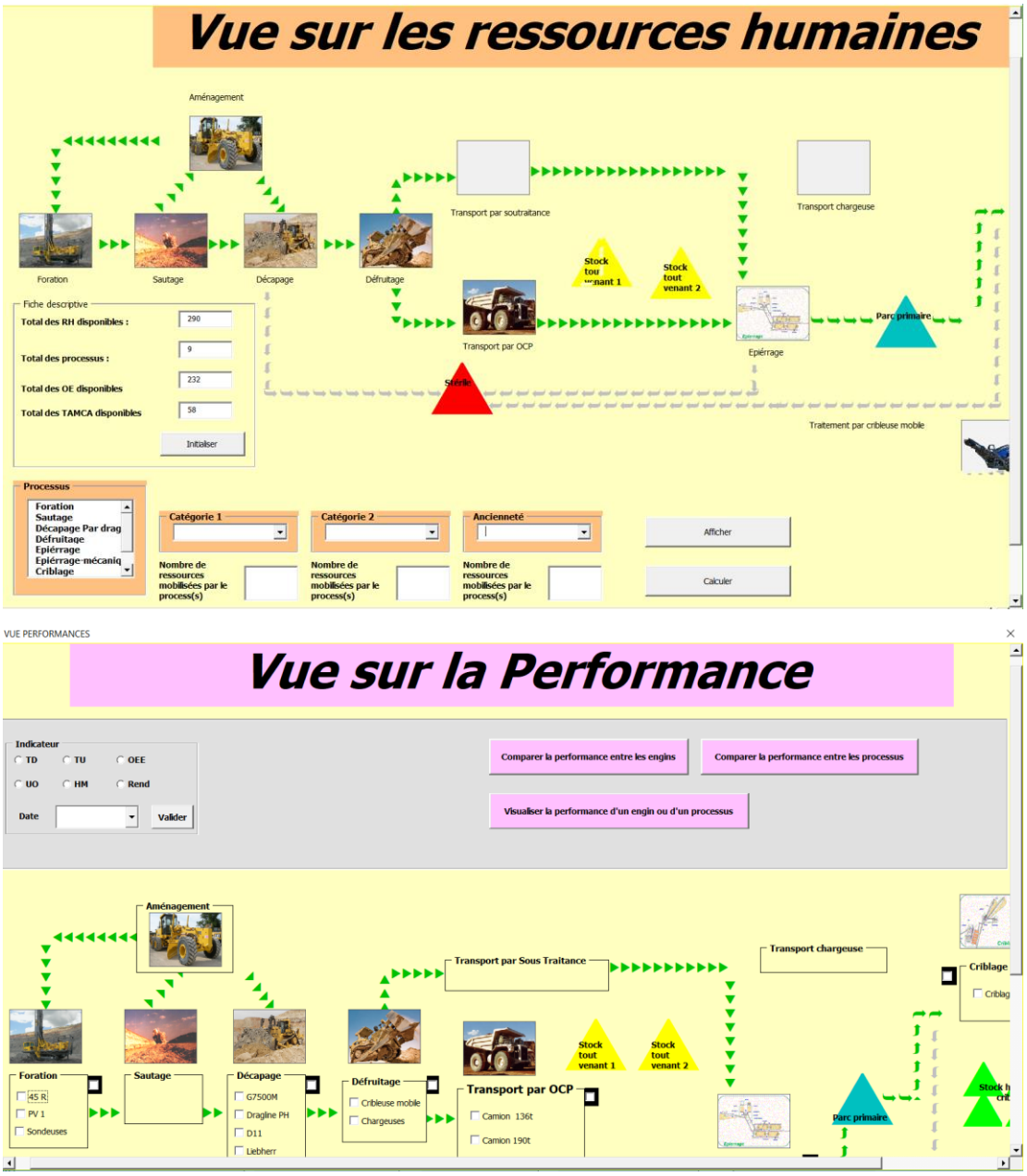


Figure 31. Tableau de bord de visualisation de la chaîne minière sous multiples vues.

4.2.3. Formalisation des processus organisationnels et quantification des flux

Nous avons développé une approche pour la formalisation des processus organisationnels et défini l'ensemble des éléments à prendre compte dans cette phase (stock, énergie…) (Azzamouri *et al.* 2016).

4.3.Construction des modèles informatiques pour OCP-SA Axe centre

La cartographie détaillée de la chaîne (§4.2.2) et la formalisation des processus organisationnels (§4.2.3) nous ont effectivement permis de comprendre en détail l'ensemble des interdépendances existantes entre les sous-systèmes, de définir les différentes décisions à prendre et à quel niveau faut-il les prendre. Arrivant à la phase de construction des modèles informatiques, nous avons procédé en premier lieu par une modélisation mathématique du processus amont d'extraction du phosphate. Or, la taille importante du problème rend sa résolution inexploitable (Azzamouri *et al.* 2017, 2018). Ainsi, nous avons proposé de procéder par une approche simulatoire pour évaluer les différentes décisions prises en amont de la CLM et de tester les divers scénarios organisationnels et leurs impacts sur la prévision des alimentations des minerais. Ceci est un paramètre phare dans la constitution des mélanges qui doivent répondre à la commande client en termes de qualité et de quantité (Azzamouri et Giard 2017, 2018). En effet, sur un horizon de planification à court terme, les demandes de minerais extraits ne peuvent pas être liées aux demandes finales d'une nomenclature rigide et ces demandes finales sont imprévisibles. Le mélange optimal d'une commande dépend du calendrier des commandes (dans un horizon de quelques semaines), des stocks initiaux de minerais disponibles dans la zone de mélange et du programme d'approvisionnement des minerais à extraire, ce qui conduit à une approche de mélange dynamique étendue (Azzamouri et Giard 2017, 2018).

4.3.1. Développement du modèle de simulation pour la planification pour OCP-SA Axe centre

La discussion de cette partie fera l'objet du Chapitre 4 de ce mémoire de thèse.

4.3.2. Développement du modèle de constitution des mélanges (Blending dynamique) pour OCP-SA Axe centre

Une définition plus détaillée de l'approche fera l'objet du Chapitre 5.

4.3.3. Concrétisation de la mise en œuvre de ASCI_LM sur OCP-SA Axe centre

Le couplage entre le modèle développé pour la planification minière à court terme (basée sur la SED dans le chapitre 4) et celui de constitution des mélanges (Blending

dynamique) (basée sur l'optimisation dans le chapitre 5) permet dans le cadre du LM de (Figure 13):

L'approche développée pour la planification minière à court terme (basée sur la simulation) et pour le modèle de constitution des mélanges (Blending dynamique) (basée sur l'optimisation) permet dans le cadre du LM de :

- **Évaluer les prises de décisions :** il s'agit à partir de la simulation de prévoir l'impact des décisions prises en amont de la chaîne minière (choix des zones à extraire, la définition des lotissements des cases, l'affectation des machines, le programme de la maintenance des machines, l'affectation des camions, le choix de la sous-traitance…) sur la courbe d'alimentation prévisionnelle des stocks des minerais de base. En effet, l'accès aux différents minerais est lié à la zone d'extraction, son avancement et également à sa position géographique choses que nous traduisons par une logique d'indices de priorité. Une analyse des courbes d'alimentation est faite pour pouvoir réagir et prendre la meilleure décision à l'égard de ces indices. Il s'agira de décider s'il faut pousser l'extraction du minerai concerné en cas de sous-production ou au contraire l'arrêter en cas de surproduction. Ainsi, nous produisons juste ce qui est demandé. Les minerais extraits représentent les inputs du problème de préparation des mélanges qui prend compte de plusieurs paramètres qui sont définis en ci-dessous,
- **Réduire les stocks :** il s'agit dans ce cas d'utiliser des mélanges qui sont flexibles au lieu de celles qui sont figées. Ceci nous permettra de répondre à la demande client avec en premier lieu les inputs disponibles en stock. L'approche développée est conçue de telle façon à chercher à consommer en premier lieu les stocks existants et de ramener du chantier uniquement les qualités à consommer. Cette logique va nous permettre de réduire les stocks et à un moment donné de réfléchir à arrêter l'alimentation par ce qu'elle nous engendrera des coûts d'acheminement du minerai qui n'est pas utilisé,
- **Éviter les ANVA** : après l'analyse de la chaîne minière, il s'est avéré qu'en plus des opérations de la chaîne cinématique d'extraction, il existe des opérations consistant à récupérer le produit stocké, en cas de saturation des stocks des inputs, pour pouvoir préparer les mélanges. Or, ces opérations dites de reprise (déstockage) sont génératrices de coûts supplémentaires liés aux engins mobilisés pour cette opération ce qui représente des ANVA. Pour cette raison, l'approche développée permet de prendre compte des capacités maximales des stocks des inputs de telle

sorte à libérer de l'espace et par conséquent alimenter directement les stocks dédiés aux inputs au lieu de passer par les stocks intermédiaires,

- **Introduire une logique de flux tiré en amont de la chaîne :** la chaîne logistique minière est en face de deux types de flux : 1. Flux poussé qui est dû au caractère sédimentaire de la mine qui fait que l'exploitation d'une couche ne peut être faite qui si la couche qui est en dessus est déjà exploitée. Ceci nous oblige à extraire des couches dont on n'en a pas besoin tout de suite et les stocker en attente d'une demande qui se déclenche. 2. Flux tiré qui consiste à préparer les mélanges en fonction de la commande client qui porte sur une qualité et quantité définies. Le point de découplage entre ces deux types de flux est assuré par le blending. C'est pour cette raison que cette phase du processus doit être flexible afin de pouvoir absorber les effets du « poussé » parvenant de l'amont et ceux du « tiré » de l'aval. Il permettra également de monter dans la chaîne et de piloter les alimentations en amont à travers la simulation tout en priorisant les zones à extraire en fonction des inputs à consommer en aval,
- **Augmenter la qualité du produit préparé :** après une analyse des logiques suivies lors de la constitution des stocks des inputs utilisés dans la préparation des mélanges, une superposition des inputs est adoptée. Or, l'inconvénient des stocks hybrides peut jouer fortement sur les caractéristiques des mélanges préparés. La définition des caractéristiques du stock hybride ne peut être parfaitement correcte que si le stock est pris dans sa totalité dans la constitution du produit. Dans le cas contraire, la pondération des caractéristiques sera faussée à cause de la non-homogénéisation du stock. Pour remédier à ceci, l'approche blending dynamique permet de forcer, en cas d'utilisation des stocks hybrides, à consommer le stock hybride dans sa totalité.
- **Changement de pratiques :** le LM est une philosophie de changement de pratique et non pas seulement d'application d'outils standards. La complexité du processus extractif rend les industries minières très hésitantes à l'égard des changements de ses pratiques et elles préfèrent restées dans sa logique traditionnelle certaine, au lieu de chercher à trouver d'autres approches qui sont pour elles incertaines. C'est pour cette raison que ce projet de recherche parvient pour remettre en cause les pratiques minières traditionnelles basées principalement sur : l'augmentation des stocks, sur l'utilisation des mélanges figés, sur la logique de pousser la production même si cela engendre des déficits au lieu des gains… C'est pour cela que nous

avons développé une approche basée sur la simulation pour évaluer les divers scénarios organisationnels complétés par une approche de blending dynamique permettant de prendre compte de l'existant pour satisfaire la demande client et augmenter la qualité du produit.

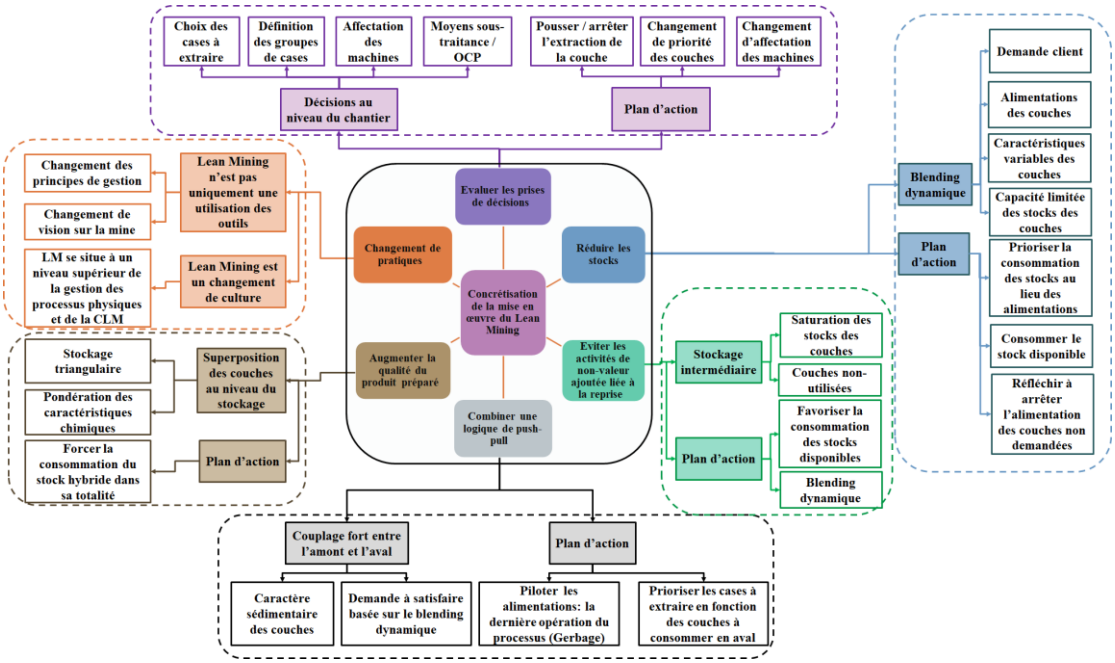


Figure 32. Concrétisation de la mise en œuvre de ASCI_LM sur OCP-SA Axe centre.

4 CONCLUSION

Nous avons proposé dans ce chapitre la méthodologie ASCI (Analyse, Spécification, Conception, Implantation) pour le Lean Mining. Un cadre méthodologique d'ensemble a été présenté ainsi que l'instanciation du composant méthodologique ASCI pour produire cette méthodologie de modélisation. Ensuite nous avons présenté en premier temps l'étape menant à la construction du modèle de connaissance en définissant les sous-systèmes composant la chaîne minière, la relation qui existe entre eux et les clusters/ entités composant cette chaîne. Une caractérisation de la démarche « *FALM* » est également expliqué permettant d'une façon plus concrète de définir l'ensemble des étapes à suivre pour la mise en œuvre du LM avec une explicitation de chaque étape qui pourront être réutilisées dans d'autre contexte de la mine à ciel ouvert. En deuxième temps, nous avons présenté les modèles basés sur des approches simulatoires et de recherche opérationnelle construit dans la phase de conception et d'implantation d'ASCI pour le Lean Mining et qui seront détaillés en chapitres 4 et 5.

Pour rendre la méthodologie proposée plus illustrative et concrète, nous l'avons appliqué sur la mine à ciel ouvert d'extraction des phosphates au sein de l'OCP-SA. L'ensemble des étapes proposées dans la construction du modèle de connaissance et d'action ont été appliqués dans ce contexte. Cette étude de cas montre aux industries minières qu'il existe des pistes d'amélioration importantes à mener. C'est pour cette raison que la recherche doit aider la mine à adapter ses pratiques traditionnelles et à entamer de nouveaux projets visant l'amélioration de son efficacité et de son efficience dans un cadre plus global et durable.

CHAPITRE 4

CONSTRUCTION DU PROGRAMME TACTIQUE D'EXTRACTION DE PHOSPHATE

1 INTRODUCTION

La prise de décision dans un contexte industriel est un processus complexe consistant à prendre un choix parmi plusieurs alternatives en fonction de la situation étudiée afin de résoudre un problème présent ou bien d'atteindre un objectif futur. Le processus décisionnel peut être traité sur différents horizons temporels et avoir différents impacts sur les maillons de la chaîne logistique. Anthony (1965) définit trois niveaux de décisions selon leur horizon temporel, le niveau hiérarchique de la prise de décision et la granularité spatio-temporelle des produits et des ressources :

- **Les décisions stratégiques** sont prises au niveau hiérarchique le plus élevé. Elles concernent les orientations générales de l'entreprise et ont une implication sur le long terme (quelques années, mais la signification de cet horizon peut varier d'un secteur à un autre) ; ces décisions concernent principalement la définition du portefeuille d'activités sur lequel l'entreprise entend se placer sur le long terme ainsi que le portefeuille de ressources permanentes à mobiliser.
- **Les décisions tactiques** sont des décisions de moyen terme (généralement de quelques semaines à un an, voire un peu plus). Elles concernent l'organisation de la gestion quotidienne de l'entreprise. Elles traitent de la planification de la production, de la coordination de la chaîne logistique, des politiques de réapprovisionnements.
- **Les décisions opérationnelles** sont des décisions de court terme concernant les opérations courantes de l'entreprise. Elles sont prises par les agents d'exécution ou les agents de maîtrise et correspondent aux décisions courantes de conduite du système productif (production, maintenance, approvisionnement…).

La définition plus précise des frontières séparant les différents types de décisions et l'échelle temporelle peut varier en fonction de l'industrie étudiée.

La chaîne logistique minière est assez complexe et composée de plusieurs entités assurant des fonctions différentes. Comme nous avons déjà défini dans le chapitre 3 (§ 2.2.2) en se basant sur la méthodologie ASCI (Analyse, Spécification, Conception, Implantation) nous avons défini les trois sous-systèmes composant la chaîne minière : le sous-système physique (SSP), le sous-système logique (SSL) et le sous-système décisionnel (SSD). La complexité des conditions d'exploitation et de l'environnement minier rend la gestion du SSD difficile et par conséquent même la

prise de décision. Face à ces conditions diverses et variées, les industries minières se trouvent face à une problématique d'aide à la prise de décision d'autant plus que l'évaluation de l'impact de chaque décision sur le reste de la chaîne reste souvent difficile à apprécier.

Une analyse approfondie de la prise de décision dans la chaîne minière, nous a poussés à identifier les problèmes majeurs à prendre en compte dans la prise de décision et à proposer de nouvelles approches et briques logicielles pouvant aider à la prise de décision dans un délai court. Il est intéressant de noter que la plupart des industries minières (Chapitre 2) restent réticentes à l'égard de la mise en œuvre de nouvelles approches ou méthodes en raison de la très grande difficulté à évaluer l'impact des décisions prises sur les autres entités de la chaîne logistique. Dans les conclusions formulées au (Chapitre 2) nous avons montré l'importance de la construction de nouvelles briques logicielles pour l'aide à la décision dans le contexte de la SCM.

Il existe plusieurs travaux qui ont traité le sujet de planification minière à long terme dont l'objectif est de définir les fosses ultimes à exploiter tout en maximisant le profit. En travaillant sur du moyen et court terme, la problématique de planification minière entre un peu plus dans le détail pour inclure le processus extractif et définir le programme de production prévisionnel. Il s'agit dans ce cas de définir les blocks à extraire sur l'horizon de planification étudié permettant de satisfaire les demandes clients. Ce qui est considéré ici comme planification tactique selon les usages dans la littérature de management industriel est considéré par les opérationnels mineurs comme relevant du court terme. Afin d'assurer et de répondre au programme de production préétabli, il s'agit au niveau des décisions opérationnelles (décisions prises au quotidien) d'assurer une flexibilité quotidienne pour faire face aux fluctuations prévues de la demande et des disponibilités des ressources, ainsi que de réagir aux aléas dans le respect des décisions tactiques. Nous définissons à ce niveau également l'ordonnancement détaillé des ressources mobilisées (opérateurs, affectation journalière des camions et outillages). En fait la problématique de planification minière ne porte pas sur une production obtenue par assemblage de composant mais sur une production de minerais extraits, ce qui relève en fait d'une problématique d'ordonnancement, d'autant plus qu'il faut intégrer des contraintes d'antécédence dans la production.

La question qui se pose est de savoir comment assurer une planification de la production pour aider à la prise de décision dans un délai court, tout en évitant les

activités de non-valeur ajoutée. L'approche Lean Mining que nous proposons dans ce travail de recherche a comme principale mission de proposer de nouvelles méthodes, approches et configuration de la CLM afin d'améliorer l'efficacité et l'efficience de l'organisation tout en minimisant les activités de non-valeur ajoutée à travers : la maîtrise et le pilotage de l'extraction afin d'assurer une gestion d'avantage orientée flux tiré, l'accroissement de la flexibilité, minimisation du stock inutile du minerai… Le présent chapitre a comme objectif d'apporter une réponse à cette question et de proposer un modèle de planification permettant dans le cadre du Lean Mining d'assurer le pilotage intégré de la mine à travers une planification du processus extractif basée sur : une évaluation de l'impact de chaque décision prise, le tester de divers scénarios organisationnels, la quantification des résultats obtenus, et ce dans un délai assez court.

Les décisions prises au niveau stratégique de l'industrie minière concernent principalement les décisions prises sur le long terme (plus de 5ans) qui concernent l'ouverture de nouvelles mines et le choix de la fosse à exploiter dans un objectif de maximisation de profit. Concernant le moyen et le long terme, les principales décisions sont liées à la planification de l'extraction. En ce qui est du court terme, cela est lié aux décisions quotidiennes d'affectation des moyens de transport et de chargement. Nous précisons que beaucoup d'éléments présentés en ci-dessous constituent une adaptation de ce que nous avons publié dans *International Journal of Production Research* (Azzamouri *et al*. 2018).

Pour présenter le travail effectué, nous avons structuré le présent chapitre comme suit :

- Nous commencerons en premier lieu la résolution de notre problème de planification minière, avec la prise en compte des contraintes de ce secteur, en se basant sur une approche d'optimisation (§2). Pour se positionner par rapport à l'existant, nous allons entamer une revue de la littérature bien détaillée sur les travaux traitant la problématique de planification minière par l'optimisation sur les différents horizons décisionnels (§3.1). L'objectif de cette revue est de pouvoir repérer les travaux existants, se positionner par rapport à ce qui est déjà traité dans la littérature, évaluer le degré de finesse requis et modélisé par chaque article, définir les décisions modélisées, repérer les limites à combler dans notre travail. Ensuite, nous présenterons la formulation de notre problème traitant de la programmation à moins d'un an de l'extraction, avec la prise en compte de toutes

les caractéristiques et contraintes, telles qu'elles sont prises en compte actuellement par l'OCP (§3.2),

- Comme la résolution du problème mathématique n'est pas exploitable à cause du nombre important de variables, nous avons opté pour une approche simulatoire (§4). Avant d'aborder le développement de ce travail, il est nécessaire de commencer par une recherche bibliographique sur la thématique des approches basées sur la simulation mais plus particulièrement dans le secteur minier (§4.1). Il s'agira de présenter l'ensemble des points qui sont déjà traités dans la littérature, de repérer l'ensemble des limites et des éléments à intégrer et à prendre compte dans le développement de notre travail. Par rapport à ce qui a été repéré dans la littérature, nous allons présenter par la suite le développement du modèle d'aide au pilotage que nous avons construit (§4.2): les principes mobilisés, la logique suivie, ses inputs, ses outputs, une analyse des résultats obtenus… Il s'agira également de présenter l'apport du simulateur dans le cadre de la l'amélioration de l'efficacité et l'efficience de l'industrie minière et à quel point ceci contribuera à l'amélioration de la performance globale de la chaîne.
- Nous discuterons des perspectives de ce travail dans le paragraphe §5.

2 DÉFINITION DU PROBLÈME

Le processus d'extraction est qualifié de processus continu et les décisions prises par OCP portent sur le choix des cases à extraire du gisement (les cases d'OCP sont de 40 m par 100 m, de rectangles de 4000 m^2 de surface). Les décisions à prendre concernent (Azzamouri *et al.* 2017) : i) le choix des cases à extraire sachant qu'il existe des cases qui sont déjà en cours de traitement par des opérations ; ii) l'allocation des machines disponibles pour effectuer ces opérations, plusieurs de ces machines étant polyvalentes. Deux points importants doivent être notés :

- Il s'agit clairement d'une décision tactique, car la réalisation de ces opérations durera entre plusieurs dizaines d'heures et quelques centaines d'heures (l'opération finale de chargement du minerai sur un camion étant la seule à durer seulement quelques heures). En outre, on exclut du champ d'application décisionnel les décisions opérationnelles telles que la détermination des itinéraires des véhicules, qui sont liées au choix des cases à traiter ou à la planification des effectifs.

- Le problème est posé en termes de satisfaction de la demande connue ou prévue et concerne donc l'ordonnancement à moyen terme. La plupart des articles proposant un modèle d'extraction minière (voir §3.1) cherchent à développer un programme de production indépendamment de toute contrainte de demande explicite, où la production proposée est implicitement vendue selon des termes et conditions prédéterminés (problème d'extraction à flux poussé).

Formalisons maintenant le problème d'étude. Certains termes utilisés ci-dessous dans la description du processus d'extraction sont illustrés sur la Figure 33 . Cette figure représente la structure du gisement sédimentaire avant exploitation. Pour plus de détails, veuillez-vous reporter à la Figure 34 (§3.1.1) pour une représentation d'une mine en cours d'extraction.

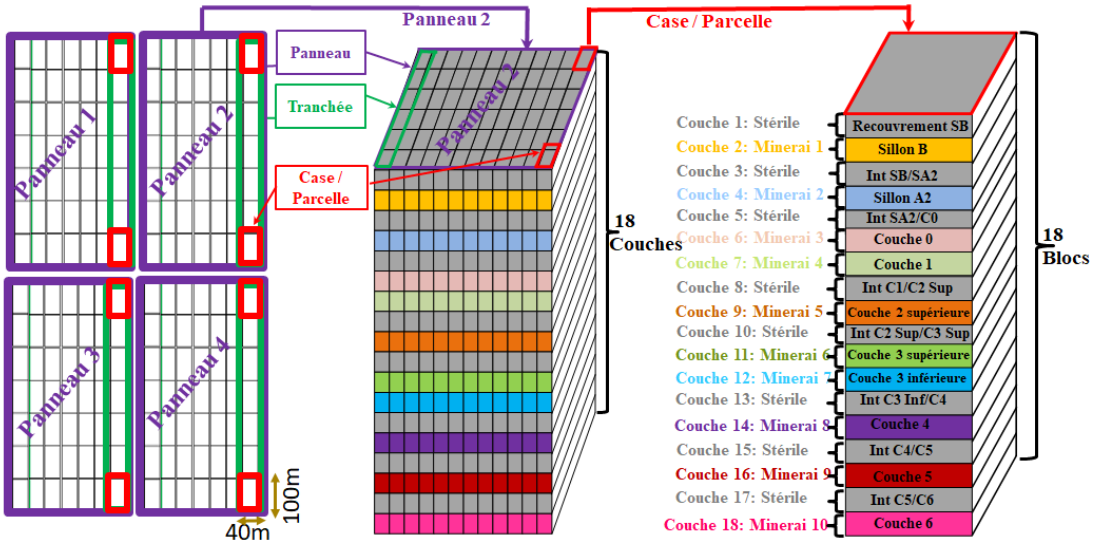


Figure 33. Structure de la mine.

Comme illustré sur la Figure 33, le gisement est composé de P panneaux. Un *panneau* p $(p=1..\mathrm{P})$ est défini par ses caractéristiques géologiques homogènes et est divisé en N_p cases $(n_p=1..\mathrm{N}_p)$ ayant la même surface S_p . Le panneau p comprend C_p couches. Chaque *couche* c_p $(c_p=1..\mathrm{C}_\mathrm{P})$ a la même hauteur h_{c_p} (valeur indiquée dans la colonne 3 du Tableau 9) et les mêmes caractéristiques géologiques tirées de l'ensemble des caractéristiques géologiques homogènes relatives au dépôt (voir colonne 1 du Tableau 9). Certaines de ces couches sont économiquement sans valeur ; dans notre exemple, $\mathrm{J}=10$ de ces $\mathrm{C}_p=18$ couches correspondent à 10 qualités

$(j=1..\mathrm{J})$ de phosphate, tandis que les autres correspondent à des « déchets » (stérile) (c'est-à-dire, un minerai ayant un pourcentage de phosphate insuffisant). Les couches de phosphate correspondent aux couches du Tableau 9, pour lesquelles seules existent les deux dernières opérations élémentaires. Un bloc est délimité par l'intersection de la couche c_p et de N_p cases du panneau. Son volume v_{c_p} résulte directement de sa surface S_p et de sa hauteur h_{c_p}. Une case est donc une pile de blocs (voir la Figure 33).

L'exploitation de chaque couche c_p d'une case d'un panneau *p* s'effectue par une séquence d'*opérations élémentaires* $(o=1..7)$, listées dans le Tableau 9, certaines de ces opérations élémentaires *o* étant sans objet pour certaines couches. On définit une *opération chronologique* i_p ($i_p=1..\mathrm{I}_p$, avec $\mathrm{I}_p=60$ dans notre exemple) des opérations élémentaires effectivement réalisées, de la toute première opération élémentaire effectuée sur la première couche de la case, à la dernière opération élémentaire de la dernière couche de cette case. On qualifiera d'*opérations chronologiques,* ces opérations qui sont listées dans les colonnes 4 à 10 du Tableau 9. Le Tableau 10 reprend les numéros i_p de ces opérations chronologiques, en y associant le numéro de couche c_p et celui de l'opération élémentaire correspondante *o*. On note κ_{i_p} le numéro de couche associé à l'opération chronologique i_p et ω_{i_p}, son numéro d'opération élémentaire.

Tableau 9. Vision longitudinale (dans le panneau $p=2$).

	Indice couche c_p	Epaisseur du niveau h_{c_p}	Opérations élémentaires d'extraction du stérile					Opérations élémentaires d'extraction du phosphate	
			Aménagement / Foration	Foration	Sautage	Aménagement / Décapage	Décapage	Gerbage	Chargement
			Opération élémentaire o=1	*Opération élémentaire o=2*	*Opération élémentaire o=3*	*Opération élémentaire o=4*	*Opération élémentaire o=5*	*Opération élémentaire o=6*	*Opération élémentaire o=7*
Recouvrement Sillon B *(stérile)*	1	7,5	1	2	3	4	5		
Sillon B *(minerai j=1)*	2	0,9						6	7
Intercalaire SB/SA2 *(stérile)*	3	6,57	8	9	10	11	12		
Sillon A2 *(minerai j=2)*	4	3,43						13	14
Intercalaire SA2/C0 *(stérile)*	5	11,75	15	16	17	18	19		
Couche 0 *(minerai j=3)*	6	0,81						20	21
Couche 1 *(minerai j=4)*	7	1,5						22	23
Intercalaire C1/C2 Sup *(stérile)*	8	3	24	25	26	27	28		
Couche 2 supérieure *(minerai j=5)*	9	1,68						29	30
Intercalaire C2 Sup/C3 Sup *(stérile)*	10	4,69	31	32	33	34	35		
Couche 3 supérieure *(minerai j=6)*	11	0,85						36	37
Couche 3 inférieure *(minerai j=7)*	12	0,72						38	39
Intercalaire C3 Inf/C4 *(stérile)*	13	1,24	40	41	42	43	44		
Couche 4 *(minerai j=8)*	14	1,44						45	46
Intercalaire C4/C5 *(stérile)*	15	4,65	47	48	49	50	51		
Couche 5 *(minerai j=9)*	16	2,75						52	53
Intercalaire C5/C6 *(stérile)*	17	3,4	54	55	56	57	58		
Couche 6 *(minerai j=10)*	18	0,65						59	60

Tableau 10. Opérations élémentaires et opérations chronologiques (dans le panneau $p=2$).

Opérations élémentaires

Catégorie du minerai	Indice opération élémntaire o	Nom opération élémentaire
Stérile	1	Aménagement / Foration
	2	Foration
	3	Sautage
	4	Aménagement / Décapage
	5	Décapage
Phosphate	6	Gerbage
	7	Chargement

Opérations chronologiques

Indice opération chronologique i_p	Indice niveau c_p	Indice opération élémentaire o, ω_{i_p}
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	1	5
6	2	6
7	2	7
8	3	1
9	3	2
10	3	3
11	3	4
12	3	5
13	4	6
14	4	7
...	...	...
54	17	1
55	17	2
56	17	3
57	17	4
58	17	5
59	18	6
60	18	7

On note aussi γ_{pj} le numéro d'opération chronologique correspondant à l'opération élémentaire 7 (celle du chargement du minerai) dans la couche $\kappa_{\gamma_{pj}}$ correspondant à la qualité *j* dans le panneau *p* (par exemple, $\gamma_{1,4}=14$ si l'on considère que les caractéristiques du panneau correspondent à celles du). On notera enfin λ_{c_p} la première opération chronologique effectuée sur la couche c_p et η_{c_p} , la dernière opération chronologique effectuée sur cette couche (par exemple : $\lambda_{c_p=3}=8$ et $\eta_{c_p=3}=12$, dans le Tableau 9).

Chacune des opérations élémentaires est exécutée au moyen de l'une des machines d'un parc hétérogène de M machines $(m=1..\mathrm{M})$. Une machine peut exécuter une deux ou trois de ces opérations élémentaires (par exemple, un bulldozer D9 peut effectuer les opérations 1, 4 et 6), à des coûts et des temps différents pour une même opération élémentaire (voir Tableau 11). Le booléen δ_{om} vaut 1 si la machine *m* peut exécuter l'opération élémentaire *o* et 0, dans le cas contraire ($\sum_o \delta_{omp}=0$ signifie que la machine *m* ne peut pas être utilisée dans le panneau *p*). Lorsque l'on travaille avec les opérations chronologiques, l'adressage est indirect et conduit à travailler avec $\delta_{\omega_{i_p} mp}$

Tableau 11. Machines disponibles pour chaque opération élémentaire.

		Opération élémentaire *o*							
Equipement		o=1	*o*=2	*o*=3	o=4	o=5	*o*=6	*o*=7	*o*=8
Nom	Nombre	Aménagement / Foration	Foration	Sautage	Aménagement / Décapage	Décapage	Gerbage	Chargement	Transport
Bulldozers D11	7					X			
Bulldozers D9	9	X			X		X		
Niveleuses	3	X			X				
Paydozers	2	X			X				
Draglines	5					X			
Sondeuse	4		X						
Chargeuse	2							X	
Nouveau équipement – Surface miner	1					X			
Nouveau équipement – Pelle hydraulique (Liebherr)	1					X (Chargement stérile)		X	
Camions OCP	15								X

À partir du rendement moyen des machines du parc capables d'exécuter l'opération *o* (et donc ω_{i_p}), on en déduit la durée moyenne $\theta_{\omega_{i_p}}$ d'exécution de l'opération élémentaire, consignée dans le Tableau 12 (unité heure) et les temps

cumulés $\Theta_{\omega_{i_p}} = \sum_{i'_p=1}^{i'_p=i_p} \theta_{\omega_{i'_p}}$. Ce dernier tableau permet d'évaluer l'inertie du processus d'extraction, puisque la dernière couche de minerai n'est pas accessible avant 2 720,7 heures, dans l'hypothèse, totalement irréaliste, d'une absence d'attente entre deux opérations chronologiques successives. Dans la formulation du problème par un programme linéaire, on utilisera le temps de traitement exact $\theta_{\omega_{i_p} m}$ de cette opération *o* par la machine *m* pour le bloc de la couche c_p (son volume est de v_{c_p}), ce qui conduit au débit horaire $\rho_{\omega_{i_p} m} = v_{\kappa_{i_p}} / \theta_{\omega_{i_p} m}$.

Tableau 12. Temps opératoires moyens et cumulés $(\theta_{\omega_{i_p}} ; \Theta_{\omega_{i_p}} = \sum_{i'_p=1}^{i'_p=i_p} \theta_{\omega_{i'_p}})$ d'exécution des opérations élémentaires ω_{i_p} sur la couche κ_{i_p} du panneau *p*.

Temps opératoires moyens $\theta_{\omega_{i_p}}$ d'exécution des opérations élémentaires ω_{i_p} sur la coûche c_p du panneau *p*

Indice niveau c_p	Opération élémentaire *o*						
	1	2	3	4	5	6	7
1	150,0	19,0	10,0	150,0	85,7		
2						18,0	2,7
3	131,4	16,7	10,0	131,4	75,1		
4						68,6	10,5
5	235,0	33,6	10,0	235,0	134,3		
6						16,2	2,5
7						30,0	4,6
8	60,0	13,7	10,0	60,0	34,3		
9						33,6	5,1
10	93,8	28,4	10,0	93,8	44,7		
11						17,0	2,6
12						14,4	2,2
13	24,8	14,1	10,0	24,8	11,8		
14						28,8	4,4
15	93,0	11,8	10,0	93,0	37,2		
16						55,0	8,4
17	68,0	11,3	10,0	68,0	32,4		
18						13,0	2,0

Temps opératoires cumulés $\Theta_{\omega_{i_p}} = \sum_{i'_p=1}^{i'_p=i_p} \theta_{\omega_{i'_p}}$ de la couche c_p dans le panneau *p*

Indice niveau c_p	Opération élémentaire *o*						
	1	2	3	4	5	6	7
1	150,0	169,0	179,0	329,0	414,8		
2						432,8	435,5
3	566,9	583,6	593,6	725,0	800,1		
4						868,7	879,2
5	1114,2	1147,7	1157,7	1392,7	1527,0		
6						1543,2	1545,7
7						1575,7	1580,3
8	1640,3	1654,0	1664,0	1724,0	1758,3		
9						1791,9	1797,0
10	1890,8	1919,2	1929,2	2023,0	2067,7		
11						2084,7	2087,3
12						2101,7	2103,9
13	2128,7	2142,8	2152,8	2177,6	2189,4		
14						2218,2	2222,6
15	2315,6	2327,4	2337,4	2430,4	2467,6		
16						2522,6	2531,0
17	2599,0	2610,3	2620,3	2688,3	2720,7		
18						2733,7	2735,7

Jusqu'à maintenant, on s'est intéressé à une case quelconque d'un panneau *p*, lequel possède N_p cases référencées par n_p. Par la suite, les décisions portant sur des opérations à exécuter sur le bloc accessible d'une case déterminée, il conviendra de remplacer l'indice de l'opération chronologique i_p par i_{n_p} pour cibler le bloc de la couche κ_{i_p} de la case n_p du panneau *p* concernée par cette opération chronologique i_p (ce dernier indice restant utilisé lorsqu'il porte sur une case quelconque du panneau *p*).

Dans le cas de l'extraction du phosphate, les minerais extraits J doivent être mélangés pour répondre aux spécifications des demandes finales $D_{kt'}$ pour les teneurs du phosphate mélangés $(k = 1..K)$, requis en période t' $(t' = 1..T)$ par les unités en aval

de la chaîne logistique, pour la production d'acide phosphorique et pour l'exportation (ce processus de blending fonctionne principalement à la commande). Par conséquent, la demande D_{jt} pour la qualité *j* extraite est indirecte et résulte d'une combinaison linéaire de demandes $D_{kt'}$ pour les qualités mélangées *k* ($t' > t$ en raison du stockage et du processus de blending). À ce stade, deux questions qui ajoutent de la complexité à la formulation du problème doivent être abordées.

- Le minerai extrait est envoyé dans la zone de blending à travers deux convoyeurs. Ce goulot d'étranglement conduit à une alimentation séquentielle qui implique des retards variables dans la disponibilité des qualités extraites dans la zone de blending. Ces retards dépendent des horaires des convoyeurs.
- La matrice des coefficients de mélange qui lie D_{jt} à $D_{kt'}$ n'est pas unique : les formules de mélange optimales varient de manière dynamique dans le temps car elles dépendent (Azzamouri et Giard 2017, 2018) : *i*) disponibilité des stocks ; *ii*) des alimentations en qualités extraites ; *iii*) la demande finale en qualité mélangées. Cette « indétermination relative » de la demande empêche toute transformation systématique de la demande de qualité mélangée en une demande de qualité extraite. Cette spécificité du problème d'ordonnancement à ciel ouvert augmente considérablement sa complexité, car le problème d'ordonnancement d'extraction doit être lié aux problèmes de blending et d'ordonnancement des convoyeurs.

Comme c'est le cas dans tous les autres travaux de recherche proposant une formulation de la programmation mathématique du problème d'ordonnancement (§3), nous supposons que la demande en qualité extraite est connue et ignorons les problèmes posés par le blending et l'alimentation séquentielle. Ces simplifications n'ont pas de conséquences matérielles car le modèle MIP détaillé résultant reste difficile à être implémenté.

La demande prévue D_{jt} pour la qualité extraite *j* est satisfaite par des prélèvements du stock de la qualité extraite *j* dans la zone de blending. Le stock *j* est alimenté par une production P_{jt} *qui résulte de l'ensemble des décisions tactiques prises* étudiées aux sections suivantes *(relation (6) dans la formulation du problème par la programmation linéaire)*. Si l'on note I_{jt} le stock de la qualité *j* de minerais à la fin de la période *t*, le stock initial I_{j0} étant supposé connu, les décisions à prendre doivent respecter la contrainte (1) de conservation des stocks.

$$\mathrm{I}_j^{\mathrm{Min}} < \mathrm{I}_{j0} + \sum_{t'=1}^{t'=t} P_{jt'} - \sum_{t'=1}^{t'=t} \mathrm{D}_{jt'} \leq \mathrm{I}_{jt}^{\mathrm{Max}} \ ; \ j = 1,...,\mathrm{J}; t = 1,...,\mathrm{T} \tag{1}$$

Cette relation exclue d'entamer le stock de sécurité I_j^{Min} et impose de ne pas dépasser la capacité disponible $\mathrm{I}_{jt}^{\mathrm{Max}}$ qui peut varier au fil du temps. Dans la pratique, une insuffisante de capacité de stock peut se contourner par un stockage provisoire, suivi d'une reprise mais ces opérations sont sans valeur ajoutée (rectangles en rouges sur la Figure 16).

Pour assurer une certaine continuité dans l'utilisation des machines et réduire leur temps de déplacement, chaque bloc de la case n_p d'un panneau *p* est inclus dans un groupe g_p $(g_p = 1..\mathrm{G}_p)$ de R_{g_p} blocs contigus $(r_{g_p} = 1..\mathrm{R}_{g_p})$ *appartenant à la même couche*. Ce qui correspond à la partition de tous les blocs d'un panneau en *bench-pushbacks*, décrite à la Figure 35d. On note λ_{g_p} la première opération chronologique effectuée sur un bloc de groupe g_p, et η_{g_p} la dernière opération chronologique effectuée sur un bloc de ce groupe. Une machine affectée à un bloc dans un groupe pour traiter une opération élémentaire *o* (correspondant à une opération chronologique $i_{r_{g_p}}$) n'est libérée qu'une fois le traitement a été achevé pour tous les blocs de ce groupe. Pour réduire le déplacement des machines d'un groupe à l'autre, Ces groupes sont liés par des relations de précédence décrites le paramètre booléen $\psi_{g_p^1 g_p^2} = 1$ si le traitement des blocs du groupe g_p^2 n'est possible qu'une fois terminé celui des blocs du groupe g_p^1. Nous signalons que nous ne tenons pas compte du fait que cette allocation – et donc la définition des groupes – dépend aussi des couches et des opérations élémentaires.

Cette description du problème, correspondant aux pratiques décisionnelles observées à un niveau tactique (quelques semaines à quelques mois), repose sur une discrétisation des processus d'extraction de la mine qui retient une granularité décisionnelle à la maille d'un « item » à traiter correspondant au bloc accessible d'une case et aux machines (au sens large) susceptibles d'effectuer les différentes opérations élémentaires. Ces décisions déterminent l'extraction du minerai extrait et notre objectif est d'identifier le moment opportun pour l'extraction du minerai.

3 DÉFINITION DU PROGRAMME D'EXTRACTION PAR L'OPTIMISATION

Nous présenterons en premier lieu dans cette section une analyse de la revue de la littérature au sujet de la définition du programme de production dans la mine à ciel ouvert en se basant sur l'optimisation (§3.1). Nous présenterons en deuxième lieu une formulation de ce problème de planification minière en se basant notamment sur l'optimisation (§3.2).

3.1 Revue de la littérature sur la planification minière

Les premiers articles de recherche traitant de planification d'extraction de minerai au sein de la mine à ciel ouvert, en s'appuyant sur la simulation et/ou l'optimisation, remontent aux années soixante. Le repérage de ces articles a été effectué sur la métabase documentaire bib.CNRS (https://bib.cnrs.fr/category/faq-en/) portant sur plusieurs dizaines de milliers de revues scientifiques, à partir des mots-clés sur les résumés : « Open-pit mining », « Open-pit mine » et « scheduling », « planning », « block sequencing ».

3.1.1 Planification à long terme de l'exploitation d'une mine à ciel ouvert

La plupart des articles scientifiques s'inscrivant dans cette perspective utilisent les termes d'ordonnancement ou de planning mais traitent en réalité du problème de *l'open-pit mine design* qui vise à structurer le gisement et à en optimiser la rentabilité. Cette structuration de la mine à ciel ouvert (*open-pit mine design*) consiste principalement à définir, à partir d'une discrétisation géologique du gisement (*ore body model*), l'enveloppe tridimensionnelle du gisement qu'il est intéressant d'exploiter (*ultimate pit limits*), et son découpage en unités d'extraction appelées *pushbacks*. Ces dernières correspondent à un ensemble de blocs formant une mini-fosse (voir Figure 34), considérée comme une entité d'exploitation relativement autonome pouvant faire l'objet d'une planification à moyen terme. Elles interviennent également dans l'évaluation économique de la mine, s'inscrivant sur le long terme et faisant intervenir des mécanismes d'actualisation.

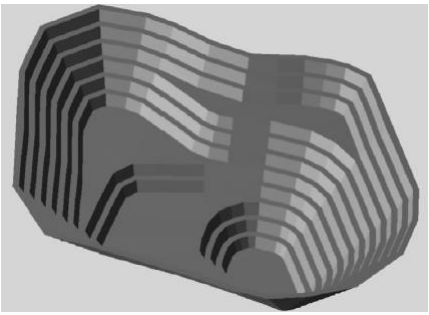
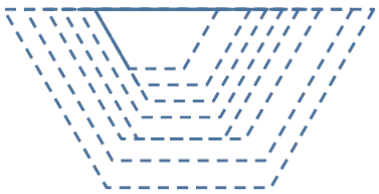


Figure 34 : Vue en 3D du deuxième *pushback* de la mine de fer de Chadormalu (Gholamnejad et Moosavi 2012).

Nous présenterons dans ce qui suit un résumé des étapes de planification de la mine à ciel ouvert comme elles sont définies par Chicoine *et al.* (2009) :

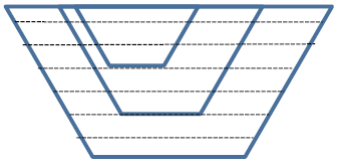
- *Discrétisation géologique du corps minéralisé (ore body) :* Cette étape consiste à préparer un modèle discrétisé du gisement en divisant la mine en blocs de taille égale avec une estimation du tonnage et des caractéristiques chimiques de chaque bloc (Journel et Huidbregts 1978 ; Isaaks et Srivastava 1989).
- *Calcul des angles de pente :* Cette phase a comme objectif de définir les angles d'extraction (assurant la stabilité de la fosse) qui dépendent de la composition structurale des roches (failles, cisailles…), de leur emplacement et profondeur et qui ne peuvent excéder un angle maximal. Elle se base sur les relations de précédence entre les blocs, telles que les blocs qui sont immédiatement en dessus du bloc à extraire doivent impérativement être à l'intérieur des angles requis de la pente de la paroi (Hustrulid, Carter et Van Zyl 2000).
- *Modèle de bloc économique :* Cette étape consiste à calculer, sur la base des informations relatives au tonnage et à la teneur, le profit estimé suite à l'extraction de chaque bloc du modèle, lequel dépend du chemin suivi par le block après extraction.
- *Obtention de l'enveloppe tridimensionnelle de la partie à exploiter du gisement :* Cette étape consiste à délimiter l'enveloppe tridimensionnelle du gisement (*ultimate pit limit*) qui sera extrait, suite à la résolution du problème d'*ultimate pit limit* (enveloppe de la coupe de la Figure 34). Lerchs et Grossman (1965) sont les premiers à avoir proposé un algorithme de résolution de ce problème, implémenté ensuite par Whittle (1999). Un grand nombre d'auteurs ont ensuite étendu ces approches selon différentes manières.

- *Détermination d'une séquence d'exploration minière :* Cette étape consiste à définir un ensemble de fosses imbriquées (Figure 35a), les blocs d'une fosse n'étant accessibles que lorsque ceux des fosses qu'il enveloppe ont été déjà prélevés.
- *Calcul d'un calendrier de production :* Cette étape représente la phase d'un ordonnancement global au niveau de la planification stratégique de la mine. En effet, il s'agit de décider quels blocs doivent être extraits, quand ils doivent être extraits, et comment les blocs extraits doivent être traités (Dagdelen 2007). Cette étape suppose une discrétisation a priori du temps en périodes, et une définition a priori de la capacité de production dans chaque période de temps. Afin de déterminer le temps d'extraction pour chaque bloc, on sélectionne un sous-ensemble de fosses imbriquées parmi ceux calculés dans l'étape de la séquence minière, appelés *pushbacks* (Figure 35b). Le croisement de ces *pushbacks* avec des couches horizontales homogènes, appelées *bench* définit une partition de la fosse en *bench-pushbacks* (Figure 35c). Pour terminer, chaque *bench-pushbacks* est affecté d'une période d'extraction (Figure 35d).

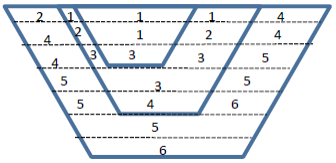


(a)Séquence de fosses imbriquées
(sous-ensemble retenu de fosses imbriquées)

(b) *Pushbacks*



(c) Définition des *bench-pushback*



(d) Définition des périodes d'extraction

Figure 35. Un plan de production planifié par pushbacks (Chicoisne *et al.* 2009).

La grande dimension du problème de planification de la production à ciel ouvert ainsi que sa nature combinatoire font que ce problème est NP-Difficiles et l'obtention d'une solution optimale est difficile à atteindre. Ainsi, la plupart des recherches effectuées dans ce sens se sont focalisées sur le développement de nouvelles méthodes, algorithmes et heuristiques (Newman *et al.* 2010) et offrent un excellent aperçu des techniques utilisées pour résoudre les problèmes de planification de la mine. Bjørndal

et al. 2012 passe en revue les travaux les plus récents et les plus novateurs en se basant sur la modélisation, les développements et les applications algorithmiques. Espinoza *et al.* (2013) dressent une bibliothèque de problèmes miniers à ciel ouvert et de recherches connexes pour améliorer la performance et l'efficacité de la résolution des problèmes (*problem-solving*).

À partir de cette analyse, nous pouvons déduire que la planification de la mine à long terme permet de définir l'ensemble des éléments (*bench-pushback*) à extraire sur l'horizon de la vie de la mine mais qu'une planification plus fine portant sur l'ordonnancement des blocks à l'intérieur de chaque *bench-pushback*, en prenant compte de toutes les contraintes opérationnelles (les machines, les opérations, la demande…) ne relève pas de ce stade. C'est pourquoi une compréhension de la planification à long terme est primordiale pour de mieux comprendre ce que doit prendre en compte comme contrainte la planification tactique, chose qui nous a amenés à se pencher sur la planification à moyen terme (de quelques mois à un an).

3.1.2 Planification à moyen terme de l'exploitation d'une mine à ciel ouvert

La planification à moyen terme vise à établir un plan de production défini à la maille temporelle d'une journée à une semaine, sur un horizon de quelques mois, en réponse à une demande effective ou prévue et s'inscrivant dans le cadre des décisions de la planification à long terme. Concrètement, il s'agit de proposer un ordonnancement des blocks à extraire et l'affection des machines pour répondre à une demande définie par des échéanciers de mises à disposition en termes de qualités et quantités, si possible de manière économique. Ce processus est relancé périodiquement (planification glissante) pour tenir compte des modifications de la demande, de disponibilité des ressources productives et des caractéristiques des minerais.

Quelques articles prétendant s'inscrire dans une perspective de planification traitent en fait des problèmes plus opérationnels, avec une granularité plus fine (définition des itinéraires des camions…) (Fioroni *et al.* 2008 ; Eivazy et Askari-Nasab 2012 ; L'Heureux, Gamache, et Soumis 2013 ; Kozan et Liu 2016 ; Mousavi, Kozan et Liu 2016b).

L'analyse approfondie des articles repérés montre que la planification de la mine à ciel ouvert est traitée sur deux aspects : le long terme et le moyen terme. L'analyse des articles traitant du long terme (§3.1.1) présente un intérêt, non seulement

pour comprendre le cadre de travail retenu dans la planification à moyen et court terme (§3.1.2), mais aussi parce que la planification du long terme repose en grande partie sur des mécanismes d'ordonnancement. On présentera notre grille d'analyse synthétique au §3.1.3.

Notre recherche bibliographique, montre qu'il n'existe pratiquement pas de travaux traitant de la planification à moyen terme. Ceci peut s'expliquer en partie par l'absence d'intérêt d'une planification à moyen terme pour des entreprises minières produisant pour stock. Une autre cause possible est la taille et la complexité des problèmes d'ordonnancement posés. On constate, en effet, qu'une modélisation explicite des opérations minières (foration, sautage, décapage…), définies au chapitre 1, est très peu prise en compte dans la littérature (L'Heureux, Gamache, et Soumis 2013) et que la gestion d'affectation des ressources se libérant n'est quasiment prise qu'au niveau de l'opération finale du chargement et du transport du minerai (Fioroni *et al.* 2008). Lorsqu'elle l'est pour les autres opérations, l'hétérogénéité et la polyvalence des équipements sont pratiquement ignorées.

3.1.3 Grille d'analyse retenue

Une analyse approfondie de ces articles a été effectuée en se basant sur les critères suivant : les inputs du processus d'extraction, la granularité du processus, les outputs du processus d'extraction et certains critères secondaires. Le Tableau 13 présente une synthèse de cette analyse (les articles sont énumérés par ordre alphabétique).

3.1.3.1 Caractéristiques des inputs pris en compte dans l'extraction

Comme expliqué dans §2, l'input à extraire dépend strictement de la définition des couches et donc des blocs. En règle générale, la surface apparente de ces blocs est la même (par exemple, rectangle de 40 x 100), la hauteur de ces blocs variant en fonction des caractéristiques géologiques. De ce point de vue, les blocs, et donc les inputs extraits, sont hétérogènes. Cela n'empêche pas certains auteurs de ne traiter que des cas particuliers, dans lesquels : 1. soit l'hétérogénéité des blocs n'est pas du tout prise en compte ; soit 2. un seul type d'input est étudié (Meagher, Dimitrakopoulos, et Avis 2014). Sur la base des articles étudiés, nous établissons une classe d'articles qui caractérisent chaque bloc explicitement dans le modèle à travers une teneur particulière (Fioroni *et al.* 2008 ; Askari-Nasab *et al.* 2011 ; Eivazy and Askari-Nasab 2012 ;

Kumral 2012, 2013 ; Espinoza *et al.* 2013 ; L'Heureux, Gamache, and Soumis 2013 ; Moosavi *et al.* 2014 ; Moreno *et al.* 2016 ; Mousavi, Kozan, et Liu 2014, 2016a,b). Nous avons également constaté que plusieurs articles traitent implicitement de l'hétérogénéité des blocs en calculant un bénéfice provisoire pour chaque bloc en fonction d'un certain nombre de variables, en particulier la teneur du bloc (Chicoisne *et al.* 2009 ; Amankwah 2011 ; Askari-Nasab *et al.* 2011 ; Kumral 2012, 2013 ; Espinoza *et al.* 2013 ; Lambert and Newman 2014 ; Meagher, Dimitrakopoulos, et Vidal 2014 ; Moosavi *et al.* 2014 ; Lamghari, Dimitrakopoulos, and Ferland 2015 ; Liu et Kozan 2016 ; Moreno *et al.* 2016).

Nous notons également que la distinction entre le minerai et le déchet/stérile (*waste*) peut ne pas être une donnée d'entrée fixe mais plutôt une donnée de sortie du modèle à travers la résolution du problème de la teneur de coupure dynamique (*Dynamic cut-off grade problem*) (Kumral 2012, 2013 ; Meagher, Dimitrakopoulos, et Avis 2014).

3.1.3.2 Granularité du processus d'extraction

La granularité du processus définit le niveau de détail des opérations d'extraction et l'identification des machines mobilisées.

Dans §2 nous avons montré que dans le monde réel, le processus d'extraction consiste en une séquence d'opérations élémentaires, chacune étant exécutée soit par une machine dédiée, soit par une machine polyvalente.

À notre connaissance, seulement L'Heureux, Gamache, and Soumis (2013) (qui traitent explicitement de la planification à court terme) et Kozan et Liu (2016) (qui ont traité un problème de production minière en plusieurs étapes pour synchroniser de façon optimale les opérations élémentaires) tiennent compte de l'existence de la multiplicité des opérations d'extraction.

Dans la plupart des articles, les opérations élémentaires d'extraction des blocs sont agrégées dans une opération fictive consolidée dont la durée dépend des caractéristiques du bloc. Par conséquent, cette opération consolidée est réalisée par une machine fictive dont le temps de fonctionnement dépend de la définition des opérations fictives ; il détermine la capacité disponible de la flotte de machines parallèles fictives identiques.

Les modèles qui considèrent le traitement de bloc impliquant des machines différentes (sans disposer de descriptions précises de leurs fonctionnalités et de leurs utilisations) tendent à les considérer toutes spécialisés (pas de polyvalences) ou que la machine est fictive et effectue toutes les opérations élémentaires (Fioroni *et al.* 2008 ; L'Heureux, Gamache, et Soumis 2013 ; Kozan and Liu 2016 ; Mousavi, Kozan, et Liu 2014, 2016a,b), ce qui exclut le cas très fréquent des équipements polyvalents. Dans ce cas, la partie extraction, qui est considérée comme étant une boîte noire agrégeant les opérations élémentaires est pratiquement à capacité limitée. Une affectation spatiale prédéfinie (à un territoire précis) des machines est abordée par quelques articles afin d'éviter les déplacements. Cette affectation est associée à un seul type de machine (*set of excavators*) sans qu'il y ait distinction entre les opérations élémentaires pouvant être exécutée par chaque machine (Mousavi, Kozan, et Liu 2016a,b).

Dans la plupart des articles, les opérations élémentaires d'extraction de blocs sont regroupées dans une opération fictive consolidée dont la durée dépend des caractéristiques du bloc. Par conséquent, cette opération consolidée est effectuée par une machine fictive dont la durée de fonctionnement dépend de la définition des opérations fictives ; il détermine la capacité disponible du parc de machines fictives identiques et parallèles.

3.1.3.3 Outputs du processus d'extraction

En fait, le processus d'extraction peut comporter deux étapes : i) l'*'extraction* au sens strict, qui fonctionne normalement en mode poussé et vise principalement à produire et à extraire tout le minerai disponible dans la mine sans aucune contrainte de qualités demandées ; ii) le processus de *traitement* du minerai, parfois inclus dans le modèle, consomme des inputs, correspondant aux outputs du processus d'extraction, pour préparer des outputs spécifiques en réponse à une demande finale caractérisée par le respect de certaines contraintes de composition. Le respect de ces contraintes passe par un mélange raisonné d'inputs (blending) complété par quelques traitements additionnels (associés à des fonctions de concentration, granulométrie et hygrométrie). Ce deuxième processus est parfois contraint par une demande spécifique à satisfaire (demande réelle ou fictive qui suppose que tout l'output produit est vendu) ou par une limite de capacité maximale. Dans ce contexte, le processus aval, soumis au mode « flux tirés », génère des contraintes pour le processus amont (extraction). Le couplage

entre le flux poussé (extraction) et le flux tiré (blending) se fait par des stocks. Cela étant, le processus d'extraction (à quelques semaines) n'est plus un processus purement à flux poussés car il est contraint par la partie à flux tiré en aval (à quelques mois). Le couplage entre ces deux modes de gestion de flux sera abordé en détail dans le chapitre 5 (§5). Nous discutons ci-après les caractéristiques des outputs correspondant aux articles que nous avons analysés.

Une fois le minerai extrait, il est transporté vers un stock et/ou une usine de traitement. Cet aspect est également traité dans plusieurs journaux dans le cadre de la définition de la destination des blocs (Eivazy et Askari-Nasab 2012 ; Kumral 2012, 2013 ; Espinoza *et al.* 2013 ; Mousavi, Kozan, et Liu 2014, 2016a,b). Nous pouvons distinguer trois types d'outputs.

- *Output unique* : c'est le cas le plus simple (Meagher, Dimitrakopoulos, et Avis 2014) mais il est parfois implicite. L'existence de ce type d'output résulte de la contrainte forçant la teneur moyenne des inputs envoyés à une destination précise soit comprise entre une borne inférieure et une borne supérieure sans qu'il y ait une distinction explicite des différents outputs à préparer (Moosavi *et al.* 2014 ; Moreno *et al.* 2016). Ce cas implique une certaine hétérogénéité des inputs. Pour les articles traitant l'évaluation et le choix des blocs uniquement sur la base des profits potentiels, la définition de la nature des outputs n'est pas claire (Chicoisne *et al.* 2009 ; Amankwah 2011 ; Lambert et Newman 2014 ; Meagher, Dimitrakopoulos, et Vidal 2014 ; Lamghari, Dimitrakopoulos, et Ferland 2015 ; Liu et Kozan 2016).
- *Outputs multiples* : Plusieurs qualités de produit peuvent être fabriquées à partir des différentes teneurs extraites, correspondant à une demande finale, avec des caractéristiques spécifiques (Fioroni *et al.* 2008). Ces qualités sont obtenues par blending des inputs stockés et alimentés pour satisfaire des demandes datées et précises en termes de qualité et de quantité (voir §2).
- *Outputs multiples avec ségrégation identique* : ce type d'output ne peut être obtenu que si les inputs sont hétérogènes (explicitement ou indirectement). Dans ce cas, les inputs seront affectés à une zone de stockage ou de traitement en fonction de la teneur requise pour chaque destination. Après homogénéisation, on obtient pour chaque destination une production dont la teneur est égale à la teneur moyenne en minerai du stock ou de l'usine de traitement (Askari-Nasab *et al.* 2011 ; Eivazy et Askari-Nasab 2012 ; Kumral 2012, 2013; Espinoza *et al.* 2013 ; L'Heureux, Gamache, et Soumis 2013 ; Mousavi, Kozan, et Liu 2014, 2016a,b).

- À partir de la mise en évidence de la relation entre flux poussés et flux tirés, nous concluons que l'extraction est censée répondre à la demande client en termes de qualité et de quantité sur l'horizon de planification. Pourtant, peu d'articles indiquent que le minerai extrait doit satisfaire la demande définie par des contrats à long terme avec les clients (Espinoza *et al.* 2013) ou en réponse à des prévisions. Ceci découle du fait que, dans la majorité des articles, on peut implicitement déduire la demande à partir de la définition de la capacité maximale du minerai à traiter dans l'usine, qui varie avec le temps. Cette capacité est introduite comme une contrainte à ne pas dépasser plutôt qu'un objectif à atteindre par les opérations d'extraction. On comprend alors que la quantité extraite est implicitement vendue immédiatement, ce qui revient à travailler avec une demande fictive (Moreno *et al.* 2016) ou une demande moyenne. Le problème de la ségrégation de la demande par qualités vendues ne se pose que dans le cas de l'hétérogénéité du minerai extrait ; dans ce cas, la variété vendue est obtenue en mélangeant les inputs extraits avec des teneurs différentes (Fioroni *et al.* 2008). Le fait que le lien entre la production et demande ne soit pas établi, le mélange pouvant s'effectuer dans des proportions variables, sous contrainte du respect de composition des outputs. C'est un facteur supplémentaire de complexité dans la définition du couplage entre l'extraction (inputs) et la demande à satisfaire (outputs).

3.1.3.4 Dimensions additionnelles

- ***L'objectif de l'article.*** La plupart des articles sont axés sur la résolution du problème (*Resolution-oriented problem*) plutôt que sur sa modélisation (*Modeling-oriented problem*). Ceci est dû au fait que ce type de problème est NP-Difficiles et ne peut pas être résolu par des techniques de résolution exactes (L'Heureux, Gamache, et Soumis 2013 ; Mousavi, Kozan, et Liu 2014). On verra que ces modèles, considérés comme NP-Difficiles, sont des simplifications de notre modèle (§3.2) qui, par conséquent, est également considéré comme NP-Difficiles. Notre article vise à décrire le problème de l'exploitation d'une mine à ciel ouvert à un niveau de granularité et d'objectivité maximum et à proposer une solution opérationnelle.
- ***Étude de cas.*** L'apport de chaque article et modèle développé est plus intéressant lorsqu'il est appliqué à une étude de cas réel. Les explications obtenues sur le terrain clarifient un certain nombre d'hypothèses sous-jacentes ainsi que la contingence de

la formulation proposée : terrain d'application de Fioroni *et al.* (2008) ; Askari-Nasab *et al.* (2011) ; Eivazy et Askari-Nasab (2012); Kozan et Liu (2016) ; Moosavi *et al.* (2014) ; Mousavi, Kozan, and Liu 2014, 2016b ; Myburgh et Deb (2010) analysent la mine de fer alors que Meagher, Dimitrakopoulos, et Avis (2014) font référence à une mine de cuivre et d'or et Kumral (2012, 2013) à une mine d'or. Tous les autres articles sont basés sur une présentation générique de l'exploitation minière sans qu'il y ait référence à un terrain spécifique, ce qui limite l'apport de l'article car les mines à ciel ouvert ne partagent pas toutes les mêmes caractéristiques.

- ***Type de décision.*** Cette catégorie établit généralement une distinction entre les décisions opérationnelles, tactiques et stratégiques, ce qui a un fort impact sur le niveau de détail utilisé.

À partir de cette grille d'analyse (Tableau 13), on peut souligner la contribution de notre travail par rapport aux recherches antérieures sur la modélisation de la mine à ciel ouvert dans une perspective d'aide à la décision. Notre approche concerne principalement la planification tactique de l'extraction en réponse à une demande spécifique, explicitant les décisions à prendre quant aux blocs à extraire et à l'affectation des machines. Cette modélisation fait référence à des opérations minières détaillées, avec une allocation dynamique de machines dédiées et/ou polyvalentes, par opposition à un niveau agrégé qui fusionne les opérations minières et utilise des machines fictives censées traiter toutes les opérations élémentaires.

Tableau 13 : Grille d'analyse des articles étudiés dans la planification minière en utilisant l'optimisation.

Numero article	Auteur (s)	Année	Type papier				Qualité du minerai extrait (Inputs)			Qualité du produit (Outputs)				Demande		Opérations d'extraction / Machines mobilisées							Chargement et transport/ Usine traitement	Destinations multiples	Méthode de modélisation			Fonction objectif	Type de décision		
																Non traité séparément			Traité séparément													
																				Caractéristiques machines												
			Article	Revue de littérature	Orienté résolution	Orienté modélisation	Unique	Hétérogène	Définie par profit	Unique	Multiple avec même ségrégation	Homogénéisation	Blending	satisfaire	Non prise en compte	Opérations fictives	Machines fictives	Préaffectation des machines	Opérations élémentaires	Dédiées	Polyvalentes	Affectation des machines			Optimisation	Non méthode	Simulation		Stratégique	Tactique	Operationnelle
1	Askari-Nasab et al.	2011	X		X			X	X		X	X			X	X	X						UT		X	Mixed integer Linear programming		F2	X		
2	Chicoisne et al.	2009	X		X				X						X	X	X						UT		X	Linear programming relaxation		F1	X		
3	Eivazy and Askari-Nasab	2012	X			X		X			X	X			X	X	X						UT	X	X	Mixed integer Linear programming		F1			X
4	Espinoza et al.	2012		X	X			X	X		X	X			X	X	X						UT	X	X	Linear programming relaxation		F1	X	X	
5	Fioroni et al.	2008	X			X		X					X	X		X				X		X			X	Programmation mathématique	X	F2, F3			X
6	Henry Amankwah	2011	X		X				X						X	X	X						UT		X	Lagrangian dual heuristic, Maximum flow problem		F1	X		
7	Kozan and Liu	2016	X			X													X	X		X			X	An improved shifting bottleneck procedure algorithm based on the extended disjunctive graph		F4			X
8	Lambert and Newman	2013	X		X				X						X	X	X								X	Tailored lagrangian relaxation		F1	X	X	
9	Lamghari et al.	2015	X		X				X						X	X	X								X	Linear programming and variable neighborhood descent		F1		X	
10	L'Heureux et al.	2013	X		X			X			X	X			X				X	X		X	UT		X	Mixed integer programming		F2			X
11	Liu and Kozan	2016	X		X				X						X	X	X								X	New graph-based algorithms based on network flow graph and conjunctive graph theory		F1		X	
12	Meagher et al.	2014 (a)		X	X				X						X	X	X						UT		X	Lerch Grossman Algorithm, Seymour's Parametrized Pit Limit Algorithm, Network Flow Approaches, IP formulations, Fundamental Tree,		F3	X		
13	Meagher et al.	2014 (b)	X		X		X			X					X								UT		X	The integer program formulation		F1	X		
14	Moosavi et al.	2014	X		X			X	X	X		X			X	X	X						UT		X	Lagrangian relaxation, Genetic algorithm		F1	X		
15	Moreno et al.	2016	X			X		X	X	X		X			X	X	X						UT		X	Linear integer model		F1		X	
16	Mousavi et al.	2016 (a)	X		X			X			X	X			X	X		X		X			UT	X	X	Simulated annealing (SA), Tabu search (TS), SA-TS,		F2		X	
17	Mousavi et al.	2016 (b)	X			X		X			X	X			X	X		X		X			UT	X	X	simulated annealing (SA), branch-and-bound (B&B) et large neighbourhood search (LNS)		F2			X
18	Mousavi et al.	2014	X			X		X			X	X			X	X				X			UT	X	X	Mixed Integer Programming		F1		X	
19	Mustafa Kumral	2012	X					X	X		X				X	X	X						UT	X	X	Mixed Integer Programming		F1		X	
20	Mustafa Kumral	2013	X		X			X	X		X				X	X	X						UT	X	X	Goal programming (GP) and Simulated annealing (SA)		F5		X	
21	Notre travail	2017	X			X		X					X	X					X	X	X	X	CT		X	Mixed Integer Programming	X	F6		X	

Définition des notations utilisées dans la grille:

* Chargement et transport/ Usine traitement: CT: Chargement et transport. UT: Usine traitement.
* Fonction objectif: F1: Maximiser le profit. F2: Minimiser les coûts. F3: Maximiser la production du minerai. F4 : Minimiseer le makespan. F5: Minimiser les écarts des capacités. F6: Minimiser la production pour satisfaire la demande en minerai extrait.

3.2 Formulation du problème de planification minière par la programmation mathématique

On est en présence d'un ensemble de décisions à prendre portant simultanément : *i*) sur la date de lancement en production des opérations chronologique i_{n_p} des cases n_p des panneaux *p* ; *ii*) sur l'assignation d'une machine *m* pour exécuter chacune de ces opérations. Cette assignation définit le temps opératoire $\theta_{\omega_{i_p} m}$ qui conditionne la date de fin de l'opération chronologique i_{n_p} .

Dans cette formulation, la variable de décision binaire $x_{i_{n_p}mt} = 1$ si l'opération chronologique i_{n_p} est exécutée avec la machine *m* et se termine à la fin de la période *t* (découpage horaire retenu), et =0 dans le cas contraire. Pour tenir compte de la polyvalence restreinte voire inexistante des machines et du fait que les q_{n_p} premières opérations chronologiques de la case n_p du panneau *p* ont déjà été réalisées au moment où l'on définit du problème ; ces variables binaires n'existent donc que si $q_{n_p} < i_{n_p} \leq I_p$ et si $\delta_{\omega_{i_p}m} = 1$. La définition de la plage de *t* est un problème majeur.

- D'un point de vue de la fin d'exploitation du gisement, T doit être de plusieurs dizaines de milliers d'heures ; alors le problème devient insoluble et doit être simplifié par : i) l'élimination du lien entre la demande et la production tel que décrit par la relation (1), ce qui implique implicitement que la demande est automatiquement égale à la production quel que soit son niveau ou sa structure ; ii) le changement de la granularité du problème, en ignorant la décomposition du processus en opérations élémentaires et en utilisant des machines fictives plutôt que des machines polyvalentes ou dédiées (qui sont utilisées dans le monde réel pour effectuer ces opérations élémentaires). Dans ce cas, $x_{i_{n_p}mt}$ doit être remplacé par la variable binaire $x_{c_p n_p t} = 1$ si la fin de traitement du bloc défini par la case n_p et la couche c_p se produit à la période *t*. Ensuite, la contrainte $\sum_{t=1}^{t=T} x_{c_p n_p t} = 1;\ c_p = 1,...,C_p;\ n_p = 1,...,N_p;\ p = 1,...,P$ impose l'épuisement de la mine.
- Si l'horizon de planification de la production n'est que de quelques milliers d'heures, les prévisions de la demande deviennent fiables. Ajuster la contrainte ci-dessus est inutile car le nombre de variables de décision $x_{i_{n_p}mt}$ qui prennent la valeur 1 est le plus bas possible ; cela résulte de la conjonction *i*) de la relation (6) par laquelle la production répond aux exigences ; *ii*) de la relation (3) (contraintes de précédence), *iii*) de la relation (5) (contraintes cumulatives) ; *iv*) et de la relation (7) (la fonction-objectif est de minimiser l'extraction nécessaire pour satisfaire les commandes). Dans ce contexte tactique, T est bornée par la dernière demande D_{jt} à satisfaire.

Ce second horizon est celui adopté dans notre modèle détaillé ci-dessous. L'opération i_{n_p} est terminée à la fin de la période $\tau_{i_{n_p}}$, qui est la variable intermédiaire définie par la relation (2).

$$\tau_{i_{n_p}} = \sum_{t=1}^{t=\mathrm{T}} \sum_{m=1}^{\mathrm{M}} t x_{i_{n_p} mt};\ n_p = 1,...,\mathrm{N}_p;\ i_{n_p} = 1,...,\mathrm{I}_p \tag{2}$$

Les contraintes de précédence entre les opérations chronologiques sont exprimées par la relation (3) qui mobilise la variable intermédiaire $\tau_{i_{n_p}}$.

$$\tau_{i_{n_p}-1} + \sum_{t=1}^{t=\mathrm{T}} \sum_{m=1}^{\mathrm{M}} \theta_{\omega_{i_p} m} \cdot x_{i_{n_p} mt} \leq \tau_{i_{n_p}};\ n_p = 1,...,\mathrm{N}_p;\ i_{n_p} = 2,...,\mathrm{I}_p \tag{3}$$

L'opération i_{n_p} est effectuée pendant la période *t* si elle est terminée à la fin de la période *t* ou au plus tard à la fin de la période $t - \theta_{\omega_{i_p} m} + 1$. Il s'ensuit que cette opération $i_{n_p} > \mathrm{q}_{n_p}$ n'est effectuée que pendant la période *t* si la relation (4) est remplie.

$$\sum_{m=1}^{m=\mathrm{M}} \sum_{t'=t}^{t'=t+\theta_{\omega_{i_p} m}-1} x_{i_{n_p} mt'} = 1;\ t = 1,...,\mathrm{T};\ n_p = 1,...,\mathrm{N}_p;\ i_{n_p} = \mathrm{q}_{n_p} + 1,...,\mathrm{I}_p \tag{4}$$

Pendant chaque période *t*, la machine *m* ne peut pas traiter plus d'une opération, ce qui est défini dans la relation (5).

$$\sum_{p=1}^{p=\mathrm{P}} \sum_{i_{n_p}=\mathrm{q}_{n_p}+1}^{i_{n_p}=\mathrm{I}_p} \sum_{t'=t}^{t'=t+\theta_{\omega_{i_p} m}-1} x_{i_{n_p} mt'} \leq 1;\ t = 1,...,\mathrm{T};\ m = 1,...,\mathrm{M} \tag{5}$$

La livraison de la teneur extraite *j* de la case n_p du panneau *p* en stock *j* se produit après l'opération élémentaire $o = 7$ (correspondant à γ_{pj}) ou en d'autres termes, après l'achèvement des opérations chronologiques effectuées pendant les périodes de $\tau_{i_{n_p}=\gamma_{pj}} - \theta_{\omega_{i_p}=\gamma_{pj},m} + 1$ à $\tau_{i_{n_p}=\gamma_{pj}}$ avec le rendement horaire $\rho_{\omega_{i_p} m}$. Ainsi, l'alimentation P_{jt} du stock *j*, déjà utilisée dans la relation (1), est donnée par la relation (6).

$$P_{jt} = \sum_{p=1}^{p=\mathrm{P}} \sum_{t'=(\tau_{i_{n_p}=\gamma_{pj}} - \theta_{\omega_{i_p}=\gamma_{pj},m}+1)}^{t'=(\tau_{i_{n_p}=\gamma_{pj}})} \left[x_{i_{n_p}=\gamma_{pj},mt'} \cdot \rho_{\omega_{i_p}=\gamma_{pj},m} \right];\ t = 1,...,\mathrm{T};\ j = 1,...,\mathrm{J} \tag{6}$$

Notons que la relation (1) peut être impossible à satisfaire en raison d'une alimentation insuffisante et donc, en raison d'une capacité de machine insuffisante et/ou de la configuration géologique du gisement. Dans les deux cas, le problème n'a pas de solution.

Enfin, il faut introduire les contraintes de groupe dans la planification. La relation (3) est nécessaire pour planifier correctement les opérations de traitement des blocs mais elle n'intègre pas la contrainte d'antécédence entre les groupes ($\rightarrow \psi_{g_p^1 g_p^2} = 1$, le groupe g_p^1 étant un ancêtre du groupe g_p^2). L'achèvement de la première opération chronologique $i_{r_{g_p^2}} = \lambda_{g_p^2}$ de bloc $r_{g_p^2}$ de groupe g_p^2, doit suivre la dernière opération chronologique $i_{r_{g_p^1}} = i_{r_{g_p^2}} - 1 = \lambda_{g_p^2} - 1$ de tous les blocs appartenant au groupe d'ancêtre g_p^1. Le processus de cette première opération chronologique $i_{r_{g_p^2}}$ se termine pendant la période $\tau_{i_{r_{g_p^2}} = \lambda_{g_p^2}}$ et commence pendant la période $\tau_{i_{r_{g_p^2}} = \lambda_{g_p^2}} - \sum_{t=1}^{t=T} \sum_{m=1}^{M} \theta_{\omega_{i_{r_{g_p^2}}}, m} \cdot x_{i_{r_{g_p^2}} mt} + 1$. La contrainte de précédence entre les groupes g_p^1 et g_p^2 est assurée par la relation (7).

$$\tau_{i_{r_{g_p^1}} = \lambda_{g_p^2} - 1} < \tau_{i_{r_{g_p^2}} = \lambda_{g_p^2}} - \sum_{t=1}^{t=T} \sum_{m=1}^{M} \theta_{\omega_{i_{r_{g_p^2}}}, m} \cdot x_{i_{r_{g_p^2}} mt} + 1$$

$$r_{g_p^1} = 1, \ldots, R_{g_p^1} ;\ r_{g_p^2} = 1, \ldots, R_{g_p^2} \mid \psi_{g_p^1 g_p^2} = 1 \qquad (7)$$

Ici, nous essayons de minimiser la production pour répondre à la demande en teneurs extraites, ce qui conduit à la fonction-objectif (8) pour répondre à la demande.

$$Min\left(\sum_{t=1}^{t=T} \sum_{j=1}^{j=J} P_{jt}\right) \qquad (8)$$

Trois raisons principales nous empêchent d'utiliser ce modèle MILP (qui est une version étendue des modèles classiques de planification de la mine à ciel ouvert montrés comme NP-Difficiles, voir L'Heureux, Gamache, et Soumis 2013; Mousavi, Kozan, et Liu 2014) : i) sa taille est environ 53 millions de variables binaires (34 machines pour le traitement des opérations élémentaires 1 à 7) ; 825 cases ; 2160 heures (3 mois)); *ii*) la relation entre la demande D_{jt} en inputs à extraire utilisés dans le modèle

et la production finale (principalement sur commande) du phosphate mélangé D_{kt} est volatile, ce qui nous amène à adopter une approche de planification glissante hebdomadaire et à se concentrer sur les premières décisions à prendre ; *iii*) ce modèle prend en compte une version très simplifiée des contraintes de « groupe » ; si tous ces éléments étaient inclus, la taille du problème augmenterait significativement. Cela nous amène à conclure que la meilleure approche possible pour éclairer les décisions tactiques est de faire appel à la simulation.

4 DÉFINITION DU PROGRAMME D'EXTRACTION PAR LA SIMULATION

4.1 Revue de la littérature sur la simulation à événements discrets dans la mine

Plusieurs travaux d'amélioration de chaînes logistiques se sont fondés sur des approches simulatoires permettant une représentation du système productif à une granularité (spatiale, temporelle…) pertinente. La simulation est souvent utilisée pour analyser, au niveau opérationnel, les conséquences de décisions de calibrage de ressources (équipement, personnel, informations) prise à un niveau généralement stratégique. Elle est un outil d'aide à la décision permettant de tester plusieurs scénarios organisationnels avec la granularité souhaitée sur un horizon temporel défini (semaine, mois, année, long terme, moyen terme, court terme), avec des mailles temporaires fines (heure, jour) et avec un temps de calcul qui est court. Le choix du type de la simulation dépend en plus du niveau décisionnel étudié (niveau stratégique, tactique, opérationnel) (Tako et Robinson 2012), (Jahangirian *et al.* 2010) de la nature des processus composant la CL étudiée. La modélisation/simulation des chaînes logistiques discrètes (CLD) et des chaînes logistiques continues (CLC) dispose d'instrumentations éprouvées : en particulier, la simulation à événements discrets (SED) pour la CLD, la Dynamique des systèmes (DS) pour la CLC et la simulation hybride (SH) pour les chaînes logistiques hybrides (CLH). Pour les CLH, plusieurs approches sont envisageables (Bara *et al.* 2018).

L'industrie minière s'engage activement dans la recherche de meilleures méthodes d'exploitation. Depuis plusieurs décennies (Basu et Baafi 1999 ; Knights and Bonates 1999 ; Konyukh *et al.* 1999 ; Panagiotou 1999 ; Sturgul 1999 ; Sturgul et EHarrison 1987 ; Turner 1999 ; Vagenas 1999 ; Govinda Raj and Vardhan 2009) la

simulation est apparue comme étant un moyen utile d'explorer les répercussions des nouveaux investissements en capital et de proposer de nouvelles méthodes minières (Turner 1999), d'analyser les systèmes miniers complexes (en présence d'une interdépendance temporelle très forte des décisions liées à une accessibilité aux minerais conditionnée par l'extraction préalable de ce qu'il y a au-dessus) dont la simulation reste la seule méthode fiable permettant de représenter de ce type de système (Panagiotou 1999), en plus de contrôler les opérations minières (Turner 1999).

Ainsi, nous avons effectué une revue de la littérature sur les travaux existant au thème de la modélisation/simulation des processus extractifs. L'objet de l'analyse des articles étudiés était :

- Objectif et le problème traité par l'article étudié,
- Quel est le type de la simulation utilisée : DS, SED, SH,
- Horizon de la simulation : long terme, moyen terme, court terme,
- Type de la décision : stratégique, tactique, opérationnel.

Les premières applications de la simulation dans ce domaine remontent au début des années soixante. À la fin des années soixante et au début des années soixante-dix, des modèles de simulation pour les systèmes d'exploitation souterraine et à ciel ouvert ont été étudiés de manière approfondie. Bien que plusieurs langages de simulation à usage général tels que (General Purpose Simulation System) et SLAM (Simulation Language for Alternative Modeling) ont été utilisés dans certains cas, la plupart de ces premiers modèles ont été implémentés en FORTRAN (FORmula TRANslator) et par conséquent, les modèles résultants ont été difficiles à appliquer aux diverses situations rencontrées dans l'exploitation minière.Les expérimentations industrielles ont été limitées surtout dans le secteur minier. Cette situation a commencé à changer à la fin des années quatre-vingt pour deux raisons : 1). L'apparition d'interfaces performantes permettant de limiter fortement la programmation ; 2). L'accroissement de la puissance des micro-ordinateurs et la baisse des coûts. Il est évident que les applications actuelles de simulation dans l'industrie minière sont davantage orientées vers la résolution de problèmes en utilisant des outils de simulation tels que GPSS/H et Proof Animation contrairement à ceux des premières années où ils étaient plus orientés méthodologie en utilisant un langage général tel que FORTRAN (Sturgul et Li 1997).

En ce qui concerne la faisabilité et l'applicabilité de la simulation au sein de l'industrie minière, Sturgul et Li (1997) décrivent les avancés des travaux de simulation

au sein de la mine et affirment qu'elle peut être, suite aux avances technologiques, un outil très puissant pour la conception, la planification et l'analyse des opérations aussi bien dans l'industrie minière que manufacturière.

Rasche et Sturgul (1991) traitent le cas d'application de la simulation pour les petites et moyennes mines. Le langage de simulation GPSS a été utilisé pour évaluer la performance actuelle de la flotte de camions dans les mines de fer à ciel ouvert. Des simulations ont été effectuées pour trouver le nombre optimal de camions pour les itinéraires de transport, pour évaluer l'effet des pannes et des arrêts de maintenance sur la production. Une simulation a également été réalisée pour étudier le cycle minier complet de la flotte et pouvoir la dimensionner.

Sturgul et EHarrison (1987) présentent les applications, les avantages et l'importance du langage de simulation GPSS dans l'élaboration du modèle de simulation pour le traitement d'une variété de situations dans la mine. Par ailleurs, il illustre trois études de cas différentes (évaluation d'intégration d'un système de dispatching, dimensionnement du nombre de camions pour une production optimale, dimensionnement des camions et des trémies en prenant compte du système de convoyeur à bande transporteuse) et leurs résolutions en s'appuyant sur GPSS.

Panagiotou (1999) présente une revue de la littérature regroupant les travaux concernant la simulation des systèmes miniers discrets en Europe. Il affirme que les premières études de simulation en Europe ont modélisé l'exploitation des systèmes de transport souterrain. Par la suite, il y avait des travaux au niveau des mines à ciel ouvert qui ont traité principalement les problématiques d'affectation des camions/pelles, des trains, des convoyeurs.

Pour Sturgul (1999) les premiers travaux publiés dans le sujet de la simulation de la mine aux Etats unis débutent de 1961 et décrivent l'avancée des langages de simulation. Les travaux effectués englobent principalement les problématiques de : minimisation du temps d'attente entre les opérations, minimisation de la file d'attente entre les pelles et camions, dimensionnement de quelques équipements et de leurs localisations.

Turner (1999) affirme que l'Afrique du Sud élargit son utilisation des systèmes de suivi et d'affectation des transports (camions/pelles, train), en se basant sur les systèmes de management opérationnel en temps réel dans les mines. Il illustre les différents travaux industriels en se basant sur la simulation avec une description des approches suivies.

L'industrie minière canadienne a également démontré sa prise de conscience et son intérêt envers l'application de logiciels de SED pour les opérations minières à ciel ouvert et souterraines (Vagenas 1999). Les études de simulation effectuées sont généralement liées aux systèmes de distribution des camions /pelles et aux systèmes d'information en temps réel sur la gestion des mines. Vagenas (1999) affirme que la SED a un rôle important dans la réussite du Lean Mining qui vise à minimiser le temps de traitement, les stocks et le gaspillage. La simulation pour l'aide à la décision sera un outil important pour la conception de la mine, la planification de la production et le contrôle dans le cadre du Lean Mining.

Basu et Baafi (1999) présentent une revue de certains travaux réalisés en Australie dans le sujet des applications de la SED dans les mines. La plupart de ces travaux se basent principalement sur l'évaluation de décisions routinières des systèmes de transport les applications des moyens de manutentions, y compris la sélection d'équipements, le dimensionnement et la gestion du stockage et l'évaluation des opérations d'exploitation.

Govinda Raj and Vardhan (2009) présentent une revue de la littérature détaillée des études menées au sein de la mine à ciel ouvert. Les travaux analysés concernent principalement : Excavatrice à roue à godets et dragline (Bucket wheel excavator and Dragline), les systèmes pelle-camion et des travaux divers. Par la suite, la simulation concernant les pelles et camions a été discutée plus en détail (comment définir : une combinaison optimale de pelle-camion, les critères de sélection des pelles, les critères de sélection des camions, le rôle du forage et du dynamitage dans la performance du système de transport). L'étude montre une large applicabilité des études de simulation dans diverses opérations dans la mine.

En plus des articles orientés-revue, nous trouvons d'autres travaux qui illustrent l'importance de la simulation au sein de la mine à travers différentes études de cas :

- Awuah-Offei *et al.* (2003) traitent le cas d'un entrepreneur minier responsable des opérations de chargement et de transport d'une mine d'or. Pour assurer une certaine flexibilité des équipements dans la mine, un modèle de simulation a été développé afin de définir le nombre de pelles et camions nécessaire dans cette mine sur un horizon de 4 ans.
- Abdulmalek et Rajgopal (2007) proposent une étude de cas d'une aciérie (en tant que processus continu) où un modèle de simulation SED a été développé afin de mesurer l'impact des implantations proposées dans le cadre du Lean Mangement et

de mettre en évidence les scénarios analysés. Ceci a permis de mesurer les avantages potentiels requis à savoir la réduction du temps de production et des stocks (work in process).

- Fioroni *et al.* (2008) présentent une étude de cas combinant de la simulation et de l'optimisation au sein d'une mine de fer. Le modèle d'optimisation consiste à calculer l'allocation initiale des pelles et camions ainsi que le nombre de trajets programmés pour chaque camion par rapport à chaque zone d'extraction afin d'atteindre la teneur en minerai désirée. Par la suite, le modèle de simulation (en prenant compte de la maintenance, d'épuisement de la matière dans la zone d'extraction, la variation des opérations de chargement et transport) est exécuté jusqu'à ce qu'un changement d'état du système intervienne (panne d'équipements ou manque de matière). Le modèle de simulation appelle la procédure d'optimisation pour calculer la nouvelle optimisation. La combinaison des deux approches se fait dans une logique itérative ou rétroactive entre les deux modèles. Ceci a mené à réduire les coûts miniers liés principalement au transport, ainsi que d'autres bénéfices intangibles (aider à la décision quotidienne, augmenter la fiabilité des plans miniers, analyser les scénarios et l'utilisation du matériel).
- Yuriy et Vayenas (2008) traitent la problématique de fiabilité des équipements miniers. Le travail mené combine un modèle d'évaluation de fiabilité basé sur des algorithmes génétiques avec un modèle de simulation à événements discrets pour l'analyse de la maintenance des équipements miniers. Le modèle d'évaluation de la fiabilité fournit des données concernant le temps entre défaillances (Time Between Failure TBF) à un modèle de simulation à événements discrets. Le composant de simulation émule un cycle de développement minier typique pour analyser l'effet des défaillances de l'équipement de chargement-transport sur le débit de production, la disponibilité mécanique et l'utilisation de l'équipement.
- Ben-Awuah *et al.* (2010) proposent un modèle de simulation permettant de combler l'écart entre un plan annuel déterministe à long terme et un plan quotidien dynamique à court terme. Le modèle basé sur la SED utilise comme inputs les résultats du modèle d'optimisation à long terme et intègre les contraintes et les incertitudes associées aux capacités d'extraction et de traitement, à la disponibilité des broyeurs, à la stratégie de stockage et aux exigences de mélange. Les résultats montrent que la SED permet de minimiser les divergences entre les plans à long et à court terme.

- Tarshizi *et al.* (2015) présentent un modèle de SED pour améliorer l'efficacité d'affectation des pelles-camions et de réduire l'impact environnemental du transport dans une mine à ciel ouvert de charbon à deux fosses. Il s'agit d'estimer et évaluer les besoins en équipements de transport pour l'exploitation de la mine pour augmenter de 3,8 % la productivité totale de la mine sans avoir recourt à des investissements.
- Leite- Corthésy *et al.* (2016) proposent un modèle d'optimisation de la planification des opérations de production au sein d'une mine souterraine, permettant de minimiser les écarts de planification entre le modèle hebdomadaire et le modèle par quarts. Pour compléter le fonctionnement réel, les auteurs se basent sur la SED pour évaluer les effets de : la variabilité des temps de travail, des temps de déplacement des équipes entre les sites, l'effet du décalage du début des tâches dû au nombre d'équipes limitées.

Une analyse de ces articles est illustrée sur la grille en ci-dessous (Tableau 14). En effet, nous avons complété la grille précédemment présentée au niveau de la définition du programme d'extraction par l'optimisation (Tableau 13) par les articles analysés au sujet de l'approche simulatoire.

Tableau 14. Grille d'analyse des articles étudiés dans la planification minière en utilisant la simulation.

Numéro article	Auteur (s)	Année	Type papier				Qualité du minerai extrait (Inputs)			Qualité du produit (Outputs)				Demande		Opérations d'extraction / Machines mobilisées							Chargement et transport/ Usine traitement	Destinations multiples	Méthode de modélisation			Fonction objectif	Type de décision		
																Non traité séparément			Traité séparément													
																			Caractéristiques machines													
			Article	Revue de littérature	Orienté résolution	Orienté modélisation	Unique	Hétérogène	Definie par profit	Unique	Multiple avec même ségrégation	Homogénéisation	Blending	satisfaire	Non prise en compte	Opérations fictives	Machines fictives	Préaffectation des machines	Opérations élémentaires	Dédiées	Polyvalentes	Affectation des machines			Optimisation	Nom méthode	Simulation		Stratégique	Tactique	Operationnelle
1	Askari-Nasab et al.	2011	X		X			X	X		X	X			X	X	X						UT		X	Mixed integer Linear programming		F2	X		
2	Chicoisne et al.	2009	X		X				X						X	X	X						UT		X	Linear programming relaxation		F1	X		
3	Eivazy and Askari-Nasab	2012	X			X		X			X	X			X	X	X						UT	X	X	Mixed integer Linear programming		F1			X
4	Espinoza et al.	2012		X	X			X	X		X	X			X	X	X						UT	X	X	Linear programming relaxation		F1	X	X	
5	Fioroni et al.	2008	X			X		X					X	X		X				X		X			X	Programmation mathématique	X	F2, F3			X
6	Henry Amankwah	2011	X		X				X						X	X	X						UT		X	Lagrangian dual heuristic, Maximum flow problem		F1	X		
7	Kozan and Liu	2016	X			X													X	X		X			X	An improved shifting bottleneck procedure algorithm based on the extended disjunctive graph		F4			X
8	Lambert and Newman	2013	X		X				X						X	X	X								X	Tailored lagrangian relaxation		F1	X	X	
9	Lamghari et al.	2015	X		X				X						X	X	X								X	Linear programming and variable neighborhood descent		F1		X	
10	L'Heureux et al.	2013	X		X			X			X	X			X				X	X		X	UT		X	Mixed integer programming		F2			X
11	Liu and Kozan	2016	X		X				X						X	X	X								X	New graph-based algorithms based on network flow graph and conjunctive graph theory		F1		X	
12	Meagher et al.	2014 (a)		X	X				X						X	X	X						UT		X	Lerch Grossman Algorithm, Seymour's Parametrized Pit Limit Algorithm, Network Flow Approaches, IP formulations, Fundamental Tree,		F3	X		
13	Meagher et al.	2014 (b)	X		X		X			X					X								UT		X	The integer program formulation		F1	X		
14	Moosavi et al.	2014	X		X			X	X	X		X			X	X	X						UT		X	Lagrangian relaxation, Genetic algorithm		F1	X		
15	Moreno et al.	2016	X			X		X	X	X		X			X	X	X						UT		X	Linear integer model		F1		X	
16	Mousavi et al.	2016 (a)	X		X			X			X	X			X	X		X		X			UT	X	X	Simulated annealing (SA), Tabu search (TS), SA-TS,		F2		X	
17	Mousavi et al.	2016 (b)	X			X		X			X	X			X	X		X		X			UT	X	X	simulated annealing (SA), branch-and-bound (B&B) et large neighbourhood search (LNS)		F2			X
18	Mousavi et al.	2014	X			X		X			X	X			X	X				X			UT	X	X	Mixed Integer Programming		F1		X	
19	Mustafa Kumral	2012	X					X	X		X				X	X	X						UT	X	X	Mixed Integer Programming		F1		X	
20	Mustafa Kumral	2013	X		X			X	X		X				X	X	X						UT	X	X	Goal programming (GP) and Simulated annealing (SA)		F5		X	
21	Sturgul et Li	1997		X																							X				X
22	Rasche et Sturgul	1991	X																				CT				X				X
23	Sturgul et Harrison	1987	X																				CT				X				X
24	Panagiotou	1999		X																			CT				X				X
25	Sturgul	1999		X																							X				X
26	Turner	1999	X																				CT				X				X
27	Vagenas, 1999	1999		X																							X				X
28	Basu et Baafi	1999		X																							X				X
29	Govinda Raj and Vardhan	2009		X																			CT				X				X
30	Awuah-Offei et al.	2003	X																				CT				X		X		
31	Abdulmalek et Rajgopal	2007	X																								X				X
32	Yuriy et Vayenas	2008	X																				CT		X	Genetic algorithm	X				X
33	Ben-Awuah et al.	2010	X																				UT		X	Mixed integer Linear programming	X	X			X
34	Tarshizi et al.	2015	X																				CT				X				X
35	Leite- Corthésy et al.	2016	X			X													X						X	Mixed integer Linear programming	X				X
36	Notre travail	2017	X			X		X					X	X					X	X	X	X	CT		X	Mixed Integer Programming	X	F6		X	

Définition des notations utilisées dans la grille:

* Chargement et transport/ Usine traitement: CT: Chargement et transport. UT: Usine traitement.
* Fonction objectif: F1: Maximiser le profit. F2: Minimiser les coûts. F3: Maximiser la production du minerai. F4 : Minimiseer le makespan. F5: Minimiser les écarts des capacités. F6: Minimiser la production pour satisfaire la demande en minerai extrait.

À partir de cette recherche bibliographique et de la grille d'analyse, nous pouvons constater que les articles analysés ne s'intéressent pas à une description explicite des principes et des fondements de la modélisation effectuée mais plutôt à une description des travaux existants dans la littérature au sujet de la simulation de la mine et des outils qui ont été mobilisés. Les modèles développés ne reproduisent pas le processus extractif avec une granularité fine des blocs, des opérations et des machines.

En outre, la plupart des travaux ont abordé les problématiques d'affectation des camions/pelles. Notre analyse bibliographique nous laisse penser que l'apport de ce travail de recherche qui s'intéresse à une granularité fine de modélisation du processus extractif et qui traite l'ensemble des éléments définis dans une simulation à évènements discrets : 1. Unité de traitement : est le bloc. 2. Opérations élémentaires : constituant le processus d'extraction. 3. Machines polyvalentes et dédiées : au niveau des opérations élémentaires et leurs affectations. 4. Évaluation d'alimentation des stocks de minerai : au niveau de la sortie du chantier pour préparer le produit fini (Chapitre 5).

4.2 Formulation du problème de planification minière par la simulation à événements discrets

Après une présentation des principes utilisés dans la simulation du processus d'extraction (§4.2.1), et suivant la description du problème qui a été faite dans la section (§2), nous illustrons son utilisation en § 4.2.2.

4.2.1 Principes mobilisés

La modélisation des processus d'extraction miniers par la simulation à événements discrets et les décisions de production connexes reposent sur la combinaison de deux visions complémentaires des panneaux du gisement :

- La *vision longitudinale* s'intéresse à l'exploitation progressive d'une case d'un panneau, de la première couche de ce panneau à sa dernière couche. Cette transformation progressive de la case n_p du panneau *p* passe par l'exécution successive de ses I_p *opérations chronologiques* i_{n_p} (voir Tableau 9 et Tableau 12).
- La *vision transversale* s'intéresse à « l'état » des cases du gisement à l'instant *t*, ce qui relève d'une vision du gisement « vu ciel ». Elle repose sur les *opérations élémentaires o* (Tableau 10). À n'importe quelle date *t*, on peut effectuer une partition de l'ensemble des cases d'un gisement en 7 ensembles, un par opération élémentaire, chaque ensemble étant à son tour partitionné en deux sous-ensembles : le premier regroupe les cases en cours de traitement pour l'opération considérée et le second, les cases en attente de traitement de cette opération.

Dans ce contexte, la modélisation du processus d'extraction repose sur 7 ensembles de processeurs hétérogènes parallèles. Chaque ensemble est spécialisé dans le traitement d'une opération élémentaire *o*. Un ensemble comprend les cases n_p dont l'opération chronologique i_{n_p} se réfère à l'opération élémentaire *o* $(\omega_{i_{n_p}} = o)$. Pour être opérationnel, un processeur doit mobiliser l'une des machines *m* susceptibles d'exécuter cette opération (ce qui implique $\delta_{om} = 1$ et donc $\delta_{\omega_{i_{n_p}} m} = 1$). Ces machines, dont certaines machines sont polyvalentes, sont réputées utilisables sur tous les panneaux. L'affectation de la machine *m* pour exécuter l'opération $\omega_{i_{n_p}}$ conduit au temps opératoire $\theta_{\omega_{i_{n_p}} m}$.

La modélisation du système productif de l'extraction minière par la simulation présente deux caractéristiques spécifiques.

- La première est que le système productif étudié est semi-ouvert : aucun item n'entre dans ce système mais des items en sortent (minerais extraits, via l'opération 8, et stérile, ce qu'illustre la partie basse de la Figure 36 correspondant au sous-processus « Transport »). L'épuisement du gisement marque la fin possible de la simulation comme elle peut être arrêtée après 4 à 12 semaines, dans une perspective de planification glissante.
- L'autre caractéristique de flux découle de l'analyse du Tableau 10 décrivant la série de 60 opérations chronologiques et délivre le sous-processus « Extraction » de la Figure 36.

La Figure 36 schématise de manière synthétique la modélisation du processus d'extraction minier implémentée dans le simulateur à événements discrets Simul8. Conventionnellement, dans ce schéma, le processeur exécutant une opération *o* sur une case représente un ensemble de *k* processeurs parallèles identiques mobilisant le même type de machine (ce nombre étant porté dans le cartouche du processeur dans la Figure 36, la flotte de camions correspondante est décrite dans le Tableau 11). Lorsque des machines de caractéristiques différentes peuvent réaliser l'opération *o*, ces alternatives sont représentées par autant de processeurs (ainsi elles sont dupliquées dans la figure). Certaines machines pouvant exécuter deux ou trois de ces opérations élémentaires, cette polyvalence est mentionnée dans le schéma par une convention de couleur, les processeurs alternatifs de la même couleur utilisant le même type de machine.

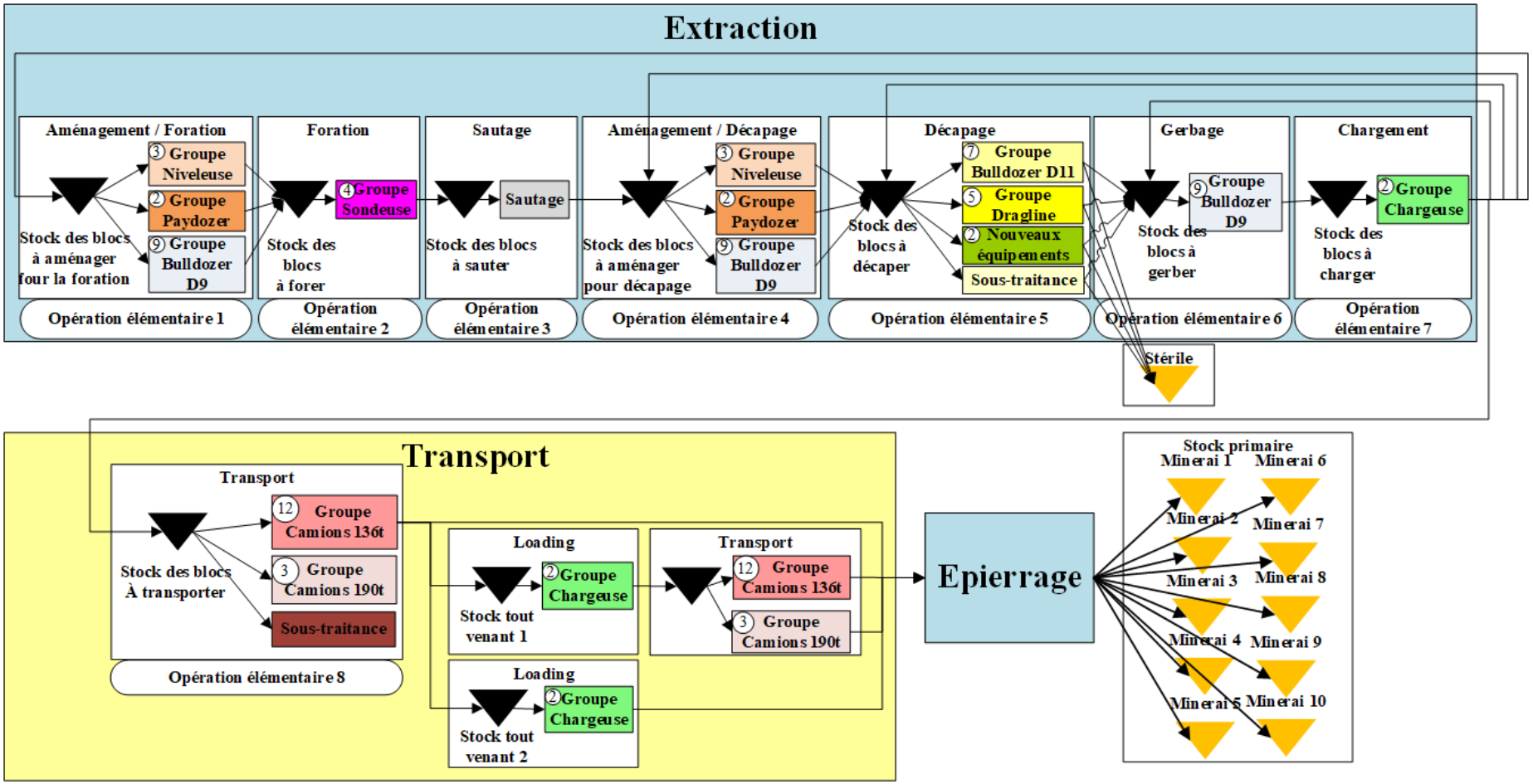


Figure 36. Modélisation du processus d'extraction du gisement en combinant la vision longitudinale et la vision transversale.

L'ensemble des couches extraites sont normalement destinées à alimenter l'installation de traitement mécanique (épierrage). En cas de saturation de l'un des 10 stocks des minerais (ou de panne du processeur d'épierrage) le minerai est stocké soit dans le *Stock tout-venant 1* situé loin de l'installation (ce qui oblige à une reprise mobilisant des camions), soit dans *Stock tout-venant 2* situé près de l'installation, (auquel cas la chargeuse qui alimente la station d'épierrage suffit). Dans les deux cas, ce stockage intermédiaire est sans valeur ajoutée.

Nous avons indiqué que cette modélisation utilisait un simulateur à événements discrets. Cette classe de simulateur est conçue pour modéliser et simuler des processus discrets et non des processus continus. La discrétisation retenue par le biais du découpage du gisement en case ne pose pas de problème pour la modélisation des opérations élémentaires 1 à 7. En aval, à partir de l'opération élémentaire 8, deux problèmes techniques se posent (et sont correctement résolus dans notre simulation, en mobilisant des principes décrits dans Bara *et al*. 2018) :

- Le poids de minerais correspondant au volume de minerais extrait de la case de la couche par l'opération est très supérieur à la capacité d'un camion traitant l'opération 8, étant entendu que les 3 types de camions utilisés ont des capacités différentes. A cet effet, on a créé un *convertisseur* qui permet de charger un camion avec un item ne dépassant pas le poids maximal (et rejetant l'excédent dans le stock amont).
- La capacité d'un stock se définit, dans un simulateur à événements discrets, par le nombre maximal d'items qu'il peut contenir. Les items qui arrivent dans un stock de minerais ne peuvent avoir tous le même poids en raison de l'hétérogénéité de la capacité des camions effectuant le transport. Pour traiter ce problème, on a créé des stocks capacitaires définis par un poids maximum : la capacité utilisée du stock est décrémentée du poids d'un item sortant (aspect non traité ici) et incrémenté par celui d'un item entrant, lequel n'est accepté que s'il ne provoque pas un dépassement de capacité.

Pour terminer, il faut évoquer le problème posé par l'affectation d'une machine venant d'achever une opération élémentaire pour toutes les cases du groupe. Ce problème est crucial pour les machines polyvalentes (bull D9, par exemple). Toutes les cases en attente de traitement pour une opération pouvant utiliser cette machine sont a

priori éligibles (rappelons que le bull D9 peut traiter les opérations élémentaires 1, 4 et 6). Il faut alors définir un indice de priorité pour chaque case au début de la simulation. Cet index est utilisé dans la sélection des blocs à traiter lorsqu'une machine se libère et défini de telle sorte à limiter le temps de déplacement de la machine à sa nouvelle affectation. La performance du système de pondération est évaluée en examinant à quel point les inputs extraits satisfont la demande finale (un éventuel sur stockage, stockage intermédiaire du minerai extrait, importance des stocks du minerai extrait dans la zone de mélange), par le processus de mélange. Ces mélanges sont définis de façon dynamique et dépendent des stocks du minerai extrait, des alimentations prévisionnelles du chantier ainsi que des calendriers de production (Azzamouri et Giard 2017, 2018). Ainsi, la confrontation entre la demande et l'offre (l'exemple du §4.2.2.3 illustre les aspects de l'offre) peut être vue comme la jonction entre un système à flux poussé (extraction) et un système à flux tiré (mélange), où ce dernier tente d'influencer le précédant. Ceci sera réalisé grâce à un système d'aide à la décision en cours de développement, où une approche empirique du système de pondération est en cours (§4.2.2.4).

4.2.2 Exemples

Nous commençons notre illustration par un exemple fictif traitant un ensemble de 19 parcelles provenant d'un seul panneau (contre environ 800 parcelles dans le problème réel). Sa petite taille nous dispense de prendre en compte les contraintes réelles du groupe de modèles. Après une description du problème et de l'initialisation de la simulation (§4.2.2.1), nous faisons une description détaillée des premières étapes de la simulation effectuée sur cet exemple (§4.2.2.2) et montrons le type de résultats obtenus par cette approche en se basant sur un petit jeu de données (§4.2.2.3) ensuite sur un jeu de données réelles (§4.2.2.4).

4.2.2.1 Initialisation du modèle de planification pour le pilotage intégré de la mine

La Figure 37 décrit l'état du système de production à l'initialisation, à partir des informations du Tableau 15, relatives à l'état d'avancement (opérations chronologiques) de chaque case. L'ordre indiqué dans le Tableau 15 est celui des opérations élémentaire (colonne 4).

Tableau 15. État du système productif à l'initialisation de la simulation.

Indice case n_p	Opération chronologique i_p	Numéro niveau c_p	Opération élémentaire o	Avancement %	Temps résiduel (h)	Temps d'avancement (h)	Indice priorité
12	40	13	1	0%	24,8	0,0	0,3
22	24	8	1	30%	42,0	18,0	0,8
32	15	5	1	20%	188,0	47,0	0,6
5	9	3	2	70%	5,0	11,7	0,6
11	9	3	2	50%	8,3	8,3	0,6
20	55	17	2	0%	11,3	0,0	0,2
15	2	1	2	0%	19,0	0,0	0,3
6	42	13	3	0%	10,0	0,0	0,8
9	56	17	3	0%	10,0	0,0	0,6
40	26	8	3	0%	10,0	0,0	0,6
24	43	13	4	40%	14,9	9,9	0,6
28	57	17	4	50%	34,0	34,0	0,8
16	18	5	4	30%	164,5	70,5	0,3
38	58	17	5	80%	6,5	25,9	0,3
30	51	15	5	0%	37,2	0,0	0,8
36	35	10	5	0%	44,7	0,0	0,6
1	20	6	6	90%	1,6	14,6	0,8
13	52	16	6	20%	44,0	11,0	0,6
17	46	14	7	30%	3,1	1,3	0,8

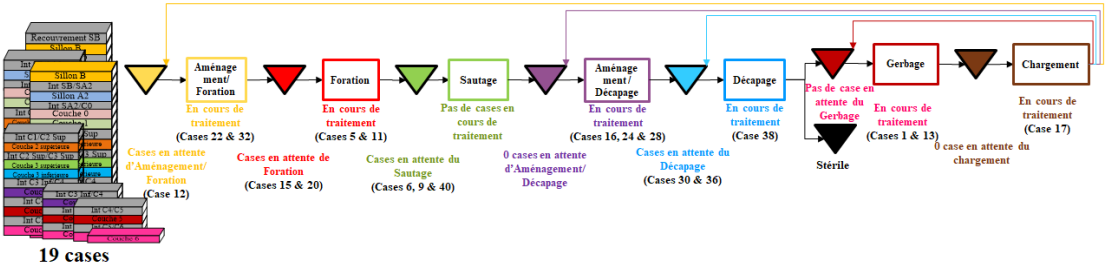


Figure 37. Vision transversale du processus d'extraction à l'instant *t*=0.

Pour les cases n_p qui attendent une opération chronologique $i_{n_p} > 1$, correspondant à l'opération élémentaire $\omega_{i_{n_p}}$, les dates d'alimentation au plus tôt des stocks en minerai extrait *j* par traitement de la 7e opération élémentaire (correspondant à l'opération chronologique γ_{pj}) sont $\Theta_{\omega_{i_p-1}} - \Theta_{\omega_{\gamma_{pj}-1}}$, dont les valeurs sont fournies par le Tableau 16. Par exemple, pour la case 20, en attente de l'opération chronologique 55, on obtient $\Theta_{\omega_{54}} = 2599$; pour le 10e minerai extrait, où $\Theta_{\omega_{59}} = 2733,7$; ce stock est alimenté par la case 20, en $2733,7 - 2599 = 134,7$ heures, au plus tôt. Pendant que l'opération chronologique est en cours, il faut soustraire la partie du temps de traitement déjà complétée $\Theta_{\omega_{i_p-1}} - \Theta_{\omega_{\gamma_{pj}-1}}$. Par exemple, 14,6 heures pour l'opération chronologique 20 à la case 1 sont déjà terminées ; la date d'alimentation au plus tôt du stock de minerai $j = 3$ de cette case sera en $1543,2 - 1527 - 14,7 = 1,6$ heures.

Le Tableau 16 fournit, pour chaque case, les dates de début et de fin d'alimentation au plus tôt des minerais extraits définis à l'initialisation de la simulation. Cette information, mise à jour à la fin de la simulation (temps T) donne les alimentations de qualité obtenues lors de la simulation. Ces alimentations sont comparées à la demande globale prévue pour redéfinir les priorités dans l'allocation des ressources au fur et à mesure qu'elles sont libérées (indice de priorité du Tableau 15). Ce retour nous conduit à l'étape dynamique de la simulation. Les principes définissant le système de pondération sont décrits dans §4.2.2.4.

Tableau 16. Dates d'alimentation du stock en minerais.

Dates de début au plus tôt d'alimentation des stock en minerais extrait dans la zone de blending

Case n_p	i_p	Recouvrement Sillon B $c_p=1$	Sillon B $c_p=2$	Intercalaire SB/SA2 $c_p=3$	Sillon A2 $c_p=4$	Intercalaire SA2/C0 $c_p=5$	Couche 0 $c_p=6$	Couche 1 $c_p=7$	Intercalaire C1/C2 Sup $c_p=8$	Couche 2 supérieure $c_p=9$	Intercalaire C2 Sup/C3 Sup $c_p=10$	Couche 3 supérieure $c_p=11$	Couche 3 inférieure $c_p=12$	Intercalaire C3 Inf/C4 $c_p=13$	Couche 4 $c_p=14$	Intercalaire C4/C5 $c_p=15$	Couche 5 $c_p=16$	Intercalaire C5/C6 $c_p=17$	Couche 6 $c_p=18$
32	15						617,1	649,5		865,7		1158,5	1175,5		1292,0		1596,4		1807,6
22	24									193,6		486,4	503,4		619,9		924,3		1135,4
12	40														114,3		418,7		629,8
5	9				290,1		964,6	997,1		1213,3		1506,1	1523,1		1639,6		1944,0		2155,1
11	9				293,4		968,0	1000,4		1216,6		1509,4	1526,4		1642,9		1947,4		2158,5
15	2		282,8		718,7		1393,2	1425,7		1641,9		1934,7	1951,7		2068,2		2372,6		2583,7
20	55																		134,7
6	42														75,4		379,8		590,9
9	56																		123,4
40	26									137,9		430,7	447,7		564,2		868,6		1079,7
16	18						315,0	347,5		563,6		856,5	873,5		990,0		1294,4		1505,5
24	43														55,5		359,9		571,0
28	57																		79,4
30	51																92,2		303,3
36	35											61,7	78,7		195,2		499,6		710,7
38	58																		19,5
1	20						1,6	34,1		250,3		543,1	560,1		676,6		981,0		1192,1
13	52																44,0		255,1
17	46																303,1		514,2

1543.2 - 1527 -14.6 =

2733.7-2599 =

Dates de fin au plus tard d'alimentation des stock en minerais extrait dans la zone de blending

Case n_p	i_p	Recouvrement Sillon B $c_p=1$	Sillon B $c_p=2$	Intercalaire SB/SA2 $c_p=3$	Sillon A2 $c_p=4$	Intercalaire SA2/C0 $c_p=5$	Couche 0 $c_p=6$	Couche 1 $c_p=7$	Intercalaire C1/C2 Sup $c_p=8$	Couche 2 supérieure $c_p=9$	Intercalaire C2 Sup/C3 Sup $c_p=10$	Couche 3 supérieure $c_p=11$	Couche 3 inférieure $c_p=12$	Intercalaire C3 Inf/C4 $c_p=13$	Couche 4 $c_p=14$	Intercalaire C4/C5 $c_p=15$	Couche 5 $c_p=16$	Intercalaire C5/C6 $c_p=17$	Couche 6 $c_p=18$
32	15						619,5	654,1		870,8		1161,1	1177,7		1296,4		1604,8		1809,5
22	24									198,7		489,0	505,6		624,3		932,7		1137,4
12	40														118,7		427,1		631,8
5	9				300,6		967,1	1001,7		1218,4		1508,7	1525,3		1644,0		1952,4		2157,1
11	9				303,9		970,4	1005,0		1221,8		1512,0	1528,6		1647,3		1955,8		2160,5
15	2		285,5	0,0	729,2		1395,7	1430,3		1647,0		1937,3	1953,9		2072,6		2381,0		2585,7
20	55																		136,7
6	42														79,8		388,2		592,9
9	56																		125,4
40	26									143,0		433,3	449,9		568,6		877,0		1081,7
16	18						317,5	352,0		568,8		859,1	875,7		994,4		1302,8		1507,5
24	43														59,9		368,3		573,0
28	57																		81,4
30	51																100,6		305,3
36	35											64,3	80,9		199,6		508,0		712,7
38	58																		21,5
1	20						4,1	38,7		255,4		545,7	562,3		681,0		989,4		1194,1
13	52																52,4		257,1
17	46														3,1		311,5		516,2

+ 2.5

4.2.2.2 Évolution du système productif durant la simulation

Dans la simulation à événements discrets, le système productif n'évolue pas continuellement mais, en simplifiant, à des dates correspondant à des entrées dans le système ou à la libération de machines. Dans notre exemple, aucune parcelle n'entre dans ou quitte le système au cours de la simulation. Le rythme de la simulation correspond à la vitesse à laquelle les machines sont libérées pour de nouvelles opérations. Dans notre exemple, le premier événement survient 1,6 heure après le début

de la simulation (voir Tableau 17, correspondant au Tableau 16, les cases étant classées dans l'ordre croissant du temps de traitement restant pour l'opération de base).

Tableau 17. Liste des cases par ordre croissant des temps résiduels.

Indice case n_p	Opération chronologique i_p	Numéro niveau c_p	Opération élémentaire o	Adancement %	Temps résiduel (h)	Temps d'avancement (h)	Indice priorité
1	20	6	6	90%	1,6	14,6	0,8
17	46	14	7	30%	3,1	1,3	0,8
5	9	3	2	70%	5,0	11,7	0,6
38	58	17	5	80%	6,5	25,9	0,3
11	9	3	2	50%	8,3	8,3	0,6
6	42	13	3	0%	10,0	0,0	0,8
9	56	17	3	0%	10,0	0,0	0,6
40	26	8	3	0%	10,0	0,0	0,6
20	55	17	2	0%	11,3	0,0	0,2
24	43	13	4	40%	14,9	9,9	0,6
15	2	1	2	0%	19,0	0,0	0,3
12	40	13	1	0%	24,8	0,0	0,3
28	57	17	4	50%	34,0	34,0	0,8
30	51	15	5	0%	37,2	0,0	0,8
22	24	8	1	30%	42,0	18,0	0,8
13	52	16	6	20%	44,0	11,0	0,6
36	35	10	5	0%	44,7	0,0	0,6
16	18	5	4	30%	164,5	70,5	0,3
32	15	5	1	20%	188,0	47,0	0,6

Evéne-ment 1

Evéne-ment 2

Evéne-ment 3

L'événement « fin d'une opération élémentaire sur une case » déclenche successivement les trois « sous-événements » suivants :

- la libération de la machine concernée ;
- la case concernée passe vers le stock de l'opération élémentaire suivante ;
- la machine libérée peut être affectée à l'une des cases en attente de traitement et pouvant mobiliser cette machine, dans le stock amont ou, éventuellement, dans un autre stock si cette machine est polyvalente.

À la fin du dernier sous-événement, on obtient *une nouvelle vision transversale du système productif*, valable jusqu'au prochain événement.

Nous illustrerons cette logique de fonctionnement sur les trois premiers événements associés à la fin des opérations en cours pour les cases 1, 17 et 5 (voir Tableau 17).

- **À l'instant t = 1.6 heures** après le début de la simulation, l'opération en cours sur la case 1 se termine, déclenchant les sous-événements suivants, illustrés à la Figure 38.
  - *Sous-événement 1* **:** l'opération élémentaire 6 (gerbage) du niveau 6, correspondant à l'opération chronologique 20, s'achève sur la case 1 ;

- *Sous-événement 2* **:** la case 1 se déplace vers le stock de cases en attente de traitement de l'opération élémentaire 7 (chargement), ce qui, pour cette case, correspond à l'opération chronologique 21 ;
- *Sous-événement 3* **:** La machine qui a assuré cette opération du gerbage (le Bulldozer D9) va se libérer et va chercher parmi les cases en attente de traitement celle qui est la plus prioritaire, sachant que cette machine polyvalente peut travailler sur 3 opérations élémentaires : aménagement pour foration, aménagement pour décapage, gerbage. Seule la case 12 est en attente de l'opération d'aménagement pour la foration, les stocks d'attente pour l'aménagement pour décapage et le gerbage étant vides. Cette case quitte donc le stock de cases en attente d'aménagement pour foration et va vers la machine effectuant l'opération élémentaire 1 d'aménagement pour foration.

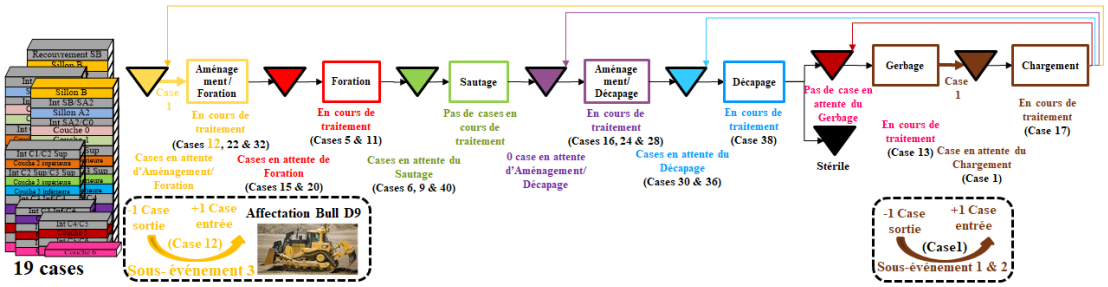


Figure 38. Événements se produisant à l'instant *t* = 1,6 heure.

- **À l'instant *t* = 3,1 heures** après le début de la simulation, l'opération en cours sur la case 17 se termine, déclenchant les sous-événements suivants, illustrés sur la Figure 39.
  - *Sous-événement 1* **:** l'opération élémentaire 7 (chargement) du niveau 14, correspondant à l'opération chronologique 46, s'achève sur la case 17 ;

- *Sous-événement 2* **:** La case 17 se déplace vers le stock de cases en attente de traitement de l'opération élémentaire 1 (aménagement pour foration), ce qui, pour cette case, correspond à l'opération chronologique 47 ;
- *Sous-événement 3* **:** La machine qui a assuré cette opération du chargement (la chargeuse) va se libérer et va chercher parmi les cases en attente de traitement celle qui est la plus prioritaire, sachant que cette machine est dédiée pour l'opération élémentaire 7 (chargement). Seule la case 1 est en attente de l'opération du chargement. Cette case quitte donc le stock de cases en attente de chargement et va vers la machine effectuant l'opération élémentaire 7 du chargement.

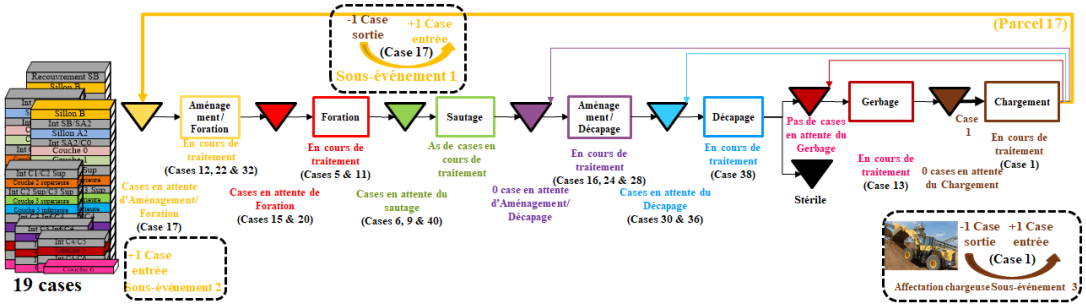


Figure 39. Événements se produisant à l'instant *t* = 3,1 heures.

- **À l'instant t = 5 heures** après le début de la simulation, l'opération en cours sur la case 5 se termine, déclenchant les sous-événements suivants, illustrés à la Figure 40.
  - *Sous-événement 1* **:** l'opération élémentaire 2 (foration) du niveau 3, correspondant à l'opération chronologique 9, s'achève sur la case 5 ;
  - *Sous-événement 2* **:** la case 5 se déplace vers le stock de cases en attente de l'opération élémentaire 3 (sautage), ce qui, pour cette case, correspond à l'opération chronologique 10 ;

- *Sous-événement 3* **:** La machine qui a assuré cette opération de foration (la sondeuse 1) va se libérer et va chercher parmi les cases en attente de traitement celle qui est la plus prioritaire, sachant que cette machine est dédiée à l'opération élémentaire de foration. Dans ce cas, il existe deux cases qui sont en attente (cases 15 et 20). Il faut prendre la case la plus prioritaire qui est la case 15.

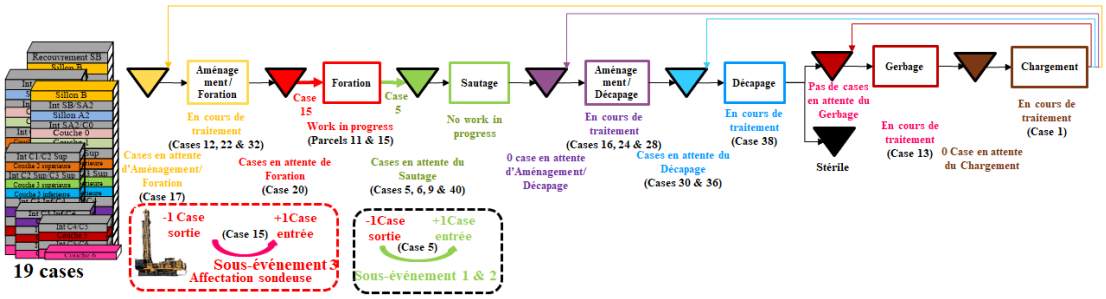


Figure 40. Événements se produisant à l'instant *t* = 5 heures.

4.2.2.3 Résultats du modèle de planification pour le pilotage intégré de la mine

Les outputs de la simulation sont des prévisions horaires d'alimentation des différents types de minerai (tel qu'illustré à la Figure 41, ce qui donne un scénario possible de disponibilité du minerai selon le système de priorité utilisé). Les exigences relatives à la teneur horaire dépendent de la production planifiée de minerais mélangés (outputs) obtenue en mélangeant les teneurs de minerai extraites (inputs). Ces mélanges sont définis de façon dynamique et dépendent du stock disponible en minerais, des alimentations en minerais extraits ainsi que le planning de production (Azzamouri et Giard 2017, 2018). Par conséquent, l'acceptabilité d'une solution de simulation, obtenue à travers un système de priorité donné, résulte d'un examen de la performance d'une optimisation de mélange en fonction de la disponibilité des différents inputs. Une approche DSS sera utilisée pour gérer les priorités et les comparaisons de performance (§4.2.2.4).

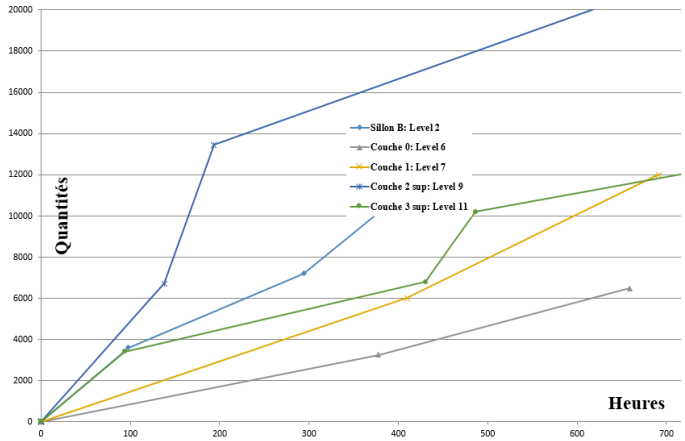


Figure 41. Courbes d'alimentation des minerais découlant du programme d'extraction.

La modélisation/simulation de l'extraction minière prend en compte de toutes les caractéristiques prises en compte sur le terrain : opérations élémentaires, machines dédiées ou polyvalentes, groupes à traiter avant libération d'une machine, blocs, relations de précédence, hétérogénéité des couches… Ce niveau de détail ne peut être retenu dans une approche d'optimisation. Il s'ensuit que la comparaison de ces deux approches est impossible, sans retenir de fortes simplifications du problème, ce qui ne présente alors aucun intérêt opérationnel pour justifier la supériorité de l'une des deux approches.

4.2.2.4 Résultats du modèle de planification pour le pilotage intégré de la mine sur un jeu de données réelles

Après avoir conçu et testé le modèle sur une petite instance de données cohérentes, nous avons procédé ensuite à une validation basée sur des données réelles tirées du terrain pour pouvoir repérer les limites du modèle et identifier les problèmes qui peuvent survenir. Nous avons cherché, dans cette phase de validation, à être plus précis et pertinent dans le choix des données à utiliser pour pouvoir reproduire d'une façon plus concise la réalité. Le modèle de planification réel est un peu plus complexe que celui utilisé pour introduire l'exemple simplifié.

La Figure 42 résume l'ensemble des paramètres utilisés dans le modèle réel, ainsi que les contraintes et caractéristiques définies par le processus extractif au sein de l'OCP.

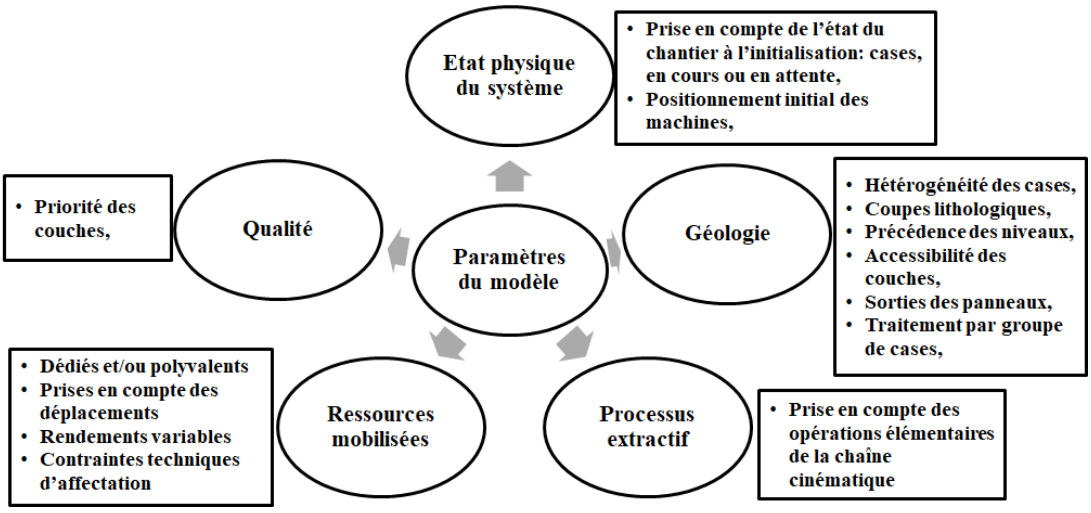


Figure 42. Paramètres du modèle d'aide au pilotage pour la planification minière.

Les paramètres décrits dans la figure 43 sont regroupés en 5 catégories qui génèrent la création de quelques nouvelles données :

- ***(i)* État physique du système :** il s'agit en premier lieu de définir l'état du chantier à l'initialisation du système et ce à travers une définition précise de l'état des cases (en attente de traitement, en cours de traitement, état d'avancement). Deuxièmement, il s'agit de définir le positionnement des équipements (utilisation pour traiter une case pour une opération élémentaire donnée ou en attente d'affectation). Ces éléments donnent une « photo » de la mine à utiliser comme point de départ de la planification à venir.
- ***(ii)* Caractéristiques géologiques fines** : Ce point n'a pas été abordé avant, la structure géologique de toutes les cases d'un panneau étant considérées comme identique, ce qui n'est pas le cas. La composition chimique et l'épaisseur des niveaux varient d'une case à une autre, d'un niveau à un autre et d'un panneau à un autre. Il est nécessaire de prendre compte de cette hétérogénéité pour être en mesure de garantir une prévision correcte des volumes de minerais à extraire. Il faut donc disposer de données fiables sur toutes les cases susceptibles d'être exploitées sur l'horizon de planification. Ce nombre de cases étant assez important (500 cases) on est amené à une consolidation des données pour regrouper les cases contiguës ayant exactement les mêmes caractéristiques. Pour ce faire nous avons créé une application informatique (basée sur PHP) pour automatiser cette consolidation dont

le principe suivi, décrit ici en travaillant sur les cases d'un seul panneau (cette approche étant successivement appliquée à tous les panneaux) :

- Etape 1 : Il s'agit regrouper les cases contiguës ayant la même séquence de niveaux, chaque niveau étant composé d'un minerai différent ou de stérile. Cette mise en famille conduit à créer des « Sous panneaux »,
- Etape 2 : Les cases d'un même sous-panneau peuvent avoir des épaisseurs différentes de niveaux. On est amené à effectuer une partition de chaque sous-panneau par groupe de cases, pas nécessairement contiguës, possédant les mêmes épaisseurs de niveau, désigné sous l'appellation de « Cases appartenant au même Coupe Lithologique » (CCL). La Figure 43 illustre le principe retenu. L'accès à chaque panneau est assuré à travers des sorties bien précises. Une machine ne peut entrer ou sortir d'un panneau si elle n'a pas encore atteint l'une des sorties existante au niveau du panneau.

Comme le parc matériel mobilisé est lourd et difficile à faire déplacer, nous avons repris la logique utilisée par les responsables de l'extraction en imposant un lotissement de cases. Ce dernier est un groupement de cases que l'équipement doit complètement traiter avant de réfléchir à se déplacer ailleurs. Le lotissement peut être traduit par une charge minimale de travail que la machine doit assurer dans une zone précise avant tout déplacement ou bien par rapport aux sorties existant au niveau des panneaux. Cette définition des groupes constitue l'un des paramètres de pilotage de la simulation.

- ***(iii)* Processus extractif :** le modèle permet de prendre compte de toutes les opérations élémentaires composant la chaîne cinématique (§2).
- ***(iv*) Ressources mobilisées :** il s'agit de prendre compte de la nature hétérogène des équipements mobilisés (§2). Comme les caractéristiques du terrain d'exploitation impacte fortement le rendement des machines, nous avons ainsi intégré la variabilité du rendement en termes d'équipement et du niveau à extraire. Il s'agit également d'intégrer les contraintes d'affectation des équipements parce qu'il existe des équipements qui, à cause des contraintes techniques, ne peuvent travailler que sur les niveaux supérieurs (ils ne peuvent que pousser le minerai dans le vide qui existe dans la tranchée adjacente) et d'autres qui ont la capacité de travailler sur les niveaux inférieurs (ils ont des flèches qui leur permettent de travailler sur des hauteurs spécifiques). Nous avons pris en considération la

préoccupation du terrain d'une minimisation des transports dans la définition du système de priorisation des cases candidates à l'utilisation d'une machine venant de se libérer, en tenant compte à la fois du déplacement et d'intérêt des cases dans la production au plus tôt de minerais considérés comme prioritaire (Figure 44). L'affectation de la machine dépend également de l'emplacement de la case c'est-à-dire que la case qui est proche de l'emplacement de la machine est plus prioritaire par rapport à celle qui est plus loin (une définition plus détaillée de la façon de calculer ce paramètre de déplacement est citée dans le paramètre suivant).

- ***(v)* Qualité :** le choix des cases à extraire se base principalement sur les couches à extraire définissons pour chaque case (en prenant compte de son état c'est-à-dire le premier niveau apparent) un indice de priorité qui est lié principalement à trois paramètres :
    - Priorité de la couche : cet indice cherche à calculer la priorité de la couche par rapport aux demandes à satisfaire et au blending dynamique à effectuer (Figure 45). En effet, si nous prenons l'exemple en ci-dessous (Tableau 18) qui porte sur la demande annuelle en 2017 des cinq qualités à satisfaire à la sortie de la mine de Ben Guerir et en se basant sur le modèle de Blending (Chapitre 5) nous définissons la quantité minimale de chaque couche source que nous devons avoir pour satisfaire chaque demande. Ainsi, nous classons ces couches par ordre de priorité décroissant telle que la couche dont la quantité à consommer est élevée doit avoir également une priorité élevée par rapport aux autres couches et ainsi de suite (Tableau 18).
    - Déplacement de la machine : c'est un indice qui varie au fur et à mesure de la simulation. Il s'agit en fait de définir la distance à parcourir entre le positionnement de la machine et la case susceptible d'être exploitée. Ainsi, une mise à jour de cet indice est réalisée en fonction du nouvel emplacement pris par la machine (Figure 44).
    - Accessibilité de la couche : nous définissons à ce niveau un indice de priorité de la case qui est lié au temps d'accessibilité par rapport à chaque niveau. En se basant sur un rendement moyen par opération élémentaire, nous avons calculé le temps de traitement de chaque opération et chaque niveau et par la suite le temps cumulé nécessaire

pour atteindre chaque niveau en commençant dès le premier niveau apparent de la case (Tableau 16).

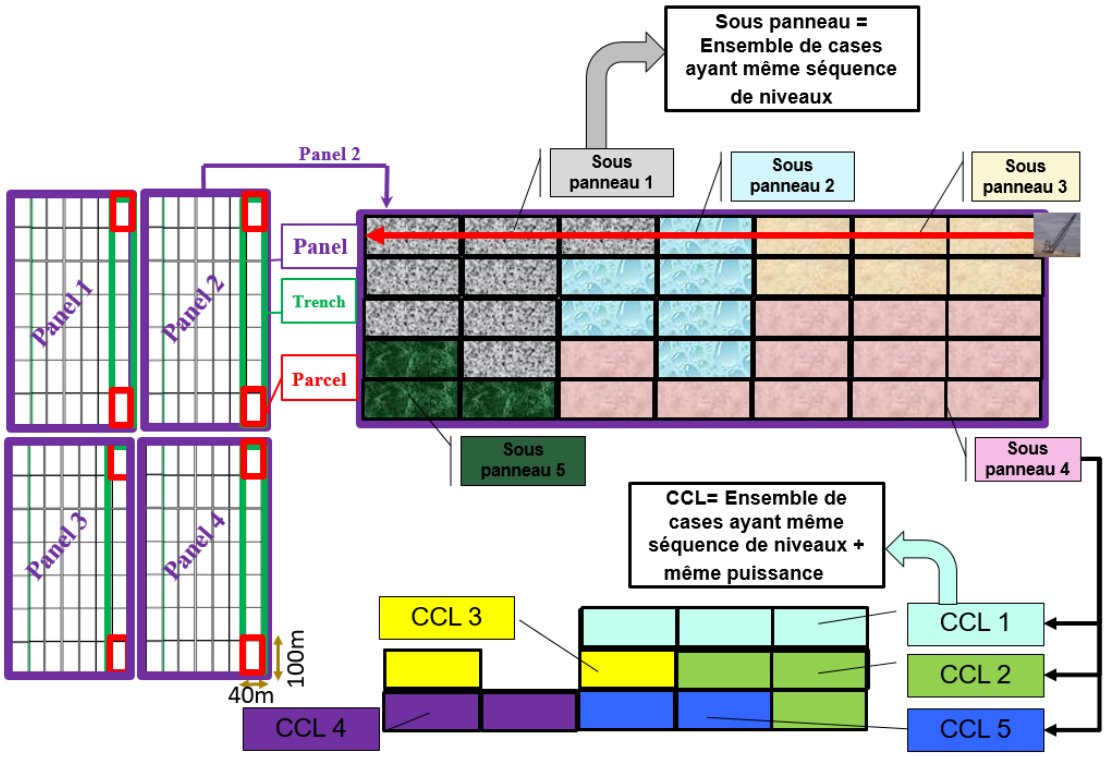


Figure 43. Illustration de la logique de constitution des sous-panneaux et des CCL.

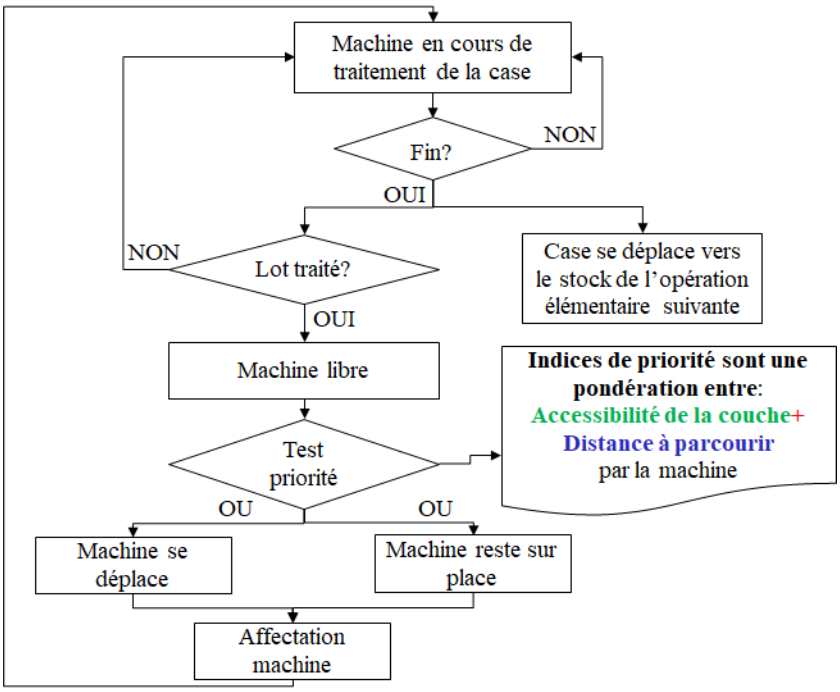


Figure 44. Logique d'affectation des machines selon les indices de priorité.

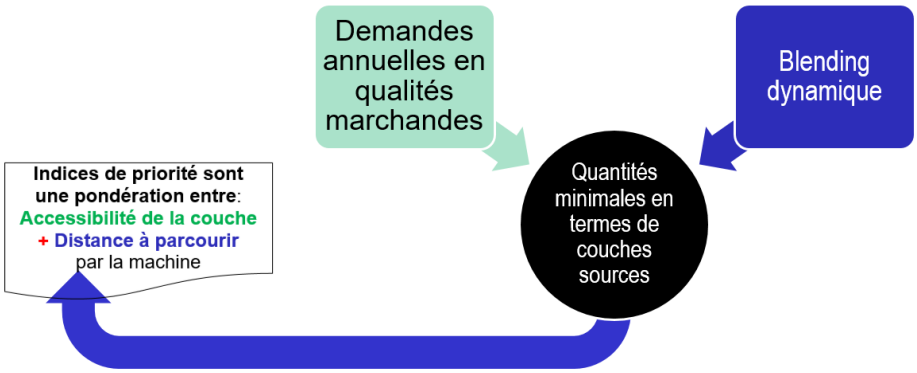


Figure 45. Relation entre les demandes, le blending dynamique et les indices de priorité.

Tableau 18. Exemple de définition des indices de priorité à partir des demandes de 2017.

	C3 sup	SA2	C3G	C1	C0	C4	C5	C2 sup	SB	SX	C3 inf	C1 Exp	C2 Exp	C6	Demande 2017
	i=1	*i*=2	*i*=3	*i*=4	*i*=5	*i*=6	*i*=7	*i*=8	*i*=9	*i*=10	*i*=11	*i*=12	*i*=13	*i*=14	(TSM)
Tesssenderlo	-	-	21,70%	-	10,00%	-	10,00%	-	-	-	10,60%	-	-	-	**925000**
MT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,68%	10,00%	**325000**
BT	-	25,63%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,35%	**220000**
Standard	-	-	10,00%	-	-	-	10,00%	-	-	-	-	-	-	-	**925000**
TBT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**125000**
Quantité minimale	**0**	**56386**	**293225**	**0**	**92500**	**0**	**185000**	**0**	**0**	**0**	**98050**	**0**	**57460**	**70670**	
Priorité de la couche	1	7	20	1	12	1	15	1	1	1	13	1	8	10	

Par la suite une pondération entre les deux paramètres « Priorité de la couche » et « Accessibilité de la couche » est faite afin de calculer l'indice de priorité 1 (IP1). Pour illustrer la relation entre ces deux paramètres, le Tableau 19 montre qu'en diminuant pour la même case (même état) la valeur (de 5 à 1) le paramètre « priorité de la couche » (qui est normalement un résultat du blending dynamique), l'IP1 de la case décrémente. L'amélioration du système de pondération relèvera d'un « travail de réglage » à réaliser au début de l'exploitation du simulateur.

Tableau 19. Impact de la variation du paramètre « Priorité de la couche » sur le calcul de l'indice de priorité IP1.

Num case	Sillon B	Sillon A2	Couche 0	Couche 1	Couche 0_1	Couche 2 supérieure	Couche 3 supérieure	Couche 3 inférieure	Couche 3 globale	Couche 4 supérieure	Couche 4 inférieure	Couche 4	Couche 5 supérieure	Couche 5 inférieure	Couche 5	Couche 6	Indicateur de la case
Indice de priorité	0	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	2	0	0	5	0	
44					0	0	0	0				0			363	619	1,376

Num case	Sillon B	Sillon A2	Couche 0	Couche 1	Couche 0_1	Couche 2 supérieure	Couche 3 supérieure	Couche 3 inférieure	Couche 3 globale	Couche 4 supérieure	Couche 4 inférieure	Couche 4	Couche 5 supérieure	Couche 5 inférieure	Couche 5	Couche 6	Indicateur de la case
Indice de priorité	0	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	2	0	0	1	0	
44					0	0	0	0				0			363	619	0,275

Pour montrer l'impact du temps d'accessibilité à la couche sur la définition de l'IP1, nous pouvons constater sur le

Tableau 20 que le temps d'accessibilité à la Couche 5 est plus important au niveau de la deuxième case (case 32 dont le temps est de 1 625 heures) que celui de la première case (case 44 dont le temps de traitement est de 363 heures). Cette différence peut être observée sur l'IP1, tel que la première case (case 44) est plus prioritaire que la deuxième case (case 32) : IP1 (case 44) > IP1 (case 32).

Tableau 20. Impact de la variation du paramètre « Accessibilité de la couche » sur le calcul de l'indice de priorité IP1.

Num case	Sillon B	Sillon A2	Couche 0	Couche 1	Couche 0_1	Couche 2 supérieure	Couche 3 supérieure	Couche 3 inférieure	Couche 3 globale	Couche 4 supérieure	Couche 4 inférieure	Couche 4	Couche 5 supérieure	Couche 5 inférieure	Couche 5	Couche 6	Indicateur de la case
Indice de priorité	0	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	2	0	0	5	0	

Num case	Sillon B	Sillon A2	Couche 0	Couche 1	Couche 0_1	Couche 2 supérieure	Couche 3 supérieure	Couche 3 inférieure	Couche 3 globale	Couche 4 supérieure	Couche 4 inférieure	Couche 4	Couche 5 supérieure	Couche 5 inférieure	Couche 5	Couche 6	Indicateur de la case
Indice de priorité	0	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	2	0	0	5	0	
44					0	0	0	0				0			363	619	1,376
32					754	1009	1226	1241				0			1625	0	1,032

Pour illustrer l'approche proposée, nous avons retenu le jeu de données réelles ci-dessous :

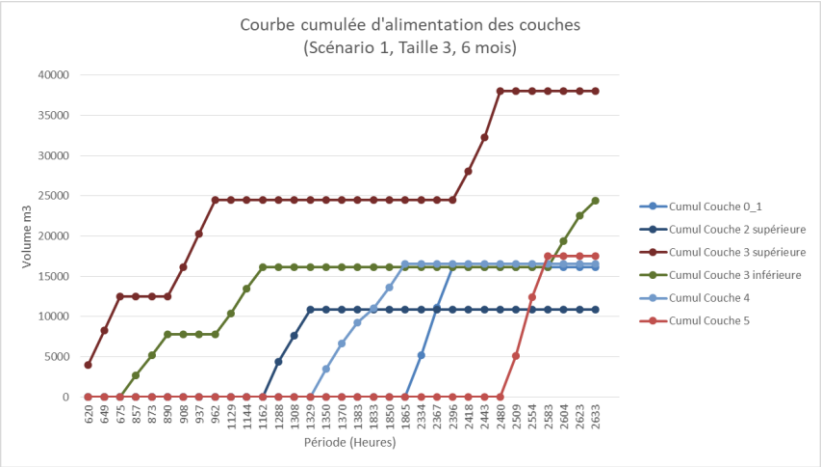
- Panneau N°2 ➔ qui s'est décomposé en 3 sous-panneaux➔ avec 31 coupes lithologiques,
- 3 tranchées (T48, T60, T64),
- 73 cases,
- Machines : 3 niveleuses, 2 Paydozers, 2 Bulldozers D9, 3 Sondeuses, Sautage, 1 Dragline PH, 1 Bull D11, 2 SNTL,
- 3 scénarios d'indices de priorités (Tableau 21),

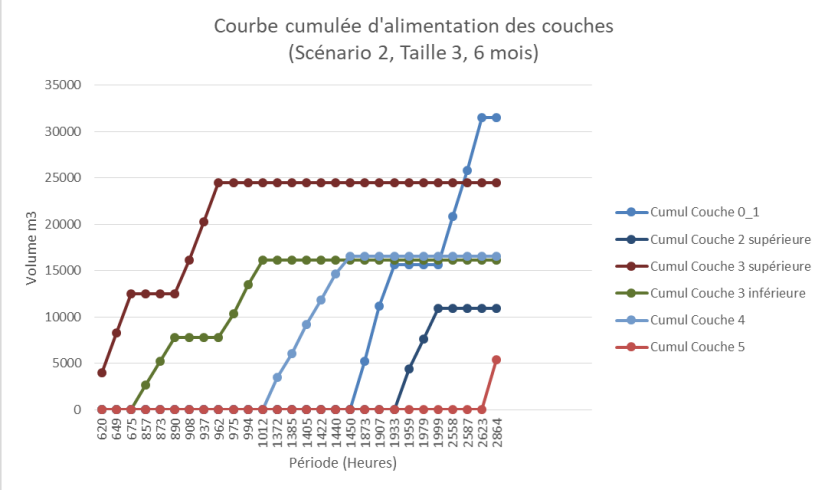
Tableau 21. Scénarios définissant les indices de priorité étudiés.

Num case	Sillon B	Sillon A2	Couche 0	Couche 1	Couche 0_1	Couche 2 supérieure	Couche 3 supérieure	Couche 3 inférieure	Couche 3 globale	Couche 4 supérieure	Couche 4 inférieure	Couche 4	Couche 5 supérieure	Couche 5 inférieure	Couche 5	Couche 6
Scénario 1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	3	0	0	4	0
Scénario 2	0	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	2	0	0	1	0
Scénario 3	0	0	0	0	4	0	3	0	0	0	0	7	0	0	1	0

Nous avons simulé l'extraction minière sur 3 mois, ce qui conduit aux courbes cumulées d'alimentation en couches sources pour différents scénarios caractérisés ici

seulement par les systèmes de pondération utilisés (Figure 46). La comparaison de ces profils d'alimentation et des Gantt d'utilisation des machines permet d'éclaire la décision pour choisir le programme d'extraction. On peut constater que les profils varient nettement en fonction des indices de priorités retenus (Figure 46).





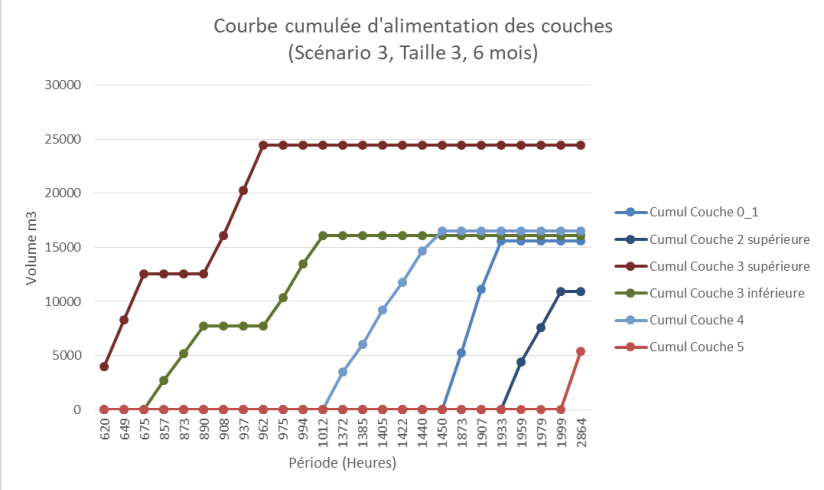


Figure 46. Résultats en courbes d'alimentations des couches par scénario.

Par la suite nous avons décidé de faire tourner le modèle pour le scénario 2 sur un horizon de planification de 6 mois et ensuite de 1 an, afin d'éviter de privilégier un scénario qui semble performant à quelques mois et défavorable sur un horizon plus grand. Les résultats du modèle de planification sont représentés sur la Figure 47. Notre simulation tourne rapidement sur plusieurs mois mais, la fiabilité des données au-delà de 3 mois est moins bonne.

En plus des courbes d'alimentation, le modèle d'aide au pilotage permet de donner les affectations des machines et également leurs occupations tout au long de l'horizon de planification. Nous illustrons à la Figure 48 le Gantt d'occupation du Bulldozer D9 ainsi que les cases sur lesquelles il a travaillé.

Nous avons fait varier la taille du groupe de cases qu'une machine doit traiter avant de pouvoir être réaffectée et donc de pouvoir se déplacer vers une autre zone. Les résultats obtenus sont affichés sur la Figure 49. Nous remarquons que la taille du lot a un impact direct sur l'évolution des courbes d'alimentation. Comme la machine ne peut commencer à travailler sur un lot de cases si les cases de ce lot ne sont pas encore toutes prêtes, nous pouvons signaler que la définition de la taille du lot est un point assez important. Une taille importante du lot impose des contraintes d'immobilisation de la machine parce qu'elle va attendre jusqu'à ce que toutes les cases soient prêtes dans le stock. Ainsi, il faudra mener une réflexion approfondie sur le dimensionnement de ces lots et analyser à quel point nous pouvons garder ou pourquoi pas annuler cette logique de lotissement de cases pour garantir plus de liberté à la machine.

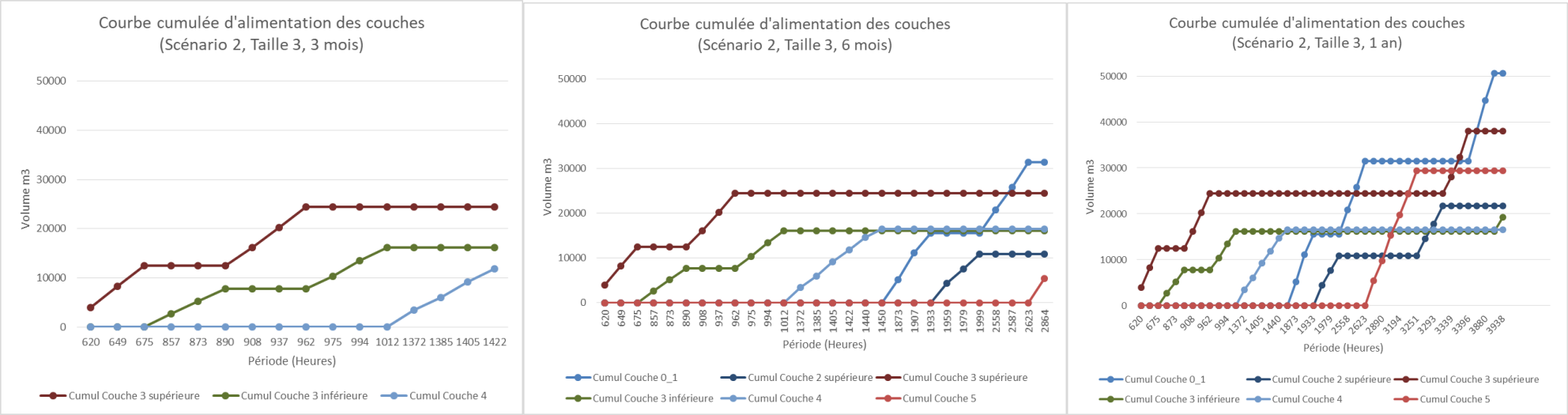


Figure 47. Courbes d'alimentation en couches sources sur 3 mois, 6 mois et 1an.

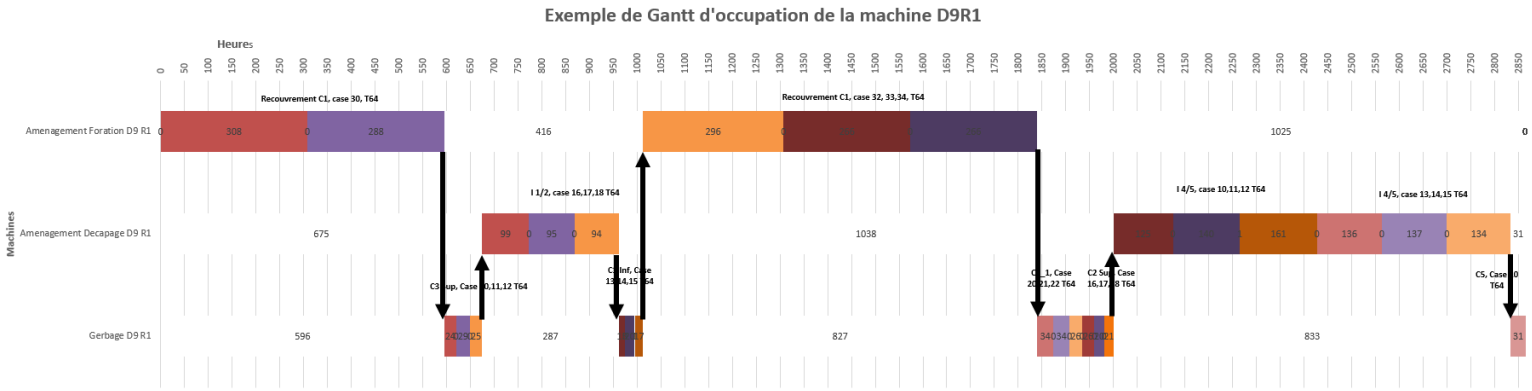
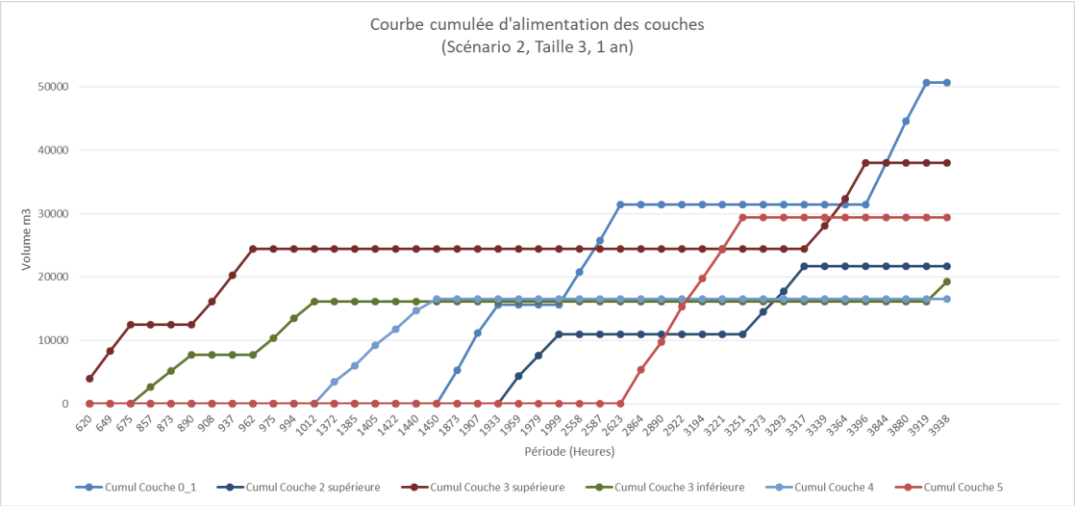


Figure 48. Exemple de Gantt d'occupation de la machine Bulldozer D9.



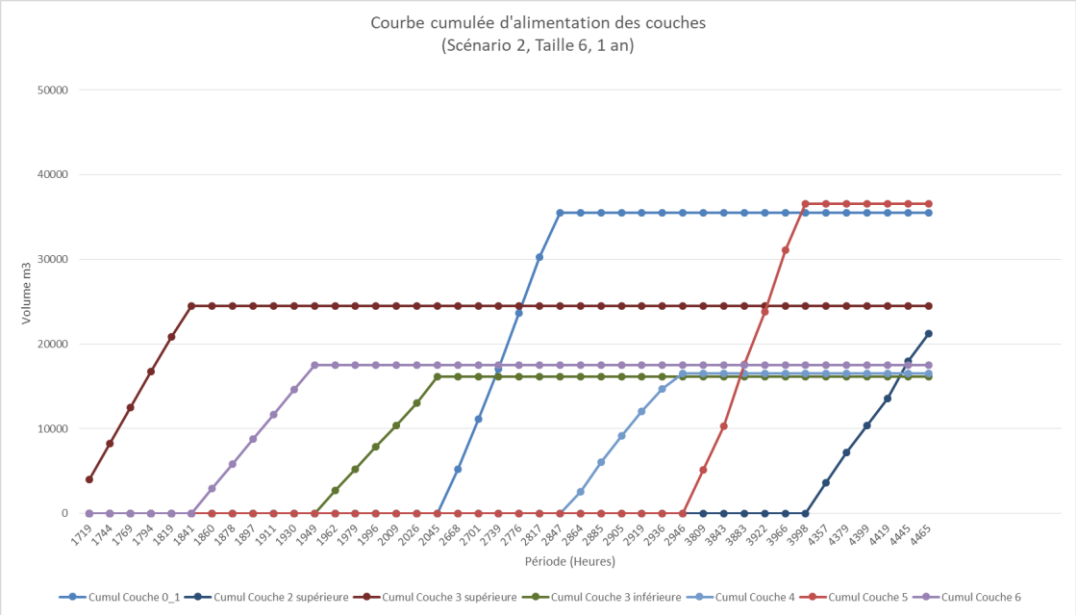


Figure 49. Courbes d'alimentation en couches sources en variant la taille du lot.

Pour faciliter la saisie des données d'entrée et l'affichage des courbes d'alimentation ainsi que le Gantt des machines, une application web a été développée dans le cadre d'un projet informatique (le diagramme de classe de la base de données est illustré sur la Figure 50). Une finalisation de cette interface est en cours (Figure 51).

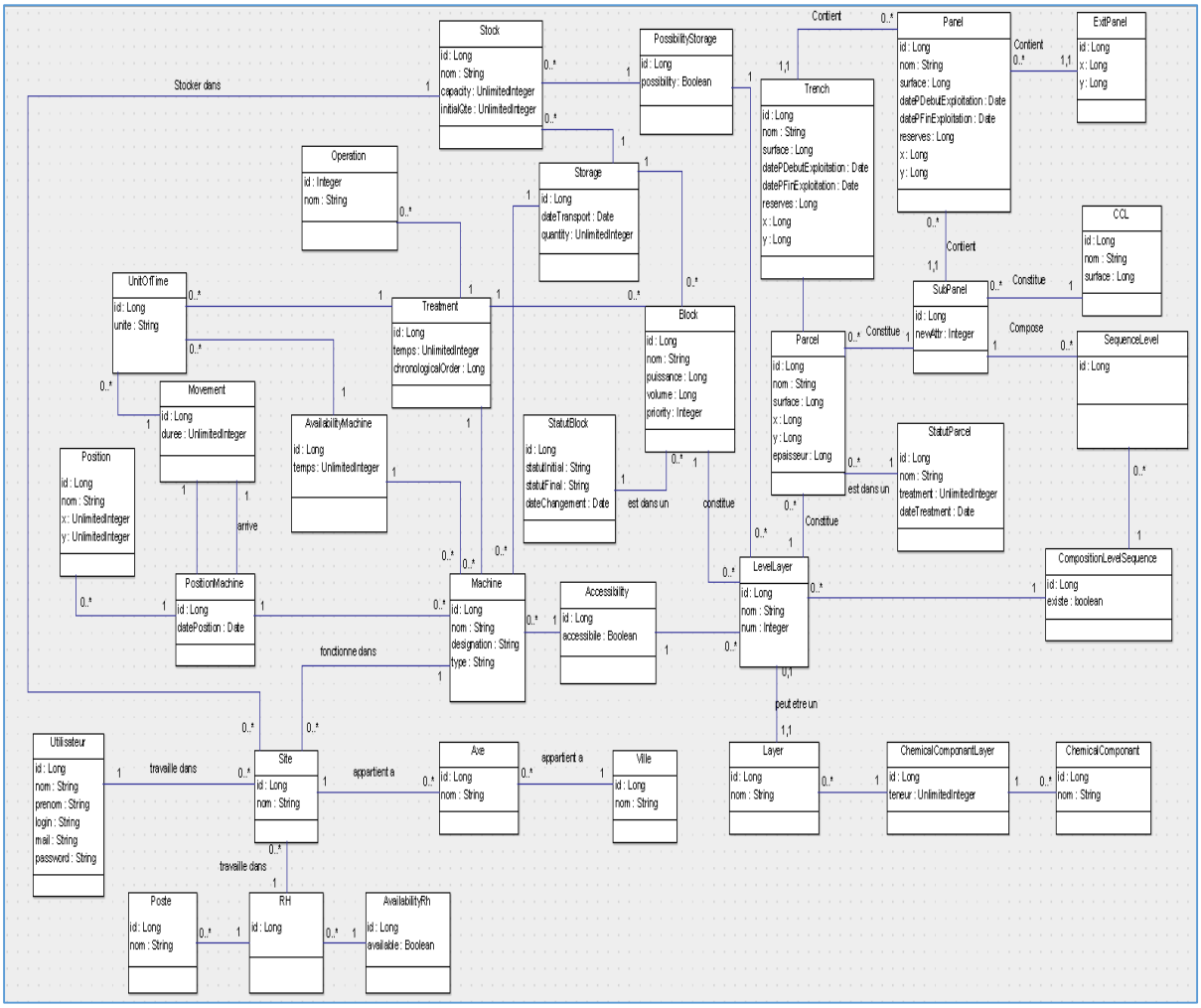


Figure 50. Le diagramme de classe de la base de données.

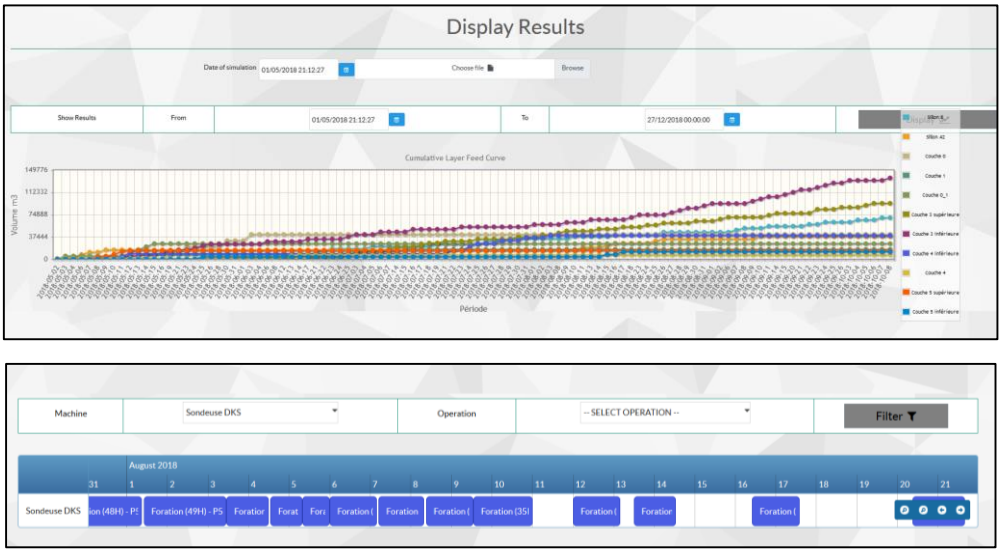


Figure 51. Interface graphique du modèle de planification minière.

4.2.2.5 Apports du modèle de planification pour le pilotage intégré de la mine

La complexité du processus extractif et l'interdépendance spatio-temporelle qui caractérise l'ensemble des entités de la chaîne poussent à évaluer les indicateurs d'efficacité à un niveau non pas local mais plutôt global. L'ensemble des changements de pratiques qui ont été proposés durant ce projet de recherche doivent être pris et évalués dans une logique d'interaction avec l'ensemble des entités de la chaîne parce que la gestion d'un processus ou la prise de décision à un niveau précis a un impact fort sur un autre niveau ou stade de la chaîne. Nous allons discuter plus en détail dans ce qui suit les apports du modèle de planification minière développé dans un objectif d'amélioration de la performance globale de la chaîne logistique.

- **Maîtriser et piloter l'extraction (flux poussé)** : l'approche proposée permet de guider l'extraction des couches sources et ce à travers la définition des indices de priorité ce qui revient à introduire du flux-tirés dans un pilotage à flux-poussés. La logique traditionnelle suivie obligeait d'extraire des couches, qui ne sont pas forcément consommées sur-le-champ, pour accéder aux couches inférieures. Ainsi, leurs acheminements engendrent une augmentation des stocks de couches sources et également le stock intermédiaire (stock tout-venant STV) qui nécessite par la suite de déstocker la couche et de la ramener vers le stock de couches sources pour un éventuel mélange. Le stockage et le déstockage au niveau du STV représentent des activités sans valeur ajoutée provoquant des charges supplémentaires à l'entreprise que nous pouvons éliminer ou au moins réduire avec cette approche. Nous présenterons dans ce qui suit (Tableau 22) une analyse préliminaire de l'évolution du STV de fin avril 2016 au fin mars 2017 (dans un souci de confidentialité nous présentons dans ces tableaux des données pro-formats).

Tableau 22. Évolution du STV de fin avril 2016 au fin mars 2017.

Fin avril 2016			
QUALITE	**VOLUME**	**THC/m3**	**THC**
PBG SAFI	116 372	0,17	140 646
LAVE	347 225	0,17	424 066
STANDAR CALCINE	23 262	0,18	30 757
EXPORT	2 953	0,18	3 957
AD	2 677	0,15	3 025
TOTAL YFIA	376 116	0,17	461 805
Total	**492 489**	**0,17**	**602 451**

Fin mars 2017			
QUALITE	**VOLUME**	**THC/m3**	**THC**
PBG SAFI	189 807	0,17	229 570,23
LAVE	496 842	0,17	614 236,14
STANDAR CALCINE	27 543	0,18	35 867,23
EXPORT	1 591	0,18	2 132,57
AD	0	-	0,00
TOTAL YFIA	525 976	0,17	652 236
Total	**715 783**	**0,17**	**881 806**

Nous avons remarqué une augmentation de +46,37 % du stock par rapport à l'année de référence. Cette augmentation qui est équivalente à 12 531 camions (de capacité moyenne de 163 tonnes) engendre des coûts de transport du chantier vers le STV qui sont énormes. Le Tableau 23 présente le résultat de l'analyse que nous avons effectuée pour chiffrer les dépenses liées au transport sans la prise en compte des coûts de transport du stérile ni d'extraction (données pro-format).

Tableau 23. Coûts de transports de phosphate entre fin avril 2016 au fin mars 2017.

						Moyenne
Transport Phosphate par sous-traitance	**Distances en km**	**4**	**8**	**9**	**12**	**8**
	Coût de chargement d'une tonne	0,26	0,26	0,26	0,26	0,3
	Coût TKU	0,68	1,36	1,24	1,66	1,23
	Variation du STV entre 2016 et 2017	279355	279355	279355	279355	279355
	Tonnage total du STV à fin mars 2017	881806	881806	881806	881806	881806
	Coût de transport de la variation du STV	**6073179**	**22700391**	**23384810**	**41160172**	**2916472**
	Coût total de transport du STV à fin mars 2017	**2621843**	**9799953**	**10095423**	**17769198**	**9206073**

Il est parfaitement clair que nous pouvons réaliser des gains énormes à ce maillon de la chaîne parce que le modèle de planification empêche d'extraire pour rien mais plutôt il cherche juste ce qui va être consommé par la suite dans la constitution des mélanges.

- **Accroître la flexibilité** : la logique la plus évidente et la plus simple que l'on peut adopter dans le processus d'extraction des couches sources pour optimiser l'utilisation des machines, consiste à exploiter la mine couche par couche.

Autrement dit, il s'agit d'extraire une seule couche tout au long de la tranchée et ensuite descendre à la couche qui est en dessous, ainsi de suite jusqu'à épuisement de la tranchée. En suivant cette logique il est impossible de satisfaire les contraintes en aval étant la constitution des mélanges à partir de différentes couches sources, d'autant plus qu'il n'existe pas de couche source réunissant toutes les exigences de la charte qualité des clients. Ainsi, la variabilité des couches sources disponibles dans le chantier et qui feront objet d'un éventuel processus de mélange sera fortement réduite. Notre modèle de planification minière offre toute la flexibilité nécessaire à court terme et à long terme. La conversion des demandes de qualités marchandes en qualités sources varie en fonction de nombreux paramètres comme on le verra au chapitre suivant. Les marges de manœuvre dont on dispose alors permettent d'orienter l'extraction des minerais en tenant compte de la demande à satisfaire à quelques semaines tout en ménageant la variété minimale de d'offre de minerais à plus long terme.

- **Assurer une hétérogénéité minimale** : le fait que le modèle de planification permet de mieux piloter le flux poussé au niveau du chantier c'est-à-dire que nous n'allons pas extraire pour rien, d'accroître la flexibilité qui en d'autres termes signifie de rendre flexible les opportunités offertes par le chantier et de réduire la variabilité qui désigne une maîtrise de l'information à utiliser pour le mélange, va permettre d'assurer une hétérogénéité minimale et suffisante des inputs (couches sources) et des outputs (qualités). Cette hétérogénéité minimale est mesurée et garantie à travers le degré de satisfaction de la demande en aval.
- **Éviter le stockage inutile :** ce point est traité par le chapitre 5 dans lequel nous proposons un modèle de « blending dynamique dont l'objectif est d'éviter le stockage inutile de minerais non utilisé engendrant des coûts supplémentaires.

5 CONCLUSION

Le modèle de planification pour le pilotage intégré de la mine développé est un outil d'aide à la décision sur un horizon temporel de 3 mois. Il consiste à mesurer l'impact des décisions prises en amont de la chaîne (processus extractif) sur son aval (alimentation des stocks en couches sources) en prenant compte de l'ensemble des caractéristiques et contraintes minières.

Ce modèle a comme objectif de reproduire le processus extractif actuel avec une granularité plus fine par rapport aux travaux existant dans la littérature. Il s'agit de pendre compte de l'ensemble des paramètres du système à savoir : l'état physique du système, les caractéristiques géologiques du gisement, le processus extractif (foration, sautage, …), le parc matériel, la qualité à satisfaire. Le modèle nous permettra de définir les cases à extraire afin de préparer les couches les plus prioritaires à intégrer dans la constitution des qualités marchandes demandées sur l'horizon de planification. Les sorties du modèle sont sous forme de courbes d'alimentation prévisionnelles en couches sources ainsi que de gantt d'occupation des machines. A travers ces résultats nous pouvons vérifier par la suite si les alimentations obtenues nous permettront effectivement de satisfaire la demande client en termes de couches marchandes ou pas et ce à travers le modèle de blending dynamique qui fera l'objet du chapitre suivant. D'un point de vue Lean Mining l'intérêt de ce travail consiste principalement à extraire juste ce qui est demandé, ce qui pourra réduire les stocks et notamment les activités de non-valeur ajoutée (liées au stockage et le déstockage du minerai au niveau du stock intermédiaire « stock tout venant » et par conséquent les charges supplémentaires engendrées par ceci).

Les résultats du modèle de planification (alimentations en couches sources) seront testés par la suite par le modèle de blending dynamique qui devra définir les mélanges à effectuer afin de préparer les qualités marchandes (chapitre 5). Si ces demandes ne peuvent pas être satisfaites, il s'agira de revenir sur les décisions prises en amont. Ainsi nous entrons dans une boucle rétroactive entre les deux modèles jusqu'à obtenir le meilleur scénario.

Le blending dynamique consistera à définir les mélanges optimaux en prenant compte des opportunités offertes par le chantier. Une présentation du principe de blending dynamique ainsi qu'une illustration de ses variantes et sa flexibilité seront abordés dans le Chapitre 5. Un couplage entre les deux modèles fera également objet d'une discussion dans ce chapitre.

CHAPITRE 5

LE BLENDING DYNAMIQUE COMME SOURCE DE FLEXIBILITÉ ET D'EFFICACITÉ DANS LA GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE DE PHOSPHATE

1 INTRODUCTION

Dans le cadre de la logique du Lean Mining Durable qui se base sur une transformation de procédures et d'approches de gestion de la chaîne logistique minière avec moins de ressources mobilisées, nous proposons dans ce chapitre une nouvelle approche pour la constitution optimale des mélanges de minerais extraits (couches sources) pour obtenir par mélange les qualités marchandes demandées ; ce problème a déjà abordé dans Azzamouri et Giard (2017, 2018). La question primordiale à laquelle nous avons cherché à répondre est : comment peut-on satisfaire les exigences clients avec moins de ressources mobilisées tout en évitant les activités de non-valeurs ajoutées, minimisant les stocks et garantissant de la juste qualité ?

L'approche proposée ici a été développée et testée au niveau de la mine de Ben Guerir appartenant à l'axe centre. Une extension de l'approche présentée ici à d'autres mines du même axe et aux autres axes est en cours de développement dans le cadre d'autres travaux de recherche.

La mine de Ben Guerir permet d'extraire différents types de minerais avec des caractéristiques chimiques différentes (variables dans le temps et dans l'espace) (Figure 52). Le processus de blending (mélange) (ou bien ce qu'on appelle par la terminologie OCP : « *la constitution des matrices de* fabrication ») consiste à préparer à partir des minerais extraits (couches sources) cinq qualités différentes (*qualités marchandes*) avec des caractéristiques chimiques définies par le client à travers une « *charte client* ». Le processus d'extraction peut être vu comme étant un *système à flux poussé*. Les qualités marchandes sont principalement produites à la commande, de sorte que le processus de blending peut être considéré comme un *système à flux tiré*.

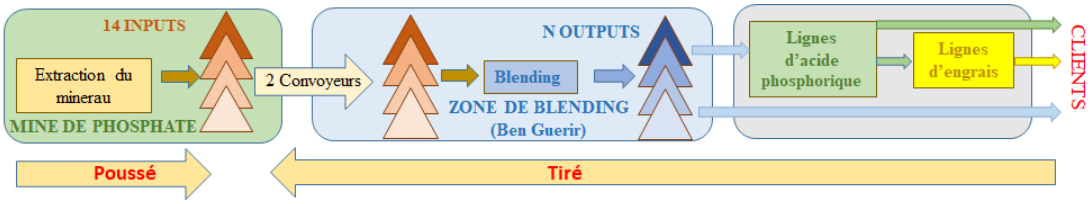


Figure 52. Positionnement du processus de blending de la mine de Ben Guerir.

Le coût du mélange n'est pas très sensible aux exigences de la qualité et plusieurs mélanges possibles peuvent être utilisés pour produire une qualité marchande définie par une charte qualité spécifique (caractéristiques chimiques). Avant le

développement de cette approche, la préparation d'un mélange pour une qualité requise était sélectionnée parmi un nombre limité de compositions possibles. Autrement dit, il existait quelques nomenclatures figées définissant pour chaque qualité marchande les couches sources à utiliser pour la produire. L'absence, en quantité suffisante, de l'une des couches prédéfinies par ces nomenclatures figées engendrait des perturbations au niveau du chantier (changement de planning de production, déplacement des machines…) pour pouvoir ramener le minerai requis. Cette solution générait des coûts supplémentaires en raison de l'extraction d'urgence et de la conservation du stock (stockage temporaire des couches supplémentaires qui ont été extraites pour accéder aux couches souhaitées qui sont en dessous). La nouvelle approche développée montre comment l'unité de blending peut gagner en efficacité et efficience en utilisant une version étendue du modèle de blending qui définit conjointement les minerais à acheminer de la mine et les mélanges optimaux des commandes à satisfaire. Il prend en compte les spécificités suivantes qui déterminent la disponibilité des inputs :

- Les inputs utilisés pour le blending ne sont pas achetés mais totalement extraits des couches composant les gisements qui appartiennent à l'entreprise. Pour pouvoir extraire une couche à un endroit particulier, les couches supérieures doivent être préalablement dégagées ou exploitées ; cela implique que tous les minerais peuvent ne pas être tous disponibles à un moment donné et que la disponibilité d'un minerai particulier est assez irrégulière. Les minerais extraits peuvent rester sur le chantier tant que le programme d'extraction n'a pas besoin d'accéder à la couche inférieure.
- L'alimentation des stocks d'inputs (couches sources) est effectuée par deux convoyeurs. Un minerai extrait ne peut pas être transporté simultanément par les deux convoyeurs. Cette alimentation séquentielle limite la disponibilité du minerai extrait requis.
- Si un minerai extrait ne peut ni rester sur le gisement, ni être stocké dans la zone de mélange, il est temporairement stocké dans une zone de décharge éloignée, appelé « *stock tout-venant* », près de l'unité de criblage, avant d'être déstocké lorsque de l'espace se libère. Ces étapes sont coûteuses et n'ajoutent aucune valeur ajoutée au produit.
- Les caractéristiques chimiques des minerais extraits peuvent varier légèrement en fonction de l'emplacement de la couche dans le gisement.

Nous présentons notre analyse de la littérature au sujet du blending en §2. Nos modèles de mélange proposés sont décrits en §3. Nous illustrerons en §4 l'importance de la flexibilité du mélange et présente certains des facteurs expliquant pourquoi, pour des raisons d'optimisation, la composition du minerai mélangé ne peut être établie. Le principe du couplage entre le modèle de planification minière et le modèle de blending dynamique sera abordé en §5. Nous terminons par une conclusion en §6.

2 REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE BLENDING

Le problème du blending est un problème ancien en Recherche Opérationnelle (RO). Notre recherche bibliographique visait à voir si des extensions de ce modèle de base, proposées dans la littérature, étaient en mesure de répondre au problème complexe posé.

La définition de la composition optimale des produits mélangés conçus pour minimiser les coûts des produits est le premier problème abordé par la programmation linéaire dans les années 1950, ce qui demeure le seul objectif des manuels de gestion industrielle et de RO.

Les articles que nous avons analysés traitent des problèmes de blending dans divers secteurs :

- **minier ;** Williams et Haley (1959) traitent le problème du blending du charbon à coke « coking coal ». Ce travail consiste à résoudre le problème d'allocation des houillères aux unités de lavage et de blending sous contrainte de minimisation du coût de transport du charbon à coke. Chanda et Dagdelen (1995) traitent un problème de blending dans une mine de charbon dans le cadre d'une planification à court terme dont l'objectif est de minimiser l'écart par rapport aux objectifs fixés pour le tonnage et les paramètres de qualité donnés. Kumral (2003) cherche à trouver le mélange optimal de différents minerais disponibles de telle sorte à minimiser la valeur attendue et l'écart-type de coût de manière à répondre aux exigences du blending avec le niveau de fiabilité spécifié.
- **agroalimentaire ;** Steuer (1984) traite le problème de mélange de saucisses avec des critères multiples (coût, couleur, graisse, protéines, humidité, etc.). Yoon *et al.* (1997) s'intéresse au blending optimal de deux types d'ingrédients ayant des caractéristiques différentes pour produire du surimi. Pour ce faire, l'auteur part d'une même quantité de ces deux types et investigue la linéarité de leurs

caractéristiques pour ainsi aboutir à une procédure d'optimisation qui minimise le coût (ici des ingrédients) tout en respectant la qualité demandée. Stokes et Tozer (2006) traitent le cas de blending des aliments pour la vente aux activités agricoles en se basant sur de nombreux ingrédients cruciaux potentiels et de produits finis qui diffèrent selon l'utilisation.

- **chimique ;** Goldsmith (1966) discute une nouvelle méthode de blending pour réduire les fluctuations entre les niveaux de propriété des lots de matériau. Le système proposé se situe entre un mélangeur continu et un mélangeur à lot. Comparé à un système par lots simples, le papier prétend que l'opération semi-continue peut réduire la variance de mélange par un facteur s'approchant de 2, de sorte que beaucoup moins de matériel hors-norme serait produit. Ashayeri *et al.* (1994) traitent le cas du blending en cascade dans la production chimique des engrais. L'objectif de cette étude est de prendre compte de la non-linéarité introduite par les contraintes du système de fabrication des procédés ainsi que le coût du modèle. Montante *et al.* (2016) traitent le cas de blending des liquides miscibles avec des viscosités et densités différentes dans des mélangeurs statiques. Jonuzaj et Adjiman (2017) traitent le problème de conception d'un mélange optimal de solvants en se basant sur une comparaison de la performance de deux approches. Ces méthodes de résolution permettent d'obtenir les solvants à mélanger à partir d'une liste de composants purs.
- **pétrolier ;** Cain et Price (1986) cherchent à trouver le mélange optimal pour une huile lubrifiante qui est un mélange d'huile de base et d'une variété d'additifs afin de respecter les spécifications strictes des fabricants de moteurs et du gouvernement qui coûtera le moins en termes des tests. Jia et Ierapetritou (2003) s'intéressent au problème de blending du gasoil et de sa distribution dans une raffinerie. Le problème traite les opérations optimales de blending du gasoil, le transfert aux réservoirs de stock-produits, et le calendrier de livraison pour satisfaire toutes les commandes. Oddsdottir *et al.* (2013) présentent le problème du blending en cascade du pétrole qui vise à déterminer quelles quantités du pétrole brut (inputs) doivent être approvisionnées afin d'effectuer le blending pour obtenir les produits finaux (gasoil, diesel, fuel) tout en maximisant la marge bénéficiaire. Bengtsson *et al.* (2013) évoquent la problématique du blending du pétrole à partir du problème de

planification des opérations de raffinage en se basant sur la résolution de trois sous-problèmes afin de maximiser le profit (marge bénéficiaire).

- **cimentier ;** Kural et Özsoy (2004) traitent l'identification et le contrôle du processus de blending de matières premières pour produire de la farine brut de ciment. Il s'agit de déterminer les valeurs cibles de composition en oxyde des matières premières qui ont un impact direct sur la détermination de la qualité du ciment en sortie.
- **minotier ;** Karmarkar et Rajaram (2001) traitent le problème de blending au sein des raffineries de produits à base de blé et de maïs. Les décisions qui se posent dans ce processus comprennent la sélection de l'ensemble des inputs, la détermination de la quantité à produire de chaque input et la façon de mélanger les inputs pour répondre à la demande finale tout en optimisant le coût et la qualité. Bilgen et Ozkarahan (2007) traitent un problème de blending du blé avec une planification des expéditions en vrac des navires. L'objectif est de minimiser le coût total, y compris les coûts de mélange, de chargement, de transport et d'inventaire.
- **environnemental ;** Booth *et al.* (1998) traitent le cas de blending au sein d'une usine de traitement d'eau approvisionnée par un nouveau lac, source d'eau de qualité très différente. Une étude de traitement exhaustive a été menée pour préparer l'usine à la réception de la nouvelle eau. Il s'agit de traiter un mélange donné et de choisir le mélange optimal à cibler pour le traitement tout en examinant plusieurs facteurs. Les auteurs ont annoncé que la sélection d'un mélange basé sur un paramètre de l'eau source cible peut aboutir à la création d'une source d'eau plus cohérente que ce qui est réalisable en se basant uniquement sur la quantité, augmentant ainsi le potentiel d'optimisation des performances de l'usine.

L'ensemble des travaux analysés dans cette recherche bibliographique ont été évalués selon les points suivants :

- **Input :** l'analyse des inputs se base sur les éléments suivants :
  - *caractéristiques des inputs* **;** il s'agit de préciser à ce niveau la nature de la variation (fixe ou variable) des caractéristiques des inputs utilisés dans le processus blending au fil du temps. Cette variation peut être mesurée en termes

de quantité et de qualité et due à différents paramètres et conditions (localisation, source, nature de la matière première…)

- *disponibilité des inputs* **;** nous distinguons deux types : 1. les inputs utilisés sont à capacité illimitée/infinie ce qui implique que l'infaisabilité du blending n'est jamais due à une rupture d'input. Cela implique également que l'input que l'on souhaite consommer est toujours présent. 2. Les inputs utilisés sont à capacité limitée ce qui contraint le processus de blending et pousse à assurer un blend en fonction des opportunités offertes d'inputs disponibles.
- *Type d'alimentation des inputs* **;** cela définit si l'alimentation de chaque input se fait : i) d'une façon régulière au fil du temps (un rythme constant d'alimentation pour chaque input) ; ou ii) d'une façon irrégulière chose qui rend difficile une alimentation prévisionnelle exacte d'inputs et peut limiter les disponibilités des inputs uniquement sur des périodes bien précises. Il s'ajoute à ceci la nature de cette alimentation qui peut être assurée au travers : a) d'un seul convoyeur ce qui implique une alimentation séquentielle ; ou bien b) multiple ce qui permet éventuellement des alimentations en parallèle. Ces caractéristiques impliquent l'existence de contraintes de transport des inputs.
- *Capacité des stocks d'input ;* cet élément consiste à définir s'il existe une capacité maximale de stockage par input qui limite le processus d'alimentation une fois ce seuil est atteint et par conséquent exige de stocker le stock excédant ailleurs. Sinon, la capacité est illimitée chose qui facilite la programmation sans qu'il y ait de contrainte sur le stockage.

- **Processus de blending ;** il s'agit à travers cet élément de définir si l'unité de blending est composée de plusieurs processus parallèles. Dans ce cas, nous pouvons procéder à la constitution de différents blending en même temps. Sinon, le processus de blending est unique auquel cas, un seul blending est possible à la fois.
- **Output** ; l'analyse des caractéristiques des outputs s'est basée sur les éléments suivants :
  - *caractéristiques des outputs* **;** il s'agit de définir si les outputs à préparer par le processus de blending ont des caractéristiques (de qualité, de quantité) qui changent au fil du temps ; ou au contraire qu'il existe des contraintes fixes et

uniques permettant de définir les caractéristiques qu'il faut impérativement respecter dans la constitution de chaque output.

- *type d'alimentation des outputs* **;** il s'agit de définir si l'alimentation des outputs se fait d'une façon régulière c'est-à-dire suivant un ordre spécifique au cours du temps. Ou bien d'une façon irrégulière à cause des contraintes spécifiques (demande à satisfaire, disponibilité des inputs…). Cette partie inclut également la façon dont l'alimentation des stocks des outputs est effectuée c'est-à-dire est-ce par un convoyeur unique ce qui implique qualité unique en cours de constitution ou des convoyeurs multiples (parallèles outputs en cours de constitution).
- *Capacité des stocks des outputs* **:** ceci défini s'il existe une capacité maximale à ne pas dépasser lors du stockage des outputs ou c'est à capacité illimitée.

- **Nature de blending ;** il consiste à définir si la résolution du problème de blending traité se base sur une demande précise à satisfaire qui comporte une quantité et qualité(s) définies ou qu'on prépare les outputs pour qu'ils soient stockés en attendant l'arrivée de la demande client. Le blending peut être également traité en cascade tel que les outputs du premier blend peuvent être mélangé pour entrer dans un deuxième blend. Sinon le blending est dit unique s'il est exécuté à un niveau unique.

- **Méthode de résolution ;** la résolution du problème de blending peut être effectuée en se basant sur maintes méthodes. Ainsi, il s'agit de préciser celle utilisée par chaque article.

- **Mise en œuvre sur une étude de cas ;** il s'agit de définir si le problème traité se base sur une étude de cas bien précise ou que c'est un travail théorique fait pour répondre à un problème général.

Nous présenterons à la Figure 53 la grille d'analyse des articles évalués.

N° article	Auteurs	Année	Secteur d'activité								Input							Porcessus blending	Output							Nature du blending			Type de méthode		Méthode de résolution utilisée (Anglais)	Critère de résolution			Etude de cas
											Caractéristiques des inputs en fonction du temps				Type d'alimentation				Caractéristiques des outputs en fonction du temps				Alimentation zone blending												
											Fixe		Variable						Fixe		Variable														
			Minier	Agroalimentaire	Chimie	Pétrole	Cimenterie	Minoterie	Environnement	Enseignement	Quantité	Qualité	Quantité	Qualité	Disponibilité	R/IR	P/S	Capacité des stocks des inputs		Quantité	Qualité	Quantité	Qualité	R/IR	P/S	Capacité des stocks des outputs	S/C	U/Cs	Autres	Déterministe	Stochastique		Coût	Qualité	Autre	
1	Mustafa Kumral	2003	X										X	X	IL							X	X								X	Chance-Constrained Programming, Multi-objective simulated annealing	X			X
2	Booth et al.	1998							X					X	IL	R	P		P			X	X	IR	P		C			X				X	X	X
3	Ralph Steuer	1984		X									X	X		IR		L			X	X					C			X		Multiple objective linear programming	X			
4	Chanda et Dagdelen	1995	X										X	X	IL	R	P			X	X			R			S	Cs		X		Goal programming and interactive graphics systems	X			X
5	Ashayeri et al.	1994			X								X	X		IR			P		X	X					C				X	Mixed-integer programming	X	X		X
6	Karmarkar et Rajaram	2001						X				X	X			IR	S	L			X	X		IR	S	L	C			X		Mixed integer nonlinear programming	X			X
7	Bilgen et Ozkarahan	2007						X				X	X			IR	S	L			X	X		IR	S	L	C			X		Mixed integer linear programming	X			X
8	Williams et Haley	1959	X								X	X				R	P		P			X	X				C					Linear Programming	X			
9	Oddsdottir et al.	2013				X							X	X		IR	P	L	P			X	X	IR			C	Cs				Mixed integer nonlinear programming	X			X
10	Bengtsson et al.	2013				X							X	X	L	IR	X	L	P			X	X	IR			C	U			X	Robust solution approach (Heuristic)	X			X
11	Yoon et al.	1997		X							X			X	L				U		X							U	X	X		Linear Programming	X			X
12	Jia et Ierapetritou	2003				X							X	X	IL			L	P						P		C					Mixed integer linear programming			X	X
13	Jonuzaj et Adjiman	2017			X										IL				U			X	X	R				Cs		X		Generalized Disjunctive Programming		X	X	X
14	Kural et Özsoy	2004					X							X	IL		S		U				X		S		S	U			X	Linear multivariable stochastic model			X	X
15	Montante et al.	2016			X							X	X			IR			P		X	X		IR					X	X		Numerical calculation of chemical equations and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations		X	X	X
16	Stokes et Tozer	2006		X								X	X			IR					X	X		IR			C					Non linear programming	X	X		X
17	Goldsmith	1966			X						X	X				R	S	L	U				X	R	S			Cs			X	Statistical approach			X	X
18	Cain et Price	1986				X						X	X		IL	IR			U		X	X		IR				U			X	Probabilistic programming	X			X
Us	Azzamouri et Giard	2017	X										X	X	L	IR	S	L	P		X	X		IR	S	L	C	U		X		Mixed integer linear programming	X	X	X	X

Signification des notations utilisées dans la grille:

* Disponibilité: L: Limitée. IL: Illimitée.
* Type d'alimentation des inputs/outputs: R: Régulière. IR: Irrégulière. P: Parallèle. S: Séquentielle
* Capacité des stocks: L: Limitée. IL: Illimitée
* Porcessus blending: P: Parallèle. U: Unique
* Nature du blending: S: pour Stock. C: pour Commande. U: Unique. Cs: en Cascade.

Figure 53. Grille d'analyse des articles traitant du blending.

En guise de conclusion pour cette analyse, nous pouvons annoncer que le problème de blending a été traité différemment par les travaux existants dans la littérature et nous avons résumé les principaux critères, qui nous ont menés à élaborer ce présent travail, se manifestent dans :

- **Le type d'alimentation des inputs** : il existe deux types d'alimentation : *i*) Les unités de blending sont alimentées par des convoyeurs simples, ce qui nécessite une alimentation ***séquentielle*** (successive) des inputs. Ceci est illustré par le cas du mélange de grains en vrac Bilgen et Ozkarahan (2007), du mélange semi-continu de matériaux Goldsmith (1966) et du mélange de matières premières pour produire de la farine de ciment brute Kural et Özsoy (2004) ; *ii*) L'alimentation ***parallèle*** d'inputs est utilisée dans le mélange d'engrais Ashayeri *et al.* (1994), le pétrole brut Bengtsson *et al.* (2013) Oddsdottir *et al.*

(2013), les saucisses Steuer (1984), le charbon à coke Williams et Haley (1959) et le mélange de minerai Zhang *et al.* 2011.

- **Objectif du blending** : ceci définit si le mélange est effectué sous une logique de : *i*) flux tiré, ce qui signifie que le mélange est effectué pour répondre à un besoin spécifique exprimé par un client interne ou externe (production à la commande, *make-to-order*) ; ce cas est illustré par les articles Bengtsson *et al.* 2013 ; Bilgen et Ozkarahan 2007 ; Chanda et Dagdelen 1995 ; Karmarkar et Rajaram 2001 ; Oddsdottir *et al.* 2013 ; Steuer 1984 ; Stokes et Tozer 2006 ; Williams et Haley 1959 ; Zhang *et al.* 2011 ; ou *ii*) flux poussé consistant à produire pour stock (*make-to-stock*) en attente d'une demande éventuelle, ce qui est le cas des articles Ashayeri *et al.* 1994 ; Kural et Özsoy 2004.
- **Le critère d'optimisation** : diffère d'un article à l'autre, selon le type de blending traité. Certains articles utilisent un critère d'optimisation liés aux coûts de production ou de fonctionnement, comme illustré par les articles Ashayeri *et al.* 1994 ; Cain et Price 1986 ; Kumral 2003 ; Yoon *et al.* 1997 ; Zhang *et al.* 2011. D'autres travaux cherchent à minimiser le coût de transport (Bilgen et Ozkarahan 2007), ou à maximiser le profit comme c'est le cas des articles Bengtsson *et al.* 2013 ; Oddsdottir *et al.* 2013. D'autres articles traitant du blending se concentrent sur la qualité (Montante *et al.* 2016 ; Jonuzaj et Adjiman 2017), tandis que d'autres combinent les critères de coût et de qualité (Kumral 2003 ; Karmarkar et Rajaram 2001 ; Stokes et Tozer 2006) ou les trois critères à la fois de coût, qualité et profit (Steuer 1984). De plus, la minimisation des pénalités engendrées par des écarts par rapport aux valeurs cibles est également un critère de résolution abordé dans certains articles (Chanda et Dagdelen 1995 ; Goldsmith 1966 ; Kural et Özsoy 2004).

Sur la base de notre analyse des articles, nous avons pu confirmer que ce travail aborde un problème de blending spécifique combinant plusieurs caractéristiques qui ne sont pas pris en compte dans les travaux existant : *i*) les inputs extraits en amont de la chaîne logistique intégrée ont des caractéristiques variables dans le temps ; *ii*) la variation de la disponibilité des inputs en raison de l'accessibilité des couches au fil du temps ; iii) l'alimentation séquentielle des stocks d'inputs avec une capacité de stockage et de transport limitée. Ces contraintes doivent être prises en compte pour satisfaire les exigences de la demande en termes de qualité et de quantité. La variation

et l'incertitude des caractéristiques du système déterminent la nature spécifique du problème. En plus des critères de résolution des coûts, le présent travail aborde la question de la rareté, qui consiste à peu près à la conservation des couches riches en phosphate pour plus tard.

3 FORMULATION DU PROBLEME DE BLENDING

Nous présentons en premier lieu une version statique du problème de blending (§3.1) avant de passer à une version dynamique qui inclut l'alimentation des inputs (§3.2).

3.1 Modèle statique de blending

Le modèle statique de base (§3.1.1) comprend plusieurs variantes utilisées pour comprendre la flexibilité et les limites du blending (§3.1.2).

3.1.1 Le modèle de base

Les unités de blending peuvent produire un ensemble J d'outputs $(j=1..\mathrm{J})$. Nous abordons le problème de la production de K commandes $(k=1...\mathrm{K})$ pendant une seule période, ce qui implique l'utilisation parallèle de K unités de blending. La commande *k* concerne un seul output $j=\lambda_k$ pour une quantité. La production de la commande *k* est obtenue en mélangeant plusieurs inputs d'un ensemble I d'inputs $(i=1...\mathrm{N})$, en utilisant x_{ik} de l'input *i* dans le mélange de l'output requis λ_k par la commande *k*. La relation (1) lie les besoins en inputs et les demandes en outputs dans le blending.

$$\sum_i x_{ik} = \mathrm{D}_k, \forall k \tag{1}$$

La solution doit prendre en compte la disponibilité S_i de l'input *i* (relation 2). On note l'absence de restriction sur la disponibilité d'input si $\mathrm{S}_i = \sum_k \mathrm{D}_k$, mais cette limite peut être plus faible.

$$\sum_k x_{ik} = \mathrm{S}_i, \forall i \tag{2}$$

Les inputs et les outputs sont caractérisés par des composants C $(c=1...\mathrm{C})$. La structure d'input de l'input *i* est connue ; elle est définie comme étant le pourcentage du poids du composant *c* dans le poids total de l'input *i* (voir l'exemple dans le tableau 1). Il est important de noter que l'ensemble des inputs changent au fil du temps, en

raison du changement de leur composition chimique, ce qui est défini par les échantillons prises au niveau des zones de la mine qui devraient bientôt être extraites. La structure d'output β_{cj} de l'output j doit être conforme avec la charte client ($\beta_{cj}^{\text{Min}} < \beta_{cj} < \beta_{cj}^{\text{Max}}$ le Tableau 24).

Tableau 24. Composition des inputs α_{ci} et les spécifications de la composition de certains outputs β_{cj} .

Share α_{ci} (%) of component c in the weight of input i

Component c	Input i													
	i=1 C3 sup	i=2 SA2	i=3 C3G	i=4 C1	i=5 C0	i=6 C4	i=7 C5	i=8 C2 sup	i=9 SB	i=10 SX	i=11 C3 inf	i=12 C1 Exp	i=13 C2 Exp	i=14 C6
c=1 BPL	50,0	54,9	56,0	59,5	59,5	61,0	59,0	60,0	61,5	63,0	64,0	65,5	65,5	65,7
c=2 CO_2	3,7	7,7	5,4	4,5	5,2	4,8	7,7	5,1	5,2	5,5	5,0	5,9	4,6	5,0
c=3 MGO	1,0	0,7	0,9	1,2	1,2	1,5	1,7	0,9	0,8	0,8	1,1	0,8	0,7	1,2
c=4 SIO_2	18,0	8,0	17,2	9,5	8,5	11,7	9,8	11,5	8,0	11,0	10,0	7,5	8,0	6,0
c=5 Cd/B (ppm)	24	16	8	11	8	10	14	12	10	10	5	12	13	9

Constraints on the share β_{cj} (%) of component c in the weight of output j

Output j				
j=1 Tess	j=2 Stand	j=3 MT	j=4 BT	j=5 TBT
$57{,}9<\beta_{11}<61$	$57{,}9<\beta_{12}<61$	$64<\beta_{13}<67$	$57<\beta_{14}<60$	$54<\beta_{15}<56$
$5{,}6<\beta_{21}<7$	$5{,}6<\beta_{22}<7$	$5<\beta_{23}<7$	$6<\beta_{24}<8$	$7<\beta_{25}<9$
$1{,}2<\beta_{31}<1{,}4$	$1{,}2<\beta_{32}<1{,}4$	$\beta_{33}<1$	$\beta_{34}<1$	$\beta_{35}<2$
$12<\beta_{41}<13{,}5$	$12<\beta_{42}<13{,}5$	$\beta_{43}<8$	$5<\beta_{44}<8$	$\beta_{45}<15$
$\beta_{51}<10$	$\beta_{52}<12$	$12<\beta_{53}<18$	$\beta_{54}<20$	$\beta_{55}<26$

La transcription de ces compositions en se référant aux commandes k conduit à la structure d'output $\beta_{c\lambda_k}$ pour la commande k, concernant l'output $j = \lambda_k$, obtenue par le mélange de x_{ik}, est $\beta_{c\lambda_k} = \sum_c \alpha_{ci} \cdot (x_{ik} / \mathrm{D}_k)$. Ainsi, la charte de qualité peut être décrite par la relation (3) dans le cadre de la formulation du problème en utilisant un AML (Algebraic Modeling Language) qui permet l'utilisation de prédicats dans la génération des variables et des contraintes.

$$\begin{aligned} &\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ik} = \beta_{c\lambda_k}^{\text{Eq}} \cdot \mathrm{D}_k, \forall k \mid \beta_{c\lambda_k}^{\text{Eq}} \neq 0 \\ &\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ik} > \beta_{c\lambda_k}^{\text{Min}} \cdot \mathrm{D}_k, \forall k \mid \beta_{c\lambda_k}^{\text{Min}} \neq 0 \\ &\sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ik} < \beta_{c\lambda_k}^{\text{Max}} \cdot \mathrm{D}_k, \forall k \mid \beta_{c\lambda_k}^{\text{Max}} \neq 0 \end{aligned} \tag{3}$$

Dans cette modélisation statique, l'input i a un coût d'acquisition γ_i et le problème est de trouver le mélange qui minimise le coût d'acquisition (relation 4). Puisque les variables du problème sont continues, il existe un nombre infini de solutions possibles ou aucune, si le problème est irréalisable.

$$\text{Min}(\sum_i \gamma_i \cdot \sum_k x_{ik}) \tag{4}$$

Dans le système de production étudié, les coûts directs liés au blending et à l'extraction ne sont pas très sensibles à la solution. Cela nous conduit à rechercher la meilleure solution tout en épargnant les ressources futures (critère utilisé sur le terrain). Dans nos exemples numériques, nous utilisons arbitrairement le système de pondération $\gamma_i = \alpha_{i1}$ (où l'indice $c = 1$ correspond à la teneur en BPL) pour le stock

résiduel $S_i - \sum_k x_{ik}$ de l'input *i* après blending. La relation (5) est donc préférable que la relation (4) dans notre problème de blending.

$$\text{Max}(\sum_i \alpha_{i1} \cdot (S_i - \sum_k x_{ik})) \tag{5}$$

3.1.2 Variantes du modèle statique conçu pour explorer l'étendue du blending et les limites des options du blending

La littérature sur le blending est axée principalement sur la recherche d'une solution plutôt que sur une gamme de solutions possibles, contrairement à notre objectif dans ce travail. Afin d'évaluer les différentes options disponibles du blending, un certain nombre de variantes de ce modèle général est proposé. Elles incluent autant de commandes qu'il y ait de processeurs disponibles et elles ignorent la notion temporelle, ce qui implique l'alimentation d'input comme stock S_i est supposé suffisant. Les *variantes A* à *D* concernent le problème de blending pour une commande unique j', sans la prise en compte du problème de disponibilité des inputs ; dans ce contexte, J problèmes indépendants sont successivement étudiés. La *variante E* concerne les commandes multiples avec la prise en compte des contraintes de disponibilité des inputs.

- ***Variante A* :** est un modèle statique de base avec une seule commande, utilisant la fonction-objectif (5).
- ***Variante B*** : remplace successivement la fonction-objectif (5) par la minimisation $(Min(x_{i'j'} / \mathrm{D}_{j'}))$ ou par la maximisation $(Max(x_{i'j'} / \mathrm{D}_{j'}))$ du pourcentage d'input i' $(i' = 1..\mathrm{N})$ dans le poids de j', ce qui conduit, dans notre exemple, à $2 \times 5 \times 14 = 140$ optimisations.
- ***Variante C*** : force le processus de blending à utiliser un nombre prédéterminé H d'inputs dans le blending de l'output j' ; dans ce contexte ; la variable binaire $z_{ij'} = 1$ si l'input *i* est utilisé pour produire l'output j'. Ceci est obtenu avec la relation (6) où M est un très grand nombre et ε un très petit nombre ; la contrainte supplémentaire (7) force le nombre d'inputs utilisé à être égale à H.

$$\begin{aligned} &\mathrm{M} \cdot z_{ij'} \geq x_{ij'}, \forall i \\ &\varepsilon \cdot z_{ij'} \leq x_{ij'}, \forall i \end{aligned} \tag{6}$$

$$\sum_i z_{ij'} = \mathrm{H} \tag{7}$$

- ***Variante D*** : met à 0 le stock pour l'input le plus demandé dans la solution actuelle, et cherche à trouver un nouveau mélange alternatif ; ce processus, qui respecte les minima de la *variante B*, part de la solution correspondant à la plus petite valeur de H trouvée dans la *variante C* et continue jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de trouver une solution alternative.
- ***Variante E*** : également statique, couvre maintenant plusieurs commandes remplies simultanément et évalue l'impact d'une disponibilité insuffisante des inputs pour obtenir des solutions optimales pour la *variante A*.

3.2 Modèle du blending dynamique

Le contexte particulier de la chaîne logistique dans lequel se produit le problème de blending (alimentation séquentielle des inputs, production à la commande) conduit à une reformulation dynamique de ce problème en se basant sur la division du temps en périodes $(t = 1..\mathrm{T})$. L'ordonnancement d'un ensemble K de commandes de production $(k = 1..\mathrm{K})$ exécutées par des processeurs de blending parallèles est supposé déjà établi et cohérent avec la disponibilité du processeur. Cela conduit à ignorer les processeurs dans notre formulation. Dans la version dynamique étudiée nous avons (Figure 54) :

- L'accomplissement de la commande *k* conduit au prélèvement des inputs pendant les périodes *t* tel que $\delta_{kt} = 1$ (sinon, ce booléen est égal à 0) ; la durée du prélèvement, utilisée en relation (8), est notée ν_k $(\sum_t \delta_{kt} = \nu_k)$.
- La disponibilité initiale de l'input *i* au début de la période *t* est augmentée par l'approvisionnement A_{it}, éventuellement nulle.
- Le stock initial est noté S_{i0}. Le stock d'input *i* à la fin de la période *t* est noté S_{it} $(S_{it} \geq 0)$ et dépend du stock initial S_{i0}, augmenté des approvisionnements $\mathrm{A}_{it'}$ disponibles au début de la période $t' \leq t$ et diminué des prélèvements de cet input au cours de la période $t' \leq t$ (qui sont x_{ik} / ν_k pour les périodes t' où $\delta_{kt'} = 1$). On supposera ici que le débit de prélèvement est constant sur ν_k la période de prélèvement (sinon il faudrait introduire des coefficients datés, sans avoir augmenté

la taille du problème). Les relations (8) reflètent la contrainte de conservation de flux et (9) garantie que le stock ne soit jamais épuisé.

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + A_{it} - \sum_{k|\delta_{kt}=1} x_{ik} / \nu_k, \forall i, \forall t > 1 \tag{8}$$

$$S_{it} \geq 0, \forall i, \forall t > 1 \tag{9}$$

Nous définissons la variable binaire $\phi_{it} = 1$ si le prélèvement de l'input *i* se produit pendant la période *t*. Chaque input donné *i* ne peut pas être acheminé, durant la période *t* par plus d'un convoyeur, ces convoyeurs ayant le même débit de prélèvement δ,la quantité d'input *i* à transporter vers la zone de blending est $A_{it} = \delta \cdot \phi_{it}$ et la relation (8) peut être remplacée par la relation (8').

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + \delta \cdot \phi_{it} - \sum_{k|\delta_{kt}=1} x_{ik} / \nu_k, \forall i, \forall t > 1 \tag{8'}$$

Les décisions prises en amont de la chaîne d'extraction définissent les approvisionnements et les acheminements possibles d'inputs vers la zone de blending. Comme cette information est disponible pour des quantités quotidiennes d'extraction des outputs, nous sommes en mesure de définir la disponibilité cumulative B_{it} de l'input *i* à la fin de la période *t* en amont de la zone de blending, indépendamment des prélèvements de l'input *i* du stock initial B_{i0}. L'existence de la variable de commande ϕ_{it} est soumise à la disponibilité cumulée B_{it} $(\mathrm{B}_{it} = 0 \rightarrow \phi_{it} = 0)$. Le processus de prélèvement des inputs est contraint par le nombre de convoyeurs R_t disponibles pendant la période *t* (relation 10) et par un cumul disponible suffisant (relation 11).

$$\sum_i \phi_{it} \leq \mathrm{R}_t, \forall t | \mathrm{B}_{it} > 0 \tag{10}$$

$$\mathrm{B}_{it} \geq \delta \cdot \sum_{t' \leq t} \phi_{it}, \forall i, t \tag{11}$$

Les autres caractéristiques de notre modèle sont liées principalement aux stocks.

- L'utilisation du modèle conduit naturellement à des solutions avec des alimentations importantes d'inputs, pour améliorer la valeur de la fonction-objectif. Il faut donc introduire une contrainte sur le stockage global σ qui ne peut pas être dépassé, avec la relation (12). Les contraintes de capacité de stockage dans la zone de blending impliquent également une accumulation maximale de stock à ne pas dépasser $\mathrm{S}_i^{\mathrm{Max}}$, avec la relation (13).

$$\sum_i S_{it} < \sigma, \forall t \tag{12}$$

$$S_{it} < \mathrm{S}_i^{\mathrm{Max}}, \forall t, i \tag{13}$$

- Nous disposons également d'un stock de sécurité $\mathrm{S}_i^{\mathrm{Min}}$ pour faire face à une demande imprévue (Bamoumen *et al.* 2018), qui serait régie par $S_{it} - \mathrm{S}_i^{\mathrm{Min}} \geq 0, \forall i, t$. Cette forte contrainte, introduite pour un hypothétique problème futur, pourrait empêcher de trouver une solution réalisable au problème actuel. Ainsi, il est préférable d'utiliser la relation (14) où w_{it} est le manque de stock de sécurité et combiner avec la pénalité θ_i introduite dans la fonction-objectif (5), ce qui conduit à la fonction-objectif (16).

$$\begin{aligned} &w_{it} \geq 0, \forall i, t \\ &w_{it} \geq S_i^{\mathrm{Min}} - S_{it}, \forall i, t \end{aligned} \tag{14}$$

- Le stock de décharge ou bien le stockage intermédiaire dans le stock tout-venant de l'input *i* a lieu chaque fois que le stock *i* dans la zone de blending dépasse le seuil $\mathrm{S}_i^{\mathrm{Max}}$, ce qui implique un coût supplémentaire important pour le transfert du minerai du stock tout-venant vers la zone de stockage des inputs. La variable y_{it}, éventuellement nulle, détermine ce surplus par les relations (15) et supporte un coût η ; par conséquent, le coût de la décharge est proportionnel à la durée du stockage et à la quantité stockée. Le système utilisé pour calculer le coût de stockage n'est pas pertinent tant que le stockage dans le stock tout-venant peut être évité (puisque le coût partiel correspondant dans la fonction-objectif est nul), de sorte que nous utilisons un coût fictif élevé qui sert à éliminer les solutions menant au stockage intermédiaire.

$$\begin{aligned} &y_{it} > 0, \forall i, t \\ &y_{it} > S_{it} - S_i^{\mathrm{Max}} \end{aligned} \tag{15}$$

La fonction-objectif de ce problème linéaire mixte est illustrée par la relation (16).

$$\mathrm{Min}\left(\sum_i \alpha_{i1} \cdot S_{i\mathrm{T}} + \sum_i \theta_i \cdot w_{it} + \eta \cdot \sum_t \sum_i y_{it}\right) \tag{16}$$

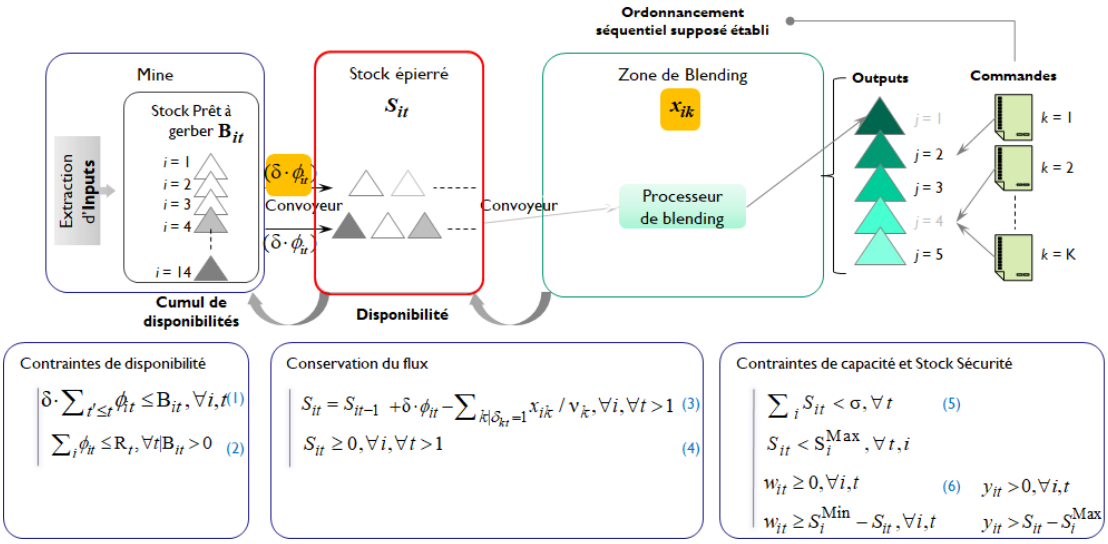


Figure 54. Modèle du blending dynamique.

4 ILLUSTRATION DU PROBLEME DE BLENDING

Nous illustrons la flexibilité du blending d'abord dans un contexte statique (production pendant une période unique), puis dans un contexte dynamique. Des problèmes paramétrés ont été définis en utilisant « Algebraic Language Formulation » (AGL) de Xpress-IVE (FICO Xpress Optimization Suite) et résolus avec ce logiciel.

4.1 Flexibilité du blending dans un contexte statique

Nous illustrons tout d'abord l'importance de la flexibilité du blending dans le cas d'un seul output (*variantes A* à *D*) avant de passer à plusieurs outputs (*variante E*). Nous utilisons les données du Tableau 24 et pour les variantes A à C nous utilisons $D_j = 100, \forall j$ et $S_{0i} = 100, \forall i$, pour éviter le risque de rupture de stock, nous autorisons l'expression x_{ij} en pourcentage.

- ***Variante A***. les solutions de blending optimales ont été obtenues successivement et indépendamment, en utilisant la fonction objectif (5) pour chacun des produits. Les solutions indépendantes optimales sont données dans le Tableau 25 et la Figure 55. L'utilisation de cette fonction-objectif qui cherche à consommer les inputs les moins riches en BPL. Ainsi, le choix de la fonction objectif a un impact important sur la définition du mélange.

Tableau 25. Composition optimale de chaque output *j*.

Output *j*	1	2	3	4	5
Input *i* : %	**1**:5.37%; **3**:43.02%; **5**:12.87%; **6**:12,05%; **7**:18.88%; **11**:7.79%	**1**:16.05%; **3**:35.25%; **7**:25.49%; **11**:8.24%; **14**:14.97	**1**:10.23%; **12**:51.52%; **14**:38.26%	**1**:4.31%; **2**:74.12%; **14**:21.56%	**1**:18.25%; **2**:81.60%; **12**:0,16%

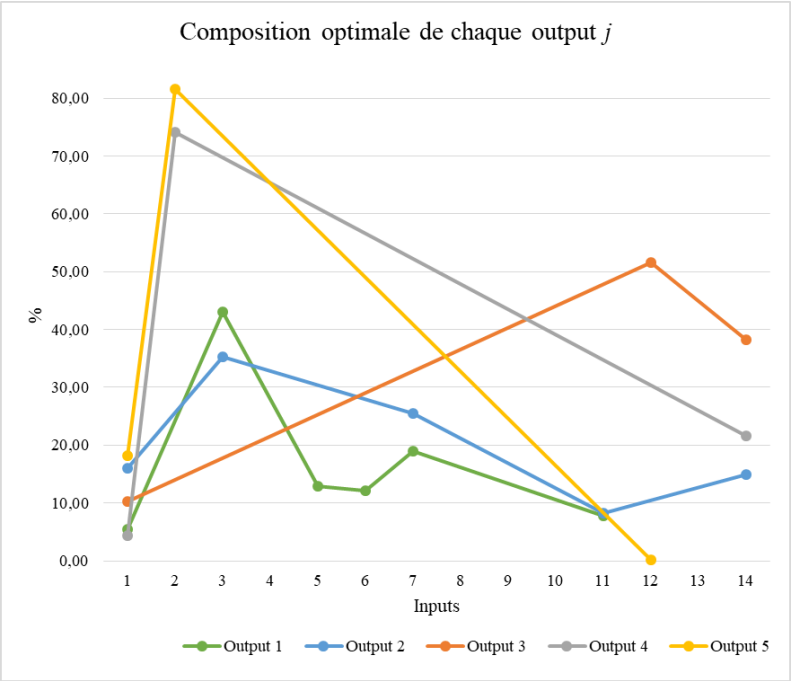


Figure 55. Composition optimale de chaque output *j*.

- ***Variante B***. Nous avons cherché à maximiser et minimiser l'utilisation de chaque input, pour un output donné. Les poids minimaux et maximaux des différents inputs utilisés dans la fabrication de chaque output, en considérant séparément chaque input et en postulant qu'il n'y a pas de restriction dans la disponibilité des inputs, sont donnés dans le Tableau 26.

Tableau 26. % minimal et maximal d'inputs *i* dans chaque output *j*.

		Input *i*													
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$	$i=12$	$i=13$	$i=14$
Output *j*	$j=1$	0-11	0-15	**16**-57	0-32	0-44	0-48	**7**-46	0-27	0-23	0-30	0-50	0-20	0-15	0-32
	$j=2$	0-21	0-22	**6**-57	0-43	0-44	0-61	**1**-63	0-45	0-26	0-36	0-50	0-25	0-23	0-33
	$j=3$	0-10	0-15	0-6	0-21	0-19	0-12	0-22	0-15	0-32	0-15	0-12	0-100	0-88	0-47
	$j=4$	0-10	**22**-80	0-10	0-33	0-50	0-18	0-22	0-21	0-70	0-21	0-26	0-49	0-48	0-51
	$j=5$	0-18	**33**-100	0-31	0-23	0-26	0-21	0-49	0-24	0-21	0-19	0-16	0-16	0-14	0-14

Il importe de souligner que ***ces extrema ne dépendent pas de la fonction-objectif utilisée*** et sont associés, pour chacun d'entre eux, à des solutions faisables. On observe que : l'output 1 ne peut pas être produit sans les inputs 3 et 7 ; l'output 2

requiert l'input 3 et 7 ; l'output 3 n'a pas d'input incontournable ; l'output 4 et 5 nécessitent l'input 2. Ainsi, les stocks d'inputs 2, 3 et 7 sont « incontournables » si l'on veut pouvoir produire les outputs 1, 2, 4 et 5. L'absence des autres inputs n'empêche pas la production de ces outputs. Le problème des stocks de sécurité des inputs utilisés dans le blending est différent de celui que l'on rencontre normalement dans l'assemblage de produits discrets : ce travail est traité par Bamoumen *et al.* 2018.

Nous pouvons déduire à partir du Tableau 26 que l'input i=1 par exemple est moins utilisable dans la production des outputs. Ce tableau donc nous permet de mesurer à quel point chaque input est aussi important ou indispensable dans la consommation de chaque output et si sa rupture va vraiment causer des problèmes pour la satisfaction de la demande ou pas. Il s'agit aussi de définir si l'input est rare auquel cas on doit le conserver pour l'output indispensable.

Les maxima déterminent jusqu'à quel point nous pouvons aller dans la consommation d'un input pour produire un output. En conséquence, si on dispose d'une quantité importante d'un input ou que sur une partie du gisement nous avons une quantité importante de cet input, auquel cas nous pouvons complètement la consommer pour garder ceux qui sont plus rares, pour plus tard.

Il est important de noter que les inputs définis dans le Tableau 26 ne sont qu'un sous-ensemble, qui peut varier dans le temps, de l'ensemble des inputs que l'on peut extraire du chantier. Les résultats de ce tableau sont obtenus en se basant sur les caractéristiques chimiques définies sur un horizon donné. Ces mini et maxi sont à déterminer en fonction des sous-ensembles d'inputs et leurs caractéristiques chimiques prises à un moment donné.

Conclusion de la Variante B : Certains inputs sont indispensables à la production de certains outputs.

- ***Variante C***. Nous avons cherché dans ce cas à modifier progressivement le nombre H fixe d'inputs imposés pour produire un output donné. Le Tableau 27 décrit successivement, pour chaque output, l'ensemble des inputs qui sont utilisables pour produire un output donné (ensembles classés par leurs cardinalités croissantes) pour chaque valeur prise par H, en utilisant la fonction-objectif (5).

Tableau 27. Mélanges possibles de certains outputs, en fonction d'un nombre prédéterminé H d'inputs à utiliser.

Nombre d'inputs à utiliser (Valeurs prises par H)	*j* = 1													*j* = 2													*j* = 3												*j* = 4												*j* = 5									
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	14		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14		1	2	7	8	9	10	12	13	14		1	2	4	5	7	9	11	12	13	14		1	2	3	5	6	7	8	9	12
2	Impossible													Impossible														-	14	-	-	-	-	-	86	-		-	80	-	-	-	-	-	20	-	-		18	82	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	42	-	36	-	22	-	-	-	-	-		-	-	54	-	-	-	37	-	-	-	-	-	8		**10**	-	-	-	-	**51**	-	**38**		-	**80**	-	-	-	-	-	**15**	**5**	-		**18**	**82**	-	-	-	**5**	-	-	-
4	-	-	56	-	7	-	28	-	-	-	-	8		14	-	40	-	-	-	25	-	-	-	-	-	21		10	-	-	-	-	45	5	40		-	80	-	-	-	-	-	10	5	5		15	75	5	-	-	5	-	-	-
5	5	-	41	-	19	-	25	-	-	-	10	-		**16**	-	**35**	-	-	-	**25**	-	-	-	**8**	-	**15**		9	-	-	-	**5**	-	49	5	32		-	78	-	-	-	5	-	7	5	5		12	73	5	5	-	5	-	-	-
6	**5**	-	**43**	-	**13**	**12**	**19**	-	-	-	**8**	-		16	-	34	-	5	-	25	-	-	-	5	-	16		5	5	-	-	5	-	73	5	7		-	74	5	5	-	-	-	6	5	5		9	71	5	5	-	5	5	-	-
7	-	-	48	5	5	5	27	5	-	-	5	-		15	-	34	-	-	9	24	-	-	-	9	5	5		-	9	-	5	5	5	66	5	5		-	70	-	5	5	5	-	5	5	5		6	69	5	5	-	5	5	5	-
8	-	5	42	5	5	10	22	-	-	-	5	5		15	-	31	-	5	7	24	-	-	-	8	5	5		-	5	5	5	5	5	63	7	5		-	62	5	5	5	5	-	5	5	8										
9	-	-	39	5	5	5	26	5	5	-	5	5		14	-	31	5	5	5	24	-	-	-	6	5	5		Impossible										-	52	5	5	5	5	5	5	5	13		Impossible								
10	-	-	32	5	5	11	22	5	5	5	5	5		12	5	25	5	5	12	20	5	-	-	5	-	5																																
11	Impossible													10	5	24	5	5	5	27	5	5	-	5	-	5																																
12														Impossible																																												

Cela conduit à plusieurs conclusions :

- Le nombre minimum d'inputs nécessaires pour produire un output peut être supérieur ou inférieur à celui trouvé dans la solution optimale obtenue par la *variante A (*Tableau 25), mais au détriment de la performance ; comme ils peuvent être égaux mais la liste des inputs choisis sera différente (par exemple l'output 4 et 5) pour chaque output.
- La solution obtenue peut varier également en fonction de la valeur de ε définie dans la contrainte (6). Si on force la valeur de H à être supérieure au nombre d'inputs consommés dans la solution optimale, l'optimisation conduira à utiliser a minima (ε) les inputs additionnels. Nous avons dans ce cas étudié pour l'output *j*=1 et une valeur fixe d'inputs à consommer H=6 l'impact de la variation de la valeur prise par sur la composition du blend. Nous pouvons constater à partir du Tableau 28 que la quantité minimale que l'on peut prendre d'un input (s'il est retenu) dépend fortement de la valeur de ε et cette quantité ne peut être inférieure de la valeur de ε .
- Ensuite nous avons varié le nombre d'inputs à consommer H pour une valeur de $\varepsilon = 1$ puis $\varepsilon = 5$ (Tableau 29). Nous pouvons déduire à partir des résultats obtenus que la valeur donnée à ε définit la valeur minimale que l'on peut consommer si un input est retenu. Pour une valeur faible de $\varepsilon = 1$ nous pouvons produire l'input *j*=1 avec un nombre maximale de H=14 ce qui est égale au nombre d'inputs disponibles. Tandis que pour une valeur plus importante $\varepsilon = 5$, le nombre maximal qu'on peut atteindre est de 10.
- Le nombre maximal d'inputs indiqué dans ces tableaux ne peut pas être dépassé sans avoir violé les spécifications de composition pour cet output. Nous devons souligner que la fonction-objectif choisie, en

supposant que les inputs soient disponibles, peut changer la composition des ensembles mais pas leurs cardinalités.

- Le Tableau 27 est obtenu avec une valeur de $\varepsilon = 5$ que l'on suppose plus représentative. Les solutions optimales obtenues précédemment dans le Tableau 25 sont retrouvées avec des valeurs précises de H et représentés en gras dans le Tableau 27. Par exemple pour l'output *j*=1 la solution optimale est retrouvée avec une valeur de H=6. Tandis que la solution optimale pour l'output *j*=4 est retrouvée avec H=3 et pour $\varepsilon = 4$ et non pas $\varepsilon = 5$ parce que dans la solution optimale la quantité la plus petite à consommer est celle de l'input *i*=1 qui est de 4,31%. De même pour l'output *j*=5 la solution optimale est retrouvée avec un H=3 et $\varepsilon = 0$ et non pas $\varepsilon = 5$ car la quantité minimale consommée concerne l'input *i*=12 est de 0,16 %.

Tableau 28. Mélanges possibles pour l'output *j*=1 pour un H=6 et en fonction des valeurs prises par ε .

	j	1								
	i	1	3	4	5	6	7	8	9	11
Valeurs prises par ε pour H= 6	<=5	5	43	-	13	12	19	-	-	8
	6	6	36	-	27	6	19	-	-	7
	7	0	45	7	7	13	21	7	-	-
	8	0	42	8	8	14	19	8	-	-
	9	-	39	9	12	13	18	9	-	-
	10	-	37	10	10	12	21	-	10	-

Tableau 29. Mélanges possibles pour l'output *j*=1, en fonction des valeurs prises par H et pour $\varepsilon = 1$ (tableau à gauche) et $\varepsilon = 5$ (tableau à droite).

ε = 1

Nombre d'inputs à utiliser (Valeurs prises par H) \ *j*	1													
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	Impossible													
3	-	-	42	-	36	-	22	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	56	-	7	-	28	-	-	-	-	-	-	8
5	5	-	46	-	8	-	28	-	-	-	13	-	-	-
6	**5**	-	**43**	-	**13**	**12**	**19**	-	-	-	**8**	-	-	-
7	5	-	44	-	13	122	19	-	-	-	6	-	-	1
8	5	-	44	1	12	12	19	-	-	-	6	-	-	1
9	4	-	44	1	12	14	18	-	1	-	4	-	-	1
10	4	1	45	1	11	17	17	-	1	-	3	-	-	1
11	3	1	45	1	11	18	17	1	1	-	1	-	-	1
12	2	1	46	1	10	15	20	1	1	1	1	-	-	1
13	1	1	48	1	8	11	23	1	1	1	1	1	-	1
14	1	1	47	1	6	16	21	1	1	1	1	1	1	1

ε = 5

Nombre d'inputs à utiliser (Valeurs prises par H) \ *j*	1											
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	14
2	Impossible											
3	-	-	42	-	36	-	22	-	-	-	-	-
4	-	-	56	-	7	-	28	-	-	-	-	8
5	5	-	41	-	19	-	25	-	-	-	10	-
6	**5**	-	**43**	-	**13**	**12**	**19**	-	-	-	**8**	-
7	-	-	48	5	5	5	27	5	-	-	5	-
8	-	5	42	5	5	10	22	-	-	-	5	5
9	-	-	39	5	5	5	26	5	5	-	5	5
10	-	-	32	5	5	11	22	5	5	5	5	5
11	Impossible											
12												

Conclusion de la Variante C : Le nombre d'inputs utilisés pour produire un output peut être beaucoup plus élevé que le nombre d'inputs utilisés sans contrainte (Variante A).

Par la suite nous avons cherché, en plus de la contrainte de définition d'un nombre prédéterminé H d'inputs, à résoudre le problème sous une fonction objectif de **minimisation** ou de **maximisation** de la consommation de chaque couple d'inputs et d'outputs.

Par exemple, pour l'output *j*=1 et l'input *i*=3, nous avons utilisé successivement les fonctions-objectifs $Min(x_{3,1} / \mathrm{D}_1)$ et $Max(x_{3,1} / \mathrm{D}_1)$. En premier lieu nous avons relaxé la contrainte sur H ce qui a conduit à la borne minimale de 16% pour l'input 3 (+ 11% de l'input 1, 26% de l'input 7 et 46% de l'input 11) et à la borne maximale de 57% pour cet input (+ 29 % de l'input 7, et 14 % de l'input 14).

La Figure 56 illustre ces solutions pour l'input *i*=3 ; dans cette figure, les rectangles visualisent la plage de valeurs d'utilisation maximale de chaque input sans contrainte (Tableau 26) ainsi que la solution trouvée avec la fonction objectif de maximisation de la consommation de l'input *i*=3 sans contrainte sur la valeur de H (trait plein, « Max sans H ») et la minimisation sans contrainte sur H (trait pointillé « Min sans H ») pour l'input 3, sans contrainte de disponibilité et de composition ; bien évidemment, on retrouve pour l'input 3 les bornes du Tableau 26.

En deuxième temps, en imposant la contrainte d'un nombre H d'inputs utilisés dans le blending (dont l'input *i*=3) ; cette contrainte n'existait pas dans la variante

B. Le Tableau 30 représente les résultats obtenus. Pour la valeur de H=4, on retrouve le 16% correspondant au minimum de consommation de l'input 1 trouvé dans le Tableau 26 et, pour une valeur de H=3, on retrouve le 57% correspondant au maximum de consommation de l'input 1 trouvé dans ce Tableau 26 .

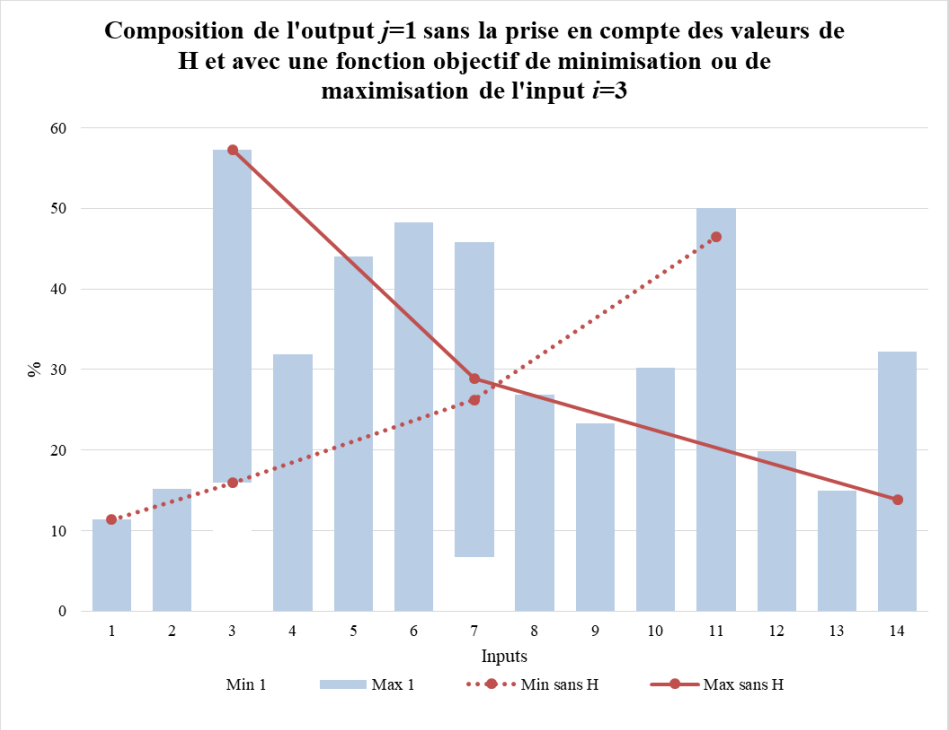


Figure 56. Exemple de la composition de l'output *j*=1 sans la prise en compte des valeurs de H avec une fonction-objectif de minimisation ou de maximisation de la consommation de l'input *i*=3.

Tableau 30. Composition de l'output *j*=1 pour un H déterminé et une fonction-objectif de minimisation ou de maximisation de la consommation de l'input *i*=3.

Output *j*=1 Tess	*i* = 3																					
	Solution initiale H non prédeterminé		H<=2		H=3		H=4		H=5		H=6		H=7		H=8		H=9		H=10		H>=11	
	Min	Max	Min 2	Max 2	Min 3	Max 3	Min 4	Max 4	Min 5	Max 5	Min 6	Max 6	Min 7	Max 7	Min 8	Max 8	Min 9	Max 9	Min 10	Max 10	Min	Max
i=1	11	0	Pas de solution		0	0	11	0	11	0	9	0	8	0	7	0	6	0	0	0	Pas de solution	
i=2	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
i=3	**16**	**57**			28	57	16	56	16	55	16	53	16	51	18	45	21	39	28	32		
i=4	0	0			0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0	5	5	5	5	5		
i=5	0	0			0	0	0	5	0	5	0	5	0	5	5	5	5	5	5	5		
i=6	0	0			0	0	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	19	11		
i=7	26	29			23	29	26	29	25	25	25	25	24	24	23	25	22	26	19	22		
i=8	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	5	5	5	5	5		
i=9	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5		
i=10	0	0			0	0	0	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	5	5	5		
i=11	46	0			49	0	46	0	43	0	40	0	37	5	32	5	26	5	5	5		
i=12	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
i=13	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
i=14	0	14			0	14	0	10	0	10	0	7	0	5	0	5	0	5	5	5		

Les blends correspondant aux résultats trouvés pour *i*=3, pour les 8 valeurs possibles de H, sont repris à la Figure 57 (sauf que nous avons masqué les résultats pour les valeurs de H=5,6,7,8 et 9 pour éviter que le graphe soit trop

chargé), dans laquelle les rectangles visualisent les extrema d'utilisation de chaque input et les traits en pointillés correspondent aux blends minimisant l'utilisation de l'input 3, pour chaque valeur possibles de H (une couleur différente par valeur possible de H) et, en traits pleins dans la Figure 58 , les blends maximisant l'utilisation de l'input 3, pour chaque valeur possibles de H (On retrouve bien sur ces deux figures les blends obtenus pour H=3 (max 57%, trait plein bleu) et H=4 (min16%, trait pointillé orange).

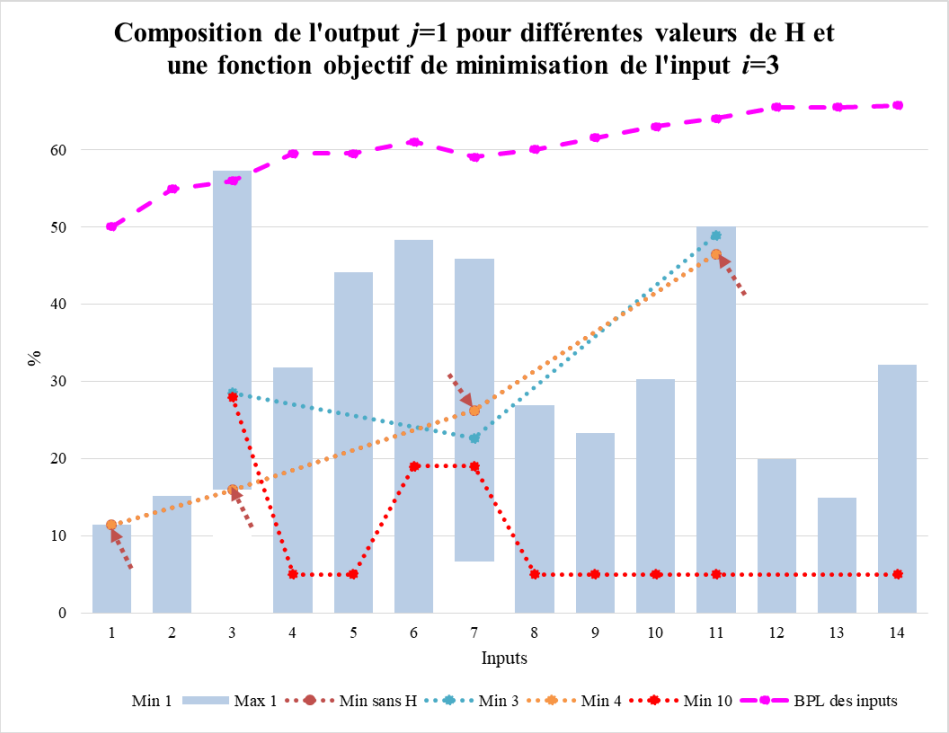


Figure 57. Exemple de la composition de l'output *j*=1pour différentes valeurs de H et une fonction objectif de minimisation de la consommation de l'input *i*=3.

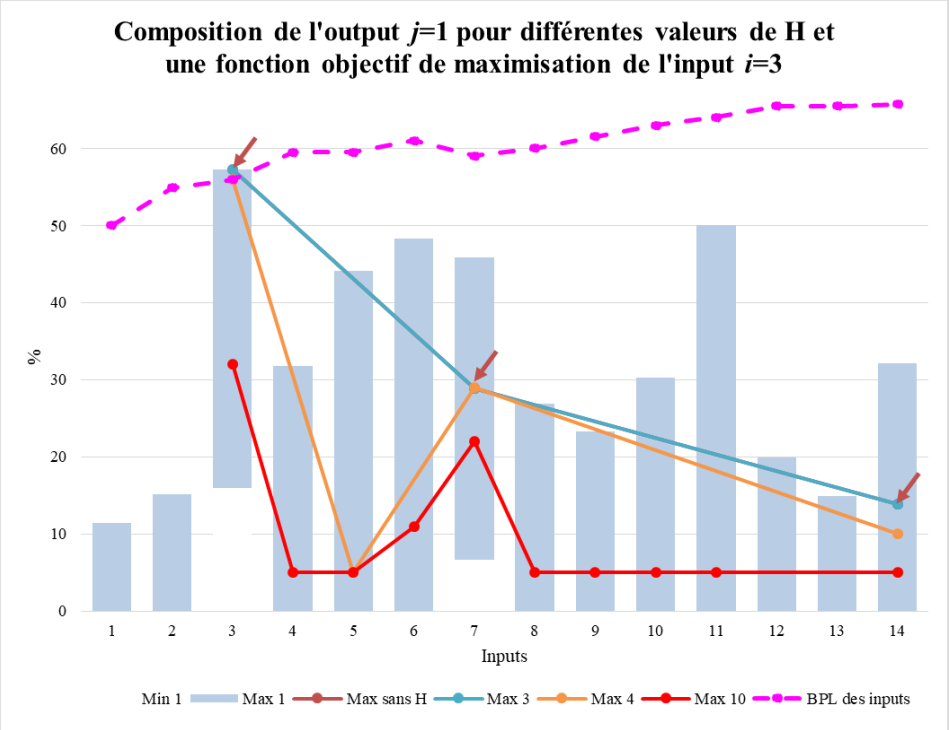


Figure 58. Exemple de la composition de l'output *j*=1 pour différentes valeurs de H avec une fonction-objectif de maximisation de la consommation de l'input *i*=3.

L'analyse de ces résultats montre que la relative pénurie d'un input peut être compensée par l'appel d'autres inputs et que le critère de l'importance d'un input lié à sa teneur en BPL, communément utilisé doit être fortement relativisé, compte tenu de la forte substituabilité des inputs. Cela signifie que l'absence d'un input n'est pas forcément dramatique car il peut être remplacé par d'autres inputs qui sont disponibles. On peut ajouter qu'il s'agit là d'un éventail de solutions possibles respectant la charte qualité mais qu'en fonction de la fonction-objectif effectivement utilisée (voir relation 16), ces différents blends n'ont pas la même performance.

- ***Variante D***. Ceci représente successivement l'impact du stock nul pour certains inputs qui ne sont pas incontournables, pour chaque output (les minima positifs de la variante C étant conservés). La méthode exploratoire retenue est la suivante :*i*) nous partons de la solution optimale trouvée avec des stocks fixés au minimum dans le Tableau 26 , les autres étant à 100 ; *ii*) on conserve les minima et on met à zéro le stock initial pour l'input le plus demandé dans la solution optimale précédente ; *iii*) nous cherchons la nouvelle solution optimale, et si on en trouve

une, on revient à *ii*), sinon on s'arrête. Examinons les résultats obtenus pour les outputs *j*=1 et *j*=4:

• Output 1 : (Résultats du Tableau 31)

- Scénario 1 : Si les inputs critiques 3 et 7 sont à leurs minima (16 et 7 obtenus dans le Tableau 26), aucune solution n'existe,
- Scénario 2 : Avec une disponibilité minimale de 16 pour l'input 3 ; l'output 1 peut être produit (avec la fonction-objectif utilisée) avec : 11 % de l'input 1 ; 16 % de l'input 3 ; 26 % de l'input 7 ; 46 % de l'input 11.
- Scénario 3 : en partant des résultats du scénario 2 ; en mettant une disponibilité minimale de 16 pour l'input 3 et un stock nul pour l'input 11 (le plus consommé dans la solution du scénario 2) ; l'output 1 ne peut pas être produit ;
- Scénario 4 : Avec une disponibilité minimale de 7 pour l'input 7 ; l'output 1 peut être produit (avec la fonction-objectif utilisée) avec : 14 % de l'input 2 ; 24 % de l'input 3 ; 7 % de l'input 5 ; 39 % de l'input 6. 7% de l'input 7 ; 10% de l'input 11.
- Scénario 5 : en partant des résultats du scénario précédant (4); en mettant une disponibilité minimale de 7 pour l'input 7 et un stock nul pour l'input 6 (le plus consommé dans la solution du scénario 4) ; l'output 1 ne peut pas être produit ;
- Scénario 6 : une disponibilité minimale de 16 pour l'input 3 et de 19 (solution optimale) pour l'input 7 n'aboutit toujours pas à une solution.
- Scénario 7 : une solution existe si les disponibilités minimales sont 43 et 7. On peut vérifier qu'une solution existe avec les disponibilités minimales 43 et 7. Ainsi, nous concluons que le niveau minimum pour l'input 3 pour produire l'output 1 est de 43 ce qui donne une solution réalisable.

Tableau 31. Résultats de la Variante D pour l'output 1.

Scénarios/ Inputs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	100	100	16	100	100	100	7	100	100	100	100	100	100	100
2	100	100	16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	100	100	16	100	100	100	100	100	100	100	0	100	100	100
4	100	100	100	100	100	100	7	100	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	0	7	100	100	100	100	100	100	100
6	100	100	16	100	100	100	19	100	100	100	100	100	100	100
7	100	100	43	100	100	100	7	100	100	100	100	100	100	100

Inputs/ Scénarios	0	1	2	3	4	5	6	7
1	5	Pas de solution	11	Pas de solution	0	Pas de solution	Pas de solution	0
2	0		0		14			14
3	43		16		24			24
4	0		0		0			0
5	13		0		7			7
6	12		0		39			39
7	19		26		7			7
8	0		0		0			0
9	0		0		0			0
10	0		0		0			0
11	8		46		10			10
12	0		0		0			0
13	0		0		0			0
14	0		0		0			0

• Output 4 : (Résultats du Tableau 32)

- Scénario 1 : Avec une disponibilité minimale de 22 pour l'input 2 ; l'output 4 peut être produit (avec la fonction-objectif utilisée) avec : 16 % de l'input 1 ; 35 % de l'input 3 ; 25 % de l'input 7 ; 8 % de l'input 11 et 15% de l'input 14.
- Scénario 2 : en partant des résultats du scénario 1 ; avec une disponibilité minimale de 22 pour l'input 2 et un stock nul de l'input 3 ; l'output 4 ne peut pas être produit.

Tableau 32. Résultats de la Variante D pour l'output *j*=4.

Scénarios/ Inputs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	100	22	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	100	22	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Inputs/ Scénarios	0	1	2
1	4	16	Pas de solution
2	74	0	
3	0	35	
7	0	25	
11	0	8	
14	22	15	

Conclusion de la Variante D : Cette analyse montre que lorsque les inputs incontournables sont disponibles a minima, un autre input doit être disponible pour pouvoir obtenir l'output correspondant aux contraintes de mélange. Pour conclure cette analyse statique - mono-produit, la production de l'output reste possible lorsque certains inputs qui ne sont pas incontournables ne sont pas disponibles.

- ***Variante E***. Le scénario 1 du Tableau 33 traite trois commandes remplies simultanément, pour des quantités égales à 100, chaque disponibilité d'input restant

fixe à 100. L'agrégation des consommations d'input pour les solutions trouvées dans la variante A montre que le stock initial de l'input 2 est insuffisant. L'introduction de la contrainte (15) conduit à de nouveaux mélanges très différents de ceux obtenus en l'absence de pénurie d'inputs. Dans un second scénario, on a retenu des disponibilités variables des inputs, ce qui conduit à des solutions dans lesquelles les blends des outputs sont encore différents. Pour conclure, les mélanges à effectuer pour préparer les outputs demandés simultanément dépendent de la disponibilité des inputs.

Tableau 33. Facteurs influençant les mélanges (et) dans le problème "Mono-période / Multi-produit"

Scénario 1	$D_j = 100, \forall j$							
	Optima de la *Variante A*				Optima de la *Variante E* $S_{i0} = 100, \forall i$			
	Output *j*			Sum	Output *j*			Sum
Input *i*	3	4	5		3	4	5	
1	10	4	18	33	10	0	18	28
2	0	74	82	**156**	-	64	36	100
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	29	-	29
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	46	46
8	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-
12	52	-	-	52	52	-	-	52
13	-	-	-	-	-	-	-	-
14	38	22	-	60	38	7	-	46
Sum	100	100	100	300	100	100	100	300

Scénario 2 - S_{i0} et D_j non identique														
		Optima de la *Variante A*				Optima x_{ij} de la *Variante E*				% Blend optimal de la *Variante* E		
	S_{i0}	Output *j*			Sum	Output *j*			Sum	Output *j*		
Input *i*		3	4	5		3	4	5		3	4	5
1	50	12	3	9	24	1	-	2	3	1	-	4
2	70	5	70	41	**116**	-	32	38	70	-	32	76
3	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	30	-	-	-	-	28	-	-	28	19	0	-
5	50	-	12	-	12	-	50	-	50	-	50	-
6	30	-	-	-	-	13	-	10	23	8	-	20
7	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	40	40	-	-	40	36	4	-	40	24	4	-
13	50	43	-	-	43	35	2	-	36	23	2	-
14	50	50	16	-	**66**	38	12	-	50	25	12	-
Sum		150	100	50	301	150	100	50	300	100	100	100

Conclusion de la Variante E : Les mélanges des outputs produits simultanément dépendent de la disponibilité des inputs et des commandes à respecter au cours de la même période.

4.2 Flexibilité du blending dans un contexte dynamique

Nous traitons ici d'un exemple fictif simplifié du blending dynamique définissant les alimentations d'inputs dans le stock secondaire et les blends optimaux d'inputs permettant de répondre à 6 commandes exécutées par 2 unités de blending fonctionnant en parallèle. L'unité de poids n'est pas spécifiée. Le découpage temporel retenu est la demi-journée et l'horizon de 8 jours. Le débit de production d'un processeur de blending est de 10 / demi-journée. Nous considérons que pendant la dernière période programmée pour l'exécution d'une commande, il ne peut y avoir d'approvisionnement

d'inputs car cette dernière période est dédiée à l'achèvement du mélange final. Le Tableau 34 présente les données relatives au problème de la séquence de production : stocks initiaux d'inputs, les commandes à satisfaire et la disponibilité cumulée de l'input *i* à la fin de la période *t* en amont de la zone de blending.

En prenant en compte de la disponibilité cumulée B_{it} (Tableau 34) de chaque input *i*, en utilisant la fonction-objectif (16) et les coûts suivants : $\eta=200000$, $\theta_i = 200000, \forall i$, le modèle permet de définir les alimentations à effectuer pour pouvoir satisfaire la demande tout en respectent toutes les contraintes prédéfinies (Tableau 35). La composition des mélanges résultants est montrée dans le ce qui met en évidence la différenciation des mélanges qui diffèrent d'une commande à une autre en termes d'inputs consommés et de leur structure (%). Par exemple : pour les trois commandes $k = 1,3,4$ portant sur le même output $\lambda_k = 5$, on observe que : $k = 1$ utilise principalement 57 % de l'input 1, $k = 3$ utilise principalement seulement 34 % de l'input 3 mais $k = 4$ utilise principalement 33 % de l'input 4.

Tableau 34. Données du problème : stocks initiaux S_{i0} , spécifications de la commande et disponibilité cumulée B_{it}

Spécifications des commandes

Commandes k	Processeur	Output λ_k	Quantité de la commande	Périodes de production	
				Début	Fin
1	1	5	40	1	5
2	1	3	30	6	9
3	1	5	50	10	15
4	2	5	60	1	7
5	2	4	40	8	12
6	2	3	30	13	16

Input i	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$	$i=12$	$i=13$	$i=14$
S_{i0}	20	30	30	30	30	30	10	30	30	30	10	10	10	10

B_{it}	Input i	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		$i=1$	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	20	20	20	20	20	20
		$i=2$	-	-	-	10	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
		$i=3$	-	10	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
		$i=4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$i=5$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$i=6$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$i=7$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$i=8$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		$i=9$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$i=10$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$i=11$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$i=12$	-	-	-	-	-	10	20	30	30	30	30	30	30	30	30	30
		$i=13$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	20	20
		$i=14$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20

Tableau 35. Résultats : résultat de l'alimentation des stocks d'input et des compositions des mélanges

Consommations des inputs

Input i	Commandes (Outputs) $k=1$ ($\lambda_k=5$)	$k=2$ ($\lambda_k=3$)	$k=3$ ($\lambda_k=5$)	$k=4$ ($\lambda_k=5$)	$k=5$ ($\lambda_k=4$)	$k=6$ ($\lambda_k=3$)	Sum
1	6	-	16	14	-	4	40
2	-	11	-	19	-	10	40
3	23	-	17	-	-	-	40
4	-	-	-	20	-	-	20
5	11	-	9	-	-	-	20
6	-	-	-	6	9	5	20
7	-	-	-	1	9	-	10
8	-	-	8	-	22	-	30
9	-	-	-	-	-	10	10
10	-	19	-	-	-	1	20
11	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-
Sum	40	30	50	60	40	30	250

Structure du blend (%) en inputs

Input i	Commandes (Outputs) $k=1$ ($\lambda_k=5$)	$k=2$ ($\lambda_k=3$)	$k=3$ ($\lambda_k=5$)	$k=4$ ($\lambda_k=5$)	$k=5$ ($\lambda_k=4$)	$k=6$ ($\lambda_k=3$)
1	16%	-	33%	23%	-	12%
2	-	37%	-	32%	-	33%
3	57%	-	34%	-	-	-
4	-	-	-	33%	-	-
5	27%	-	18%	-	-	-
6	-	-	-	10%	22%	17%
7	-	-	-	2%	22%	-
8	-	-	15%	-	56%	-
9	-	-	-	-	-	33%
10	-	63%	-	-	-	4%
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-
Sum	100%	100%	100%	100%	100%	100%

$\delta \cdot \phi_{it}$ — Input i	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	$i=1$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	-	-	-	-
	$i=2$	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	10	-	-	-
	$i=3$	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-
	$i=8$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-

4.3 Apports du modèle de Blending dynamique

Le modèle de blending dynamique est maintenant utilisé de manière industrielle dans l'axe centre. L'approcha antérieure d'une extraction à flux poussé conduisait à saturer la zone de stockage. La composition des nouvelles couches-sources extraites variant légèrement, il était fréquent d'observer une superposition des couches de composition chimique voisines. Cette superposition engendrait une hétérogénéité des stocks d'inputs réputés homogènes, dégradant la qualité de l'information utilisée par la suite dans le blending. On peut ajouter que la superposition se fait sous la forme d'un tas conique, les bornes de ce tas peuvent ne pas avoir forcément la même composition de couches que le sommet du tas. Cette configuration mène en fait à fausser les résultats parce que la pondération supposée faite sur les couches composant le tas n'est pas répartie de la même façon sur toute partie du tas. Avec le modèle de blending dynamique qui cherche à extraire et stocker juste ce qui va être consommé, la constitution de ces stocks secondaires hybrides n'a plus de raisons d'être.

Le blending dynamique vise à minimiser les écarts par rapport à des valeurs-cibles situées à l'intérieur des bornes inférieures et supérieures de la charte qualité pour

les outputs utilisés par la chimie en aval de la chaîne logistique, réduisant ainsi (la variabilité de la composition chimique des qualités envoyées qui a un impact négatif sur les lignes de production d'acide phosphorique). Ce changement s'inscrit dans une perspective d'amélioration de la performance au niveau de la chaîne logistique et non localement.

Pour faciliter l'interfaçage de saisie des données et l'affichage des résultats, une application développée en VBA a été réalisée dans le cadre d'un projet informatique de 2ème année de cycle d'ingénieur (Figure 59).

Figure 59. Interface de l'application du blending.

5 COUPLAGE ENTRE LA PLANIFICATION MINIERE ET LE BLENDING DYNAMIQUE

Le modèle de pilotage intégré de la mine basé sur la simulation permet de tester divers scénarios et par conséquent de fournir plusieurs configurations de profils d'alimentation. En effet, ces courbes représentent les opportunités offertes par le chantier et les alimentations possibles en couches sources. Ces dernières seront par la suite considérées comme des inputs du modèle de blending dynamique qui va chercher, à partir de ces données d'entrée, à vérifier si les demandes clients en termes de qualité et de quantité peuvent être honorées. Cette recherche d'adéquation doit tenir compte du fait que, d'une part, le modèle de planification définit les profils d'alimentation sur un horizon de plusieurs mois (trimestre) et, d''autre part, que le blending dynamique est une réponse à un carnet de commandes établi sur quelques semaines. Si le profil d'alimentation ne répond pas bien aux exigences de la demande exprimée en aval de la chaîne, il faut tester un nouveau scénario en modifiant le paramétrage de la simulation.

On est en présence d'une interaction entre le modèle d'extraction et celui de blending qui passe par une négociation de contraintes (la programmation du blending pouvant être modifiée). Ce couplage fait partie des travaux en cours ne rentrant pas dans le cadre de cette thèse. La Figure 60 (l'adaptation de la Figure 54) représente le principe de couplage entre le modèle de planification minière en amont et la constitution des matrices / qualités marchandes en aval. Ce couplage est basé principalement sur une logique de négociation de contraintes pour pouvoir trouver un compromis respectant les deux parties et permettant notamment de satisfaire les exigences clients comme étant l'objectif ultime derrière chaque gestion de la CL. La Figure 60 sera par la suite détaillée par les figures sous-jacentes Figure 61, Figure 62, Figure 63.

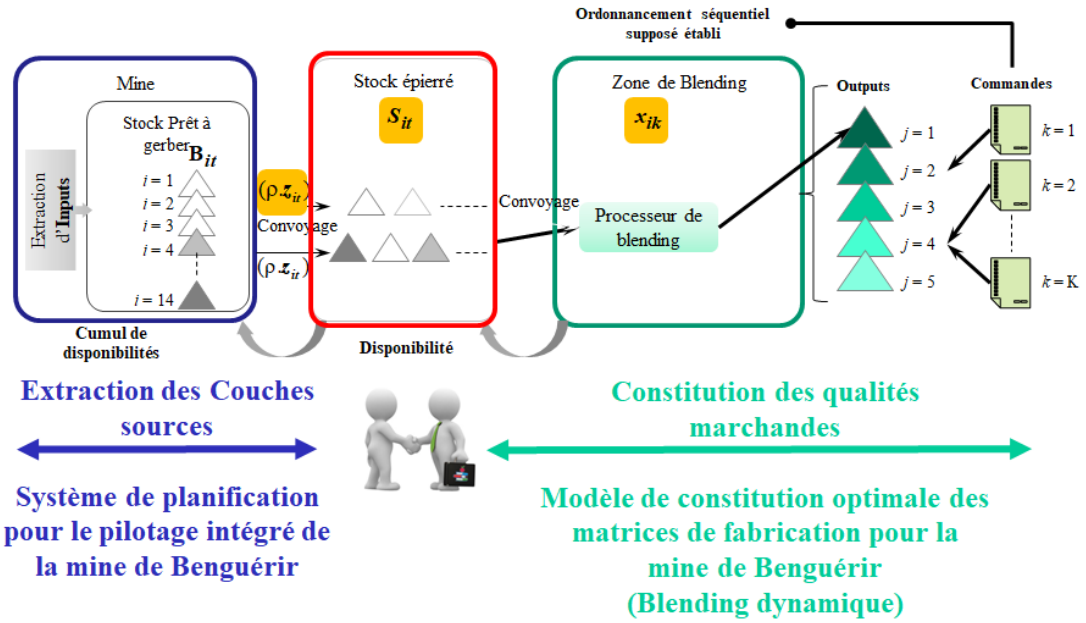


Figure 60. (a) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique.

Le cumul de disponibilités des couches sources représente les courbes d'alimentations obtenues par chaque scénario du modèle de planification (Figure 61).

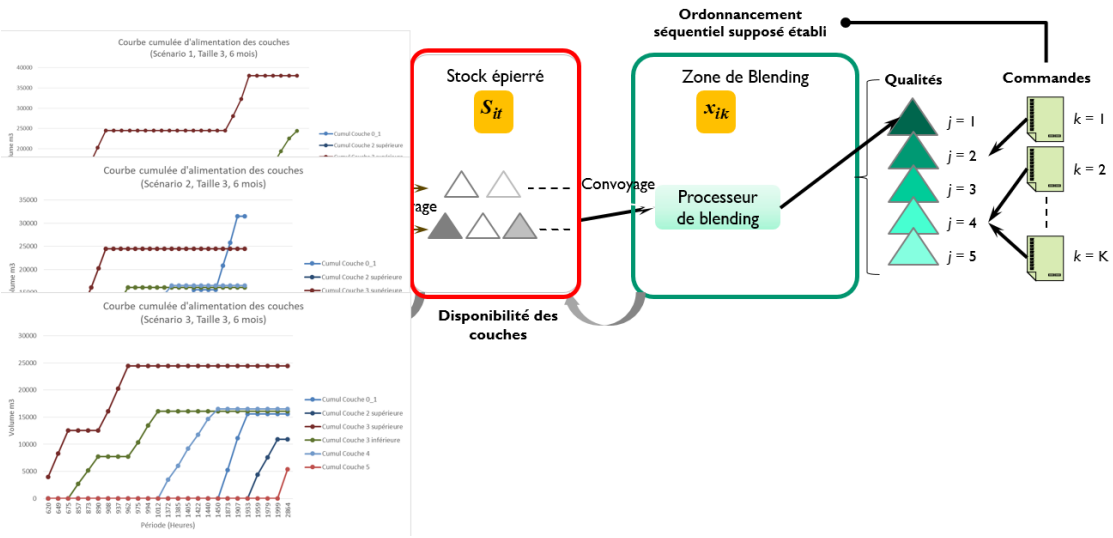


Figure 61. (b) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique.

Pour chaque scénario étudié (Figure 62) nous testons la validité des résultats obtenus en les couplant avec le modèle du blending dynamique pour mesurer à quel point nous pouvons avec ces alimentations satisfaire les demandes sur cet horizon de planification.

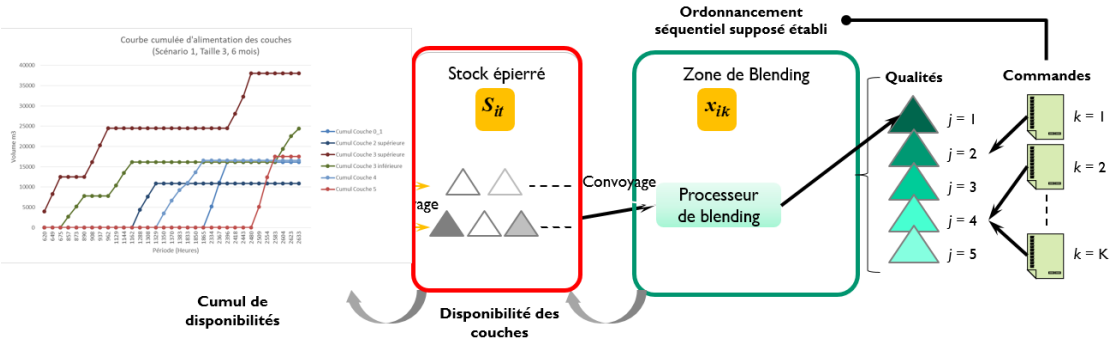


Figure 62. (c) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique.

Au cas où nous ne pouvons pas satisfaire les demandes avec le scénario étudié, nous revenons sur le modèle de planification minière pour pouvoir modifier les données d'entrée dans une logique de boucle rétroactive entre les deux composants (Figure 63).

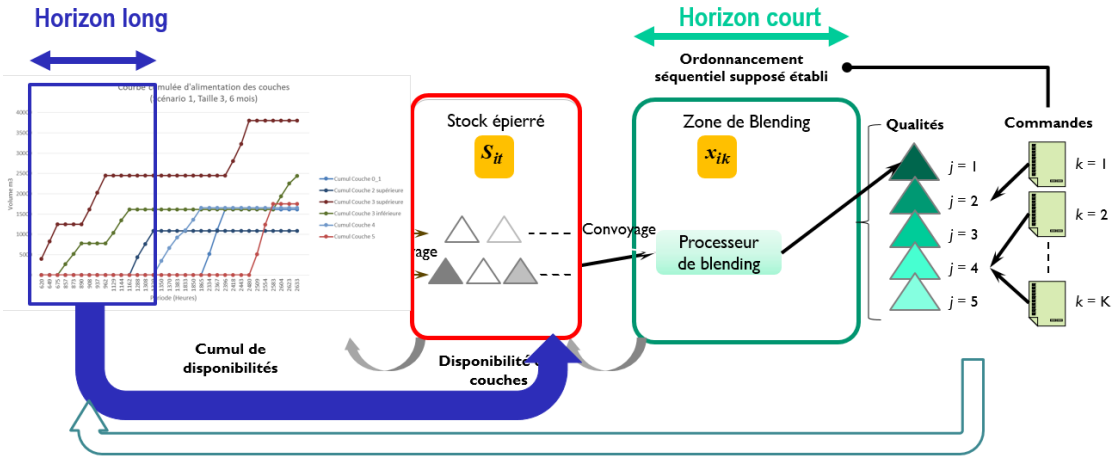


Figure 63. (d) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique.

Nous envisageons par la suite de développer un système d'aide à la décision permettant un couplage fort entre les deux modèles pour pouvoir mieux choisir le scénario le plus adéquat. L'évaluation faite jusqu'à présent sur les scénarios étudiés se base sur le point de vue et la faisabilité physique de la gestion de la chaîne, une évaluation d'un point de vue économique est également envisageable dans les travaux à venir.

6 CONCLUSION

Une version étendue du « modèle multi-produits / multi-périodes » (détaillée au §3.2) a été benchmarkée durant l'été 2017 sur le site de Ben Guerir. Ces extensions impliquent l'intégration du choix des inputs à acheminer vers la zone de blending et l'utilisation des valeurs cibles pour déterminer les composants des outputs. Comme la performance du blending dynamique surpassait nettement les pratiques en vigueur, le blending dynamique a été adopté sur ce site et son extension est en cours d'étude pour les autres sites OCP. Il s'est traduit par une amélioration de la qualité des produits expédiés et une réduction des stocks à un niveau comparable de fonctionnement organisationnel (les autres ressources consommées sont restées constantes).

Dans le futur proche, la méthode de blending dynamique sera couplée au modèle de planification des stades opératoires en amont, qui fournira ensemble une correspondance intelligente entre l'approvisionnement des couches (flux poussés) et la

production des mélanges (flux d'extraction), pour aider à répondre à l'imprévisibilité relative traiter dans toute la mesure du possible.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Dans un cadre concurrentiel aussi accru que celui des dernières décennies, l'industrie minière se trouve face à l'obligation de revoir sa stratégie et ses processus pour pouvoir créer plus de valeur, réduire son prix de revient et par conséquent de réaliser plus de marges. Pour atteindre ces objectifs, il est clair qu'elle doit chercher à repérer les gaspillages survenant tout au long de la chaîne et d'essayer de les réduire. La complexité spatio-temporelle de cette industrie rend difficile, pour les responsables de la mine, d'envisager autrement son processus de fonctionnement et donc à appliquer de nouvelles approches tant qu'ils ne peuvent mesurer l'impact physique et monétaire des changements proposés. C'est dans cette perspective que nous avons proposé d'étendre l'approche organisationnelle japonaise du Lean Management orientée production discrète au contexte de l'industrie minière de process.

Le sujet de recherche que nous avons entamé à travers ce manuscrit porte sur la proposition d'une méthodologie pour un Lean Mining Durable avec une mise en œuvre sur le cas de l'industrie d'extraction de phosphate au sein de la mine de Ben Guerir - OCP SA. L'objet de ce sujet est de proposer une méthodologique opérationnelle susceptible d'être appliquée à d'autres industries de la mine à ciel ouvert, pour améliorer à la fois leur efficacité et efficience. Il s'agit dans ce cas de prendre en compte la variabilité des conditions de travail de la mine : variabilité de la géologie, fort et lourd parc matériel, opérations élémentaires variées et compliquées, un ensemble de matière première (ressource minérale) divers et varié (dans le temps et dans l'espace), une forte consommation énergétique (eau, électricité, gasoil, …) et de reproduire in vitro la réalité et de nouveaux modes de fonctionnement afin de satisfaire la demande client tout en minimisant les activités de non-valeur ajoutées.

Pour mener à bien ce projet, nous avons suivi la démarche suivante :

- Effectuer une revue de la littérature détaillée sur le Lean Mining pour prendre connaissance des avancées existant dans ce domaine et repérer les limites de ces travaux. Cette étape et l'analyse approfondie des conditions d'extraction nous ont conduit à proposer des pistes d'amélioration pour l'industrie minière. Notre constat est triple :
  - Apport méthodologique ; suite aux travaux analysés nous avons remarqué que le principe d'adaptation du Lean Management au sein de la mine et la mise en

œuvre du Lean Mining ont été étudiés comme étant soit une simple application des outils du Lean Management soit comme un retour d'expérience peu formalisé. Ce constat porte sur le manque de méthodologie définissant les étapes à suivre, les outils à mobiliser ou à construire, les approches à mettre en œuvre ou à améliorer pour une vraie mise en œuvre de l'approche LM dans un cadre généralisable.

- Briques logicielles pour l'aide à la décision ; nous avons constaté que la mise en du LM ne se limite pas à une adaptation des outils du Lean Management ; réfléchir à la proposition de nouveaux outils pour l'aide à la décision dans un contexte aussi variable que celui de la mine constitue un défi pour le chercheur en organisation industrielle. Les briques logicielles doivent permettre d'apprécier l'impact des décisions prises à un niveau précis de la chaîne sur le reste de toute la chaîne.
- Nouvelles méthodes d'organisation industrielle ; nous avons constaté que les travaux analysés dans la littérature portent principalement sur la résolution des problèmes et non pas sur une revue des méthodes traditionnelles utilisés par les industries minières. Comme ces dernières connaissent un fort changement de leurs terrains d'exploitation, une vraie réflexion pour vérifier à quel point les méthodes traditionnelles restent encore valides est à mener.

Pour répondre à ces défis :

- nous avons proposé la méthodologie ASCI pour le LM qui constitue un guide méthodologique permettant une recherche action dans le contexte de l'industrie minière. Ce guide méthodologique explique comment formaliser les modèles de connaissance (cartographie des flux) et comment imbriquer les modèles informatiques permettant de résoudre les problèmes industriels dédiés.
- Les modèle (s) d'action porte principalement sur deux briques logicielle dont la première porte sur la planification minière pour assurer un pilotage intégré de la mine et d'aider à la prise de décision dans un délai court. Nous avons présenté dans le Chapitre 4 les principes de conception, les paramètres pris en compte par le modèle construit. Une illustration et discussion des résultats du modèle ont été également abordées. Le chapitre 5 présente une autre brique logicielle qui permet d'améliorer l'organisation industrielle de la mine.

- Nous avons proposé une méthode de constitution des mélanges de minerai qui change complètement celle utilisée actuellement. Cette dernière est basée sur une logique de nomenclature figée alors que nous proposons des nomenclatures dynamiques que nous avons appelés « blending dynamique ». Ces nomenclatures dynamiques visent à définir les mélanges optimaux qui varient au fil du temps en fonction des minerais extrait du chantier et de leur composition chimique.

Le sujet que nous avons traité dans ce manuscrit a fait objet d'un projet de recherche pour pouvoir d'une part répondre à une problématique industrielle réelle et d'autre part répondre aux défis scientifiques établis à la fin du chapitre 2 et aussi à la fin des états de l'art des chapitres 4 et 5. Les résultats obtenus par notre méthodologie et les modèles associés représentent les outputs des décisions prises en amont. Ainsi, nous entrons dans une logique rétroactive jusqu'à obtention des résultats qui s'approche de l'optimum et qui sont réalisables (Figure 64).

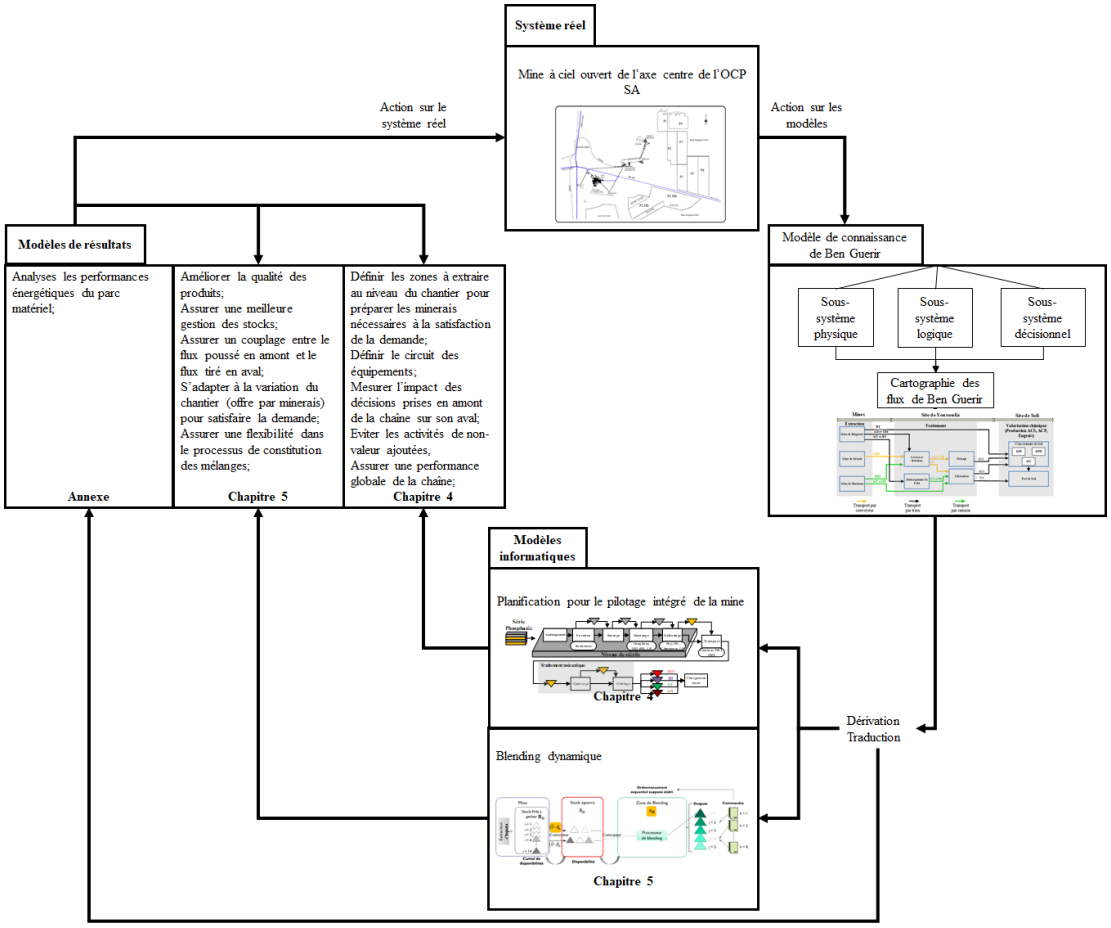


Figure 64. La logique rétroactive du projet de recherche ASCI_LM

Les différents apports cités précédemment pour ce travail de recherche sont même réutilisables dans d'autres contextes industriels et d'autres qui ne le sont pas.

Pour faciliter cette illustration, nous avons choisi de récapituler ces apports dans le Tableau 36:

Tableau 36. Éléments réutilisables du projet de recherche.

Eléments construit dans cette thèse	Réutilisable sur d'autres contextes miniers
Méthodologie de mise en œuvre du Lean Mining Durable	Oui
Principes de modélisation (Modèle de planification minière)	Oui, sur les mines à ciel ouvert à caractère sédimentaire
Principes des mélanges dynamiques	Oui dans le contexte de l'industrie minière

Comme tout autre travail, il est normal d'y avoir des limites qui peuvent être repérées et améliorées par la suite. Nous pouvons signaler que les outils d'aide à la décision sont conçus principalement pour les processus continus/ hybrides.

L'apport organisationnel (le passage des nomenclatures figées aux nomenclatures dynamiques) a été testé uniquement sur l'industrie de phosphate : une extension de cette nouvelle méthode d'organisation industrielle dans le contexte d'autres industries (pétrochimie, agro-alimentaire) est tout à fais possible.

Concernant les perspectives du court terme pour ce projet, nous sommes en train de finaliser les interfaces graphiques facilitant la saisie des données d'entrée et l'affichage des résultats pour le modèle de planification minière et celui du blending dynamique. La création de ces interfaces vient en réponse à la demande de l'OCP pour pouvoir faciliter l'utilisation des modèles par les responsables de l'OCP et, également, pour faciliter l'interaction de l'utilisateur avec le modèle. Nous sommes également à la fin de la phase de validation du modèle de planification minière avec les données réelles de l'OCP pour passer à une industrialisation du modèle. Nous envisageons également de travailler sur le couplage entre le modèle de planification minière et le blending dynamique.

Ce projet de thèse a débouché en fait sur deux autres projets de thèse ; la première qui consiste à généraliser l'approche du Blending dynamique sur d'autres mines du site de Gantour-Axe centre de l'OCP-SA (M'Zinda et Bouchane) et de

travailler sur l'optimisation multi-sites du blending. La deuxième concerne la mise en place du principe du blending dynamique sur un deuxième axe de l'OCP-SA (Axe nord). Ce travail consiste à adapter ce principe à cet axe et de prendre en compte en plus de la mine du processus de lavage et concentration qui impose d'autres contraintes et particularités au modèle. Ces deux thèses ont déjà commencé il y a un an (septembre 2017). La troisième thèse qui va commencer en septembre 2018 avec l'axe centre, portera sur le modèle de planification minière et consistera à proposer un modèle de valorisation économique pour pouvoir évaluer économiquement les différents scénarios obtenus par le modèle et d'aider l'utilisateur à une meilleure prise de décision.

Nous envisageons également de travailler sur le couplage de ce travail avec l'aval (la partie traitement chimique (production d'acide sulfurique et phosphorique) ainsi que l'expédition) dans une perspective de pilotage coopératif des maillons de la supply chain de l'OCP.

D'un point de vue recherche opérationnelle, le recours à une modélisation de la chaîne logistique minière à l'aide de modèles théoriques de type RCPSP avec une modélisation à l'aide de graphes disjonctifs pourrait permettre d'utiliser des algorithmes particuliers permettant de constituer une alternative à l'approche simulatoire d'une part et d'autre part à l'approche purement optimisante.

TABLE DES MATI ÈRES

REMERCIEMENT 2

RÉSUMÉ 3

ABSTRACT 5

INTRODUCTION GÉNÉRALE 7

CHAPITRE 1 17

ÉTUDE DE DOMAINE : LE SECTEUR MINIER 17

1 INTRODUCTION 18

2 CARACTÉRISTIQUES ET PLACE DU SECTEUR MINIER DANS L'ÉCONOMIE MONDIALE 19

2.1 Caractéristiques du secteur minier en général 19

2.2 Place du secteur minier dans l'économie nationale et internationale 20

2.3 L'exploitation souterraine versus celle à ciel ouvert 21

2.4 Les défis du secteur minier 22

3 LE SECTEUR MINIER DU PHOSPHATE 24

3.1 Distribution des minerais phosphatés dans le globe terrestre 26

3.2 Le phosphate au Maroc 27

4 INDUSTRIE D'EXTRACTION DU PHOSPHATE DE L'OCP SA 29

4.1 Présentation de l'OCP-SA 29

4.2 Cartographie globale de la chaîne logistique de l'OCP Axe centre 30

4.3 Découpage des panneaux et les couches phosphatées au sein de la mine de Ben Guerir à OCP-SA 31

4.4 Méthode d'exploitation au sein de la mine de Ben Guerir à OCP-SA 32

4.5 Organigramme de fonctionnement de la chaîne logistique de la mine de Ben Guerir à OCP-SA 40

5 CAHIER DES CHARGES INITIALEMENT ETABLI DANS LE CADRE DE CE PROJET DE RECHERCHE 42

6 CONCLUSION 43

CHAPITRE 2 44

ÉTAT DE L'ART SUR LE LEAN MINING 44

1 INTRODUCTION 45

2 LEAN MANAGEMENT versus LEAN MINING 47

2.1 Principes du Lean Management 47

2.2 Caractérisation du Lean Mining 50

2.3 De la chaîne logistique de production de masse à la chaîne logistique minière ou Supply Chain Minière 52

3 LE CARACTERE ACTIONNABLE DU LEAN MINING 56

4 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES Principes et outils du Lean MINING mis en œuvre en contexte minier. 72

4.1 Les principes du Lean Management étendu au contexte minier. 72

4.2 Les Outils du Lean Management contextualisés au secteur minier 75

5 SYNTHESE des TRAVAUX. 78

6 CONCLUSION 84

CHAPITRE 3 88

PROPOSITION DE LA MÉTHODOLOGIE ASCI (ANALYSE, SPÉCIFICATION, CONCEPTION, IMPLANTATION) POUR LE LEAN MINING 88

1 INTRODUCTION 89

2 MÉTHODOLOGIE ASCI (ANALYSE, SPÉCIFICATION, CONCEPTION, IMPLANTATION) POUR LE LEAN MINING 90

2.1 Cadre méthodologique d'ensemble 90

2.2 Analyse et Spécification pour le domaine du Lean Mining 93

2.3 Conception et implantation pour le Lean Mining 109

3 PROCESSUS DE MODELISATION DU SYSTEME MINIER « AXE CENTRE DE L'OCP » A L'AIDE DE LA DEMARCHE ASCI_LM 111

4.1. Étude du contexte : Industrie d'extraction du phosphate à OCP-SA Axe centre 111

4.2. Construction des modèles de connaissance pour OCP-SA Axe centre 112

4.3. Construction des modèles informatiques pour OCP-SA Axe centre 121

4 CONCLUSION 124

CHAPITRE 4 126

CONSTRUCTION DU PROGRAMME TACTIQUE D'EXTRACTION DE PHOSPHATE 126

1 INTRODUCTION 127

2 DÉFINITION DU PROBLÈME 130

3 DÉFINITION DU PROGRAMME D'EXTRACTION PAR L'OPTIMISATION 138

3.1 Revue de la littérature sur la planification minière 138

3.2 Formulation du problème de planification minière par la programmation mathématique 148

4 DÉFINITION DU PROGRAMME D'EXTRACTION PAR LA SIMULATION 152

4.1 Revue de la littérature sur la simulation à événements discrets dans la mine 152

4.2 Formulation du problème de planification minière par la simulation à événements discrets 159

5 CONCLUSION 184

CHAPITRE 5 186

LE BLENDING DYNAMIQUE COMME SOURCE DE FLEXIBILITÉ ET D'EFFICACITÉ DANS LA GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE DE PHOSPHATE 186

1 INTRODUCTION 187

2 REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE BLENDING 189

3 FORMULATION DU PROBLEME DE BLENDING 196

3.1 Modèle statique de blending 196

3.2 Modèle du blending dynamique 199

4 ILLUSTRATION DU PROBLEME DE BLENDING 202

4.1 Flexibilité du blending dans un contexte statique 202

4.2 Flexibilité du blending dans un contexte dynamique 213

4.3 Apports du modèle de Blending dynamique 215

5 COUPLAGE ENTRE LA PLANIFICATION MINIERE ET LE BLENDING DYNAMIQUE 216

6 CONCLUSION 219

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 221

TABLE DES MATI ÈRES 226

LISTE DES FIGURES 232

LISTE DES TABLEAUX 236

TABLE DES NOTATIONS 239

BIBLIOGRAPHIE 243

ANNEXE 256

ANALYSE DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DE LA MINE DE BEN GUERIR 256

1 INTRODUCTION 257

2 BIBLIOGRAPHIE SUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE EN GENERAL ET A LA MINE EN PARTICULIER 259

2.1 À travers l'industrie et la société 259

2.2 En entreprise 262

2.3 Dans les industries chimiques et minières 262

2.4 À OCP-SA 263

3 DONNÉES DE FONCTIONNEMENT DE LA MINE DE BEN GUERIR 264

3.1 Données des équipements OCP 264

3.2 Cas de la sous-traitance 266

3.3 Compléter le jeu de données 267

3.4 Émissions de gaz à effet de serre 268

4 ANALYSE DES DONNEES 269

4.1 Un indicateur de durabilité 269

4.2 Analyse des Composantes Principales des données 273

4.3 VSM durable 289

5 CONCLUSION 291

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en découverte (Poulard *et al.* 2017). 22
Figure 2.Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en fosse (Poulard *et al.* 2017). 22
Figure 3. Réserves de phosphate et sites exploités par l'OCP au Maroc. 29
Figure 4. Cartographie macroscopique de la chaîne logistique de l'OCP Axe centre.30
Figure 5. Découpage des panneaux au sein de la mine de Ben Guerir. 31
Figure 6. Description du processus global de la mine de Ben Guerir. 32
Figure 7. Confrontation entre flux poussé et tiré au sein de la mine de Ben Guerir. 33
Figure 8. Équipements d'aménagement : Niveleuse, Paydozer, Bulldozer D11 et D9. 34
Figure 9. Équipement de Foration : Sondeuses PV1, SKF, DKS. 35
Figure 10. Processus de Sautage. 35
Figure 11. Machines de décapage : Bulldozer D11, Draglines 7500M, P&H, 200B. 36
Figure 12. Machines de la nouvelle technologique : Surface miner, Liebherr. 36
Figure 13. Machines de Défruitage : Paydozer, Bulldozers D9, Chargeuse, Cribleuse mobile. 37
Figure 14. Camions 136 t, Camion 190 t. 38
Figure 15. Processus extractif détaillé avec la prise en compte du parc matériel. 40
Figure 16. Organigramme de fonctionnement de la chaîne logistique de Ben Guerir. 41
Figure 17: Objectifs du Lean Management. 49
Figure 18. Du composant méthodologique ASCI au logiciel d'aide à la décision pour un système complexe. 91
Figure 19. Instanciation du Composant méthodologique ASCI pour la méthodologie par processus multiples et incrémentiels dans le contexte de notre projet de recherche. 93
Figure 20. Définition des sous-systèmes composant la chaîne minière. 94
Figure 21. Interaction entre les sous-systèmes composant la chaîne minière. 96
Figure 22. Définition des clusters processuels composant la chaîne minière. 97
Figure 23. La démarche « *FALM* ». 99

Figure 24. Synoptique d'élaboration de la VSM. 105
Figure 25. Méthodologie de quantification et d'analyse des stocks. 107
Figure 26. Méthodologie de l'analyse énergétique. 108
Figure 27. Conception des briques logicielles relativement au cluster processuels. 111
Figure 28. Rubriques composant la chaîne minière à OCP-SA. 113
Figure 29. Illustration des sous-systèmes à OCP-SA. 114
Figure 30. Illustration d'interaction entre sous-systèmes à OCP-SA. 115
Figure 31. Tableau de bord de visualisation de la chaîne minière sous multiples vues. 120
Figure 32. Concrétisation de la mise en œuvre de ASCI_LM sur OCP-SA Axe centre. 124
Figure 33. Structure de la mine. 131
Figure 34 : Vue en 3D du deuxième *pushback* de la mine de fer de Chadormalu (Gholamnejad et Moosavi 2012). 139
Figure 35. Un plan de production planifié par pushbacks (Chicoisne *et al.* 2009). 140
Figure 36. Modélisation du processus d'extraction du gisement en combinant la vision longitudinale et la vision transversale. 161
Figure 37. Vision transversale du processus d'extraction à l'instant *t*=0. 164
Figure 38. Événements se produisant à l'instant *t* = 1,6 heure. 167
Figure 39. Événements se produisant à l'instant *t* = 3,1 heures. 168
Figure 40. Événements se produisant à l'instant *t* = 5 heures. 169
Figure 41. Courbes d'alimentation des minerais découlant du programme d'extraction. 170
Figure 42. Paramètres du modèle d'aide au pilotage pour la planification minière. 171
Figure 43. Illustration de la logique de constitution des sous-panneaux et des CCL. 174
Figure 44. Logique d'affectation des machines selon les indices de priorité. 175
Figure 45. Relation entre les demandes, le blending dynamique et les indices de priorité. 175
Figure 46. Résultats en courbes d'alimentations des couches par scénario. 177
Figure 47. Courbes d'alimentation en couches sources sur 3 mois, 6 mois et 1an. 179
Figure 48. Exemple de Gantt d'occupation de la machine Bulldozer D9. 179
Figure 49. Courbes d'alimentation en couches sources en variant la taille du lot. 180
Figure 50. Le diagramme de classe de la base de données. 181

Figure 51. Interface graphique du modèle de planification minière. 181
Figure 52. Positionnement du processus de blending de la mine de Ben Guerir. 187
Figure 53. Grille d'analyse des articles traitant du blending. 194
Figure 54. Modèle du blending dynamique. 202
Figure 55. Composition optimale de chaque output *j*. 203
Figure 56. Exemple de la composition de l'output *j*=1 sans la prise en compte des valeurs de H avec une fonction-objectif de minimisation ou de maximisation de la consommation de l'input *i*=3. 208
Figure 57. Exemple de la composition de l'output *j*=1pour différentes valeurs de H et une fonction objectif de minimisation de la consommation de l'input *i*=3. 209
Figure 58. Exemple de la composition de l'output *j*=1 pour différentes valeurs de H avec une fonction-objectif de maximisation de la consommation de l'input *i*=3. 210
Figure 59. Interface de l'application du blending. 216
Figure 60. (a) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique. 217
Figure 61. (b) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique. 218
Figure 62. (c) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique. 218
Figure 63. (d) Couplage entre la planification minière et le blending dynamique. 219
Figure 64. La logique rétroactive du projet de recherche ASCI_LM 223
Figure 65. Les équipements impliqués dans l'étude. 264
Figure 66.Durabilité mensuelle moyenne des équipements du chantier (à gauche) et des installations fixes (à droite) pour l'année 2015. 272
Figure 67. OEE et OEEE mensuels moyens des équipements pour l'année 2015. 273
Figure 68. Cercles des corrélations pour les équipements de chantier avec toutes les variables disponibles (gauche) et les 6 variables sélectionnées (droite). 275
Figure 69. Moyennes des variables de l'ACP pour les équipements du chantier (sauf les sondeuses). 277
Figure 70. Diagramme des valeurs propres de l'ACP des équipements du chantier.278
Figure 71. Le cercle de corrélation et le plan factoriel de l'ACP des équipements du chantier. 279
Figure 72. 2ème cercle de corrélation et 2ème plan factoriel de l'ACP des équipements du chantier. 281
Figure 73. Moyennes des variables de l'ACP des sondeuses. 284
Figure 74. Diagramme des valeurs propres de l'ACP des sondeuses. 284
Figure 75. 1er cercle de corrélation et 1er plan factoriel de l'ACP des sondeuses. 284

Figure 76. Moyennes des variables de l'ACP pour les installations fixes. 286
Figure 77. Digramme des valeurs propres de l'ACP des installations fixes. 287
Figure 78. 1er cercle de corrélation et 1er plan factoriel de l'ACP des installations fixes. 287
Figure 79. 2ème cercle de corrélation et 1er plan factoriel de l'ACP des installations fixes. 288

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Répartition par pays de la production et des réserves de phosphates en 2015 (en million de tonnes) (Giraud 2017). 28

Tableau 2 : Définition et impact des outils du Lean Management. 50

Tableau 3 : Mots-clés de la recherche bibliographique sur le Lean Mining avec les instructions logiques. 51

Tableau 4 : Comparaison entre la supply chain de production de masse et la supply chain minière 56

Tableau 5. Lean thinking transforming old practices (Steinberg and De Tomi 2010). 65

Tableau 6. (a)Grille d'analyse des articles du Lean Mining 71

Tableau 7. (b)Grille d'analyse des articles du Lean Mining 79

Tableau 8. Adaptation des outils du Lean au secteur minier (Helman 2012). 80

Tableau 9. Vision longitudinale (dans le panneau $p = 2$). 133

Tableau 10. Opérations élémentaires et opérations chronologiques (dans le panneau $p = 2$). 133

Tableau 11. Machines disponibles pour chaque opération élémentaire. 134

Tableau 12. Temps opératoires moyens et cumulés ($\theta_{\omega_{i_p}}$;$\Theta_{\omega_{i_p}} = \sum_{i'_p=1}^{i'_p=i_p} \theta_{\omega_{i'_p}}$) d'exécution des opérations élémentaires ω_{i_p} sur la couche κ_{i_p} du panneau *p*. 135

Tableau 13 : Grille d'analyse des articles étudiés dans la planification minière en utilisant l'optimisation. 148

Tableau 14. Grille d'analyse des articles étudiés dans la planification minière en utilisant la simulation. 158

Tableau 15. État du système productif à l'initialisation de la simulation. 164

Tableau 16. Dates d'alimentation du stock en minerais. 165

Tableau 17. Liste des cases par ordre croissant des temps résiduels. 166

Tableau 18. Exemple de définition des indices de priorité à partir des demandes de 2017. 175

Tableau 19. Impact de la variation du paramètre « Priorité de la couche » sur le calcul de l'indice de priorité IP1. 175

Tableau 20. Impact de la variation du paramètre « Accessibilité de la couche » sur le calcul de l'indice de priorité IP1. 176
Tableau 21. Scénarios définissant les indices de priorité étudiés. 176
Tableau 22. Évolution du STV de fin avril 2016 au fin mars 2017. 183
Tableau 23. Coûts de transports de phosphate entre fin avril 2016 au fin mars 2017. 183
Tableau 24. Composition des inputs α_{ci} et les spécifications de la composition de certains outputs β_{cj} . 197
Tableau 25. Composition optimale de chaque output *j*. 203
Tableau 26. % minimal et maximal d'inputs *i* dans chaque output *j*. 203
Tableau 27. Mélanges possibles de certains outputs, en fonction d'un nombre prédéterminé H d'inputs à utiliser. 205
Tableau 28. Mélanges possibles pour l'output *j*=1 pour un H=6 et en fonction des valeurs prises par ε . 206
Tableau 29. Mélanges possibles pour l'output *j*=1, en fonction des valeurs prises par H et pour $\varepsilon = 1$ (tableau à gauche) et $\varepsilon = 5$ (tableau à droite). 207
Tableau 30. Composition de l'output *j*=1 pour un H déterminé et une fonction-objectif de minimisation ou de maximisation de la consommation de l'input *i*=3. 208
Tableau 31. Résultats de la Variante D pour l'output 1. 211
Tableau 32. Résultats de la Variante D pour l'output *j*=4. 212
Tableau 33. Facteurs influençant les mélanges (et) dans le problème "Mono-période / Multi-produit" 213
Tableau 34. Données du problème : stocks initiaux S_{i0} , spécifications de la commande et disponibilité cumulée B_{it} 214
Tableau 35. Résultats : résultat de l'alimentation des stocks d'input et des compositions des mélanges 215
Tableau 36. Éléments réutilisables du projet de recherche. 224
Tableau 37. Indicateurs mentionnés par Stiglitz *et al.* (2010) 260
Tableau 38. Tableaux des indicateurs et méthodes utilisées pour le développement durable dans les articles issus de la recherche bibliographique 260
Tableau 39. Facteurs d'émission utilisés. 269
Tableau 40. Tableau récapitulatif des composantes principales pour le chantier. 282
Tableau 41. Tableau récapitulatif des composantes principales de la foration. 283

Tableau 42. Tableau récapitulatif des composantes principales des installations fixes. 289
Tableau 43. Tableau récapitulatif des équipements les moins durables. 289

TABLE DES NOTATIONS

1. CHAPITRE 4 : CONSTRUCTION DU PROGRAMME TACTIQUE D'EXTRACTION DE PHOSPHATE

j	Indice du minerai extrait $(j=1..\mathrm{J})$
k	Indice de la qualité mélangée $(k=1..\mathrm{K})$
t	Indice de la période du temps $(t=1..\mathrm{T})$
p	Indice du panneau $(p=1..\mathrm{P})$
c_p	Indice de la couche du panneau p $(c_p=1..\mathrm{C_p})$
n_p	Indice de la case du panneau p $(n_p=1..\mathrm{N}_p)$
g_p	Indice du groupe de blocs appartenant à la même couche du panneau p $(g_p=1..\mathrm{G}_p)$. Si besoin, développé en g_p^1 et g_p^2
r_{g_p}	Indice du bloc dans le groupe g_p $(r_{g_p}=1..\mathrm{R}_{g_p})$ Si besoin, développé en $r_{g_p^1}$ et $r_{g_p^2}$
o	Indice de l'opération élémentaire $(o=1..7)$
i_p	Indice de l'opération chronologique $(i_p=1..\mathrm{I}_p)$ effectuée par les cases du panneau p
i_{n_p}	Indice de l'opération chronologique o $(i_p=1..\mathrm{I}_p)$ effectuée par la case n_p du panneau p $(\rightarrow \kappa_{i_{n_p}}, \omega_{i_{n_p}})$
$i_{r_{g_p}}$	Indice de l'opération chronologique effectuée par le bloc r_{g_p} du groupe g_p $(i_{r_{g_p}}=\lambda_{g_p}..\eta_{g_p})$ Si besoin, développé en $i_{r_{g_p^1}}$ et $i_{r_{g_p^2}}$
m	Indice de la machine $(m=1..\mathrm{M})$
q_{n_p}	Numéro des opérations chronologiques précédemment effectuées sur les cases n_p du panneau p
h_{c_p}	Epaisseur H de la couche c_p du panneau p
S_p	Surface de la case du panneau p
v_{c_p}	Volume de la couche c_p du panneau p
κ_{i_p}	Indice de la couche associée à l'opération chronologique i_p
ω_{i_p}	Indice de l'opération élémentaire associée à l'opération chronologique i_p
γ_{pj}	Indice de l'opération chronologique associée à la 7ème opération élémentaire, consistant à extraire la teneur j du panneau p

λ_{g_p}	Valeur indice de la première opération chronologique effectuée sur le bloc du groupe g_p. Si besoin, développé en $\lambda_{g_p^1}$ et $\lambda_{g_p^2}$
η_{g_p}	Valeur indice de la dernière opération chronologique effectuée sur le bloc du groupe g_p. Si besoin, développé en $\eta_{g_p^1}$ et $\eta_{g_p^2}$
$\Psi_{g_p^1 g_p^2}$	Booléen = 1 si les blocs du groupe g_p^2 peuvent être uniquement traités si tous les blocs du groupe g_p^1 sont déjà traités
δ_{omp}, $\delta_{\omega_{i_p} mp}$	Booléen = 1 si la machine *m* peut effectuer l'opération élémentaire *o* sur la case du panneau *p* et donc l'opération élémentaire ω_{i_p} associée à l'opération chronologique
$\theta_{\omega_{i_p}}$	Temps de traitement moyen de l'opération élémentaire
$\Theta_{\omega_{i_p}}$	$\Theta_{\omega_{i_p}} = \sum_{i'_p=1}^{i'_p=i_p} \theta_{\omega_{i'_p}}$
$\theta_{\omega_{i_p} m}$	Temps de traitement de l'opération élémentaire exécutée par la machine *m*
$\rho_{\omega_{i_p} m}$	Rendement horaire de l'opération élémentaire exécutée par la machine *m*
I_j^{Min}	Stock de sécurité du minerai extrait *j*
I_{jt}^{Max}	Capacité disponible maximale du stock du minerai extrait *j* à la fin de la période *t*
D_{jt}	Demande du minerai extrait *j* à la période *t*
D_{kt}	Demande du minerai mélangé *k* à la période *t*
I_{j0}	Stock initial du minerai extrait *j* utilisé dans les modèles d'optimisation et de simulation
$x_{i_{n_p} mt}$	Variable binaire = 1 si l'opération chronologique est exécutée par la machine *m* et achevée à la fin de la période *t* *Variable de commande*
I_{jt}	Stock du minerai extrait *j* à la fin de la période *t* *Variable intermédiaire* (relation 1, en utilisant relation 6)
$\tau_{i_{n_p}}$	Période d'achevement de l'opération *Variable intermédiaire* (relation 3)
P_{jt}	Minerai extrait approvisionné *j* durant la période *t* *Variable intermédiaire* (relation 6)

2. CHAPITRE 5 : LE BLENDING DYNAMIQUE COMME SOURCE DE FLEXIBILITÉ ET D'EFFICACITÉ DANS LA GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE DE PHOSPHATE

i	Indice du minerai $(i = 1..N)$
j	Indice des outputs mélangés $(j = 1..J)$
c	Indice du composant chimique $(c = 1..C)$
t	Indice de la période $(t = 1..T)$
α_{ci}	Pourcentage (%) du composant *c* dans le poids de l'input *i*
k	Indice de la commande à satisfaire $(k = 1..K)$
H	Numéro d'inputs à utiliser dans le blending
γ_i	Le coût d'acquisition de l'input *i*
η	Coût du stockage supplémentaire
θ_i	Pénalité fictive induite par le manque du stock de sécurité
□	Débit des convoyeurs
β_{cj}	Structure de l'output *j*
β_{cj}^{Min}	Borne inférieure de la teneur de chaque composant dans l'output *j*
β_{cj}^{Max}	Borne supérieure de la teneur de chaque composant dans l'output *j*
β_{cj}^{Eq}	Contrainte de la composition du composant *c* pour l'output *j* dans le cas d'égalité
ν_k	Durée de prélèvement
R_t	Nombre de convoyeurs disponibles durant la période *t*
B_{it}	Disponibilité cumulée de l'input *i* à la fin de la période *t* en amont de la zone de blending
S_{i0}	Stock initial de l'input *i*
S_i^{Max}	Capacité de stockage de l'input *i*
S_i^{Min}	Stock de sécurité
S_{it}	Stock de l'input *i* à la fin de la période *t*
σ	Capacité du stockage global
$A_{it'}$	Approvisionnements disponibles au début de la période $t' \leq t$
D	Demande d'un output unique
D_k	Demande de la commande k
λ_k	L'output de la commande k
x_i	Variable de commande correspond à la quantité de l'input i utilisé pour obtenir un output unique
x_{ik}	Variable de commande correspond au poids de l'input i inclus dans le poids D_k de la commande *k* qui porte sur l'output λ_k
$z_{ij'}$	Variable binaire, $z_{ij'} = 1$ si l'input *i* est utilisé pour produire l'output j', sinon zéro
δ_{kt}	Variable binaire = 1 si The l'accomplissement de la commande *k* mène à un prélèvement des inputs durant la période *t* ce qui implique $\delta_{kt} = 1$ (sinon, ce booléen est égale à 0)

ϕ_{it}	Variable binaire égale à 1 si le prélèvement de l'input *i* se fait durant la période *t*
B_{it}	Disponibilité cumulée de l'input *i* à la fin de la période *t* en amont de la zone du blending
y_{it}	Stockage intermédiaire de l'input *i* se fait quand le stock dépasse le seuil S_i^{Max}. La variable y_{it}, possiblement nulle, détermine ce surplus
w_{it}	Variable définit le manqué par rapport au stock de sécurité

BIBLIOGRAPHIE

Abdelmalek, F., Rajgopal, J., 2007. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study, International Journal of Production Economics 107, 223-236.

Abdullah, F., 2003. Lean manufacturing tools and techniques in the process industry with a focus on steel. University of pittsburgh.

Abdullah, F., Rajgopal, J., Needy, K.L., 2002. A taxonomy of the process industry with a view to lean manufacturing. Proceedings of the American Society for Engineering Management, Tampa, FL 314–321.

Abdulmalek, F.A., Rajgopal, J., 2007. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. International Journal of production economics 107, 223–236.

Abdulmalek, F.A., Rajgopal, J., Needy, K.L., 2006. A classification scheme for the process industry to guide the implementation of lean. Engineering Management Journal 18, 15–25.

Ade, E.M., Deshpand, V.S., 2012a. Lean manufacturing and productivity improvement in coal mining industry, International Journal of Engineering Research and Development, Vol. 1, No. 5, 2293–2299.

Ade, E.M., Deshpand, V.S., 2012b. Lean manufacturing and productivity improvement in coal mining industry, International Journal of Engineering Research and Development, 2, 35-43.

Ahmad, M., Dhafr, N., Benson, R., Burgess, B., 2005. Model for establishing theoretical targets at the shop floor level in specialty chemicals manufacturing organizations. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 21, 391–400.

Amankwah, Henry, 2011. Mathematical optimization models and lethodes for open pit mining. Dissertations N°1396, Linkoping Studies in Science and Technology.

Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E., Sparks, D.L., 2015. Soil and human security in the 21st century. Science 348, 1261071.

Anthony, R.N., 1965. Planning and Control Systems: a framework for analysis. Harvard University Press.

Ashayeri, J., Van Eijs, A.G.M., Nederstigt, P., 1994. Blending modelling in a process manufacturing: A case study. European Journal of Operational Research 72, 460–468.

Askari-Nasab, H., Frimpong, S. and Szymanski, J., 2007, Modeling open pit dynamics using discrete simulation, International Journal of Mining, Reclamation and Environment 21, 35–49.

Askari-Nasab, H., Pourrahimian, Y., Ben-Awuah, E., Kalantari, S., 2011. Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling. Journal of Mining Science 47, 338.

Awuah-Offei, K., 2016. Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations. Journal of Cleaner Production 117, 89–97.

Awuah-Offei, K., Temeng, V. A. and Al-Hassan, S., 2003, Predicting equipment requirements using SIMAN simulation – a case study, Mining Technology 112, 180–184.

Azzamouri, A., Fénies, P., Fontane, F., Giard, V., (2017), Modelling the tactical decisions for open-pit mines, Working Paper 380 LAMSADE, Paris-Dauphine, PSL Research University, (http://www.lamsade.dauphine.fr/sites/default/IMG/pdf/cahier_380.pdf

Azzamouri, A., Fenies, P., Fontane, F., Giard, V., (2018), Scheduling of Open-pit Phosphate Mine Extraction, accepted for publication in International Journal of Production Research. (https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2018.1433341)

Azzamouri, A., Giard, V., (2017),Tailored blending definition as a source of flexibility in controlling mine production, 4th International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry-SYMPHOS. See also Working Paper 381 LAMSADE, Paris-Dauphine, PSL Research University (http://www.lamsade.dauphine.fr/sites/default/IMG/pdf/cahier__381.pdf)

Azzamouri, A., Giard, V., (2018), Dynamic blending as a source of flexibility and efficiency in managing phosphate supply chain. Paper submitted to the 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference 2018, July 8-11, Lyon, France.

Azzzamouri, A., Fenies, P., Fontane, F., (2016), Une approche pour un Lean Mining Responsable: mise en œuvre sur la chaîne logistique de l'OCP, Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique RIRL, EPFL–Lausanne.

Badiger, A., Gandhinathan, R., and Gaitonde, V. N., 2008, A methodology to enhance equipment performance using the OEE measure. European Journal of Industrial Engineering 2.

Bamoumen, M., Hilali, H., Hovelaque, V., Giard, V., 2018. Flexi-security stocks, a new approach for semi-raw materials used in blending. Paper submitted to the 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference 2018, July 8-11, Lyon, France.

Banque mondiale, Article du 14 Avril 2013, http://www.banquemondiale.org/fr/results/2013/04/14/mining-results-profile.

Bara, N., Gautier, F., Giar, V., 2018, Modélisation d'une chaîne logistique hybride par la simulation à évènements discrets, 12 ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation-MOSIM'18.

Barve, A., Muduli, K., 2011. Challenges to environmental management practices in Indian mining industries, in: International Conference on Innovation, Management and Service IPEDR, 297–301.

Basu, A.J. and Baafi, E.Y., 1999, Discrete event simulation of mining systems: current practice in Australia, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environmental 13, 77–78.

Ben-Awuah, E., Kalantari, S., Pourrahimian, Y. and Askari-Nasab, H., 2010, Hierarchical mine production scheduling using discrete-event simulation', Int. J. Mining and Mineral Engineering 2, 137–158.

Bengtsson, J., Bredström, D., Flisberg, P., Rönnqvist, M., 2013. Robust planning of blending activities at refineries. Journal of the Operational Research Society 64, 848–863.

Bilgen, B., Ozkarahan, I., 2007. A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping. International journal of production economics 107, 555–571.

Billesbach, T. j., 1994. Applying lean production principles to a process facility. Production and Inventory Management Journal 35, 40–44.

Bjørndal, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C., Weintraub, A., 2012. Operations research in the natural resource industry. International Transactions in Operational Research 19, 39–62.

Booth, S.K., Hagar, C.B., Garaña; E., and Herbert, R. H, 1998, Blending supplies for plant optimization, Journal (American Water Works Association) Operations and Maintenance 90, Operations and Maintenance, 40-49.

Bourges, B., Gourdon, T., and Broc.J.S., 2015, Empreinte carbone : évaluer et agir. Développement durable. Presse des Mines,

Bonnet, C., 2011. Fiches Détaillées, Les phosphates. http://www.lasim.org/images/doc_gratuite/les-phosphates.pdf).

Brown, A., Amundson, J., Badurdeen, F., 2014. Sustainable value stream mapping (Sus-VSM) in different manufacturing system configurations: application case studies. Journal of Cleaner Production 85, 164–179.

Cain, M., Price, M.L.R., 1986. Optimal mixture choice. Applied statistics 1–7.

Castillo, G., Alarcón, L.F., González, V.A., 2014. Implementing lean production in copper mining development projects: Case study. Journal of Construction Engineering and Management 141, 05014013.

Chamay Olivier, 2014, Consommation des poids lourds : quelles évolutions d'ici 2020 pour le transport à longues distances ? Revue Transport 2.

Chanda, E.K.C., Dagdelen, K., 1995. Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. International Journal of Surface Mining and Reclamation 9, 203–208.

Chicoisne, R., Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., Rubio, E., 2009. A new algorithm for the open-pit mine scheduling problem. Operations Research 60, 517-1028.

Commission Justice et Paix, 2012, Les ressources minières: richesse ou malédiction? Le cas de la République Démocratique du Congo. http://www.justicepaix.be/IMG/pdf/cjp_outil_peda_les_ressources_minieres.pdf.

Cook, R. l., Rogowski, R. a., 1996. Applying JIT principles to continuous process manufacturing supply chains. Production and Inventory Management Journal 37, 12–17.

Dagdelen, K., 2007. Open pit optimization-strategies for improving economics of mining projects through mine planning, in: 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 117–121.

Daine, F., 2016. http://www.doctissimo.fr/html/nutrition/vitamines_mineraux/phosphore.htm.

Degoun, M., Fenies, P., Giard, G., Retmi, K., Saadi, J., 2015. Propositions de règles de modélisation pour une simulation discrète d'une chaîne logistique hybride. 11ème Congrès International de Génie Industriel CIGI Québec, Canada.

Delgado, S. 2016. Cartographie des performances énergétiques de la mine de Ben Guerir.

Detty, R.B., Yingling, J.C., 2000. Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation: a case study. International Journal of Production Research 38, 429–445.

Domingo, R., Aguado, S., 2015. Overall environmental equipment effectiveness as a metric of a lean and green manufacturing system. Sustainability 7, 9031–9047.

Drescher, A., Glaser, R., Richert, C., and Nippes, K.-R., 2011. Demand for Key Nutrients (NPK) in the Year 2050; Report to the European Comission.

Dunstan, K., Lavin, B., Sanford, R., 2006. The application of lean manufacturing in a mining environment, in: International Mine Management Conference. pp. 145–154.

Edixhoven, J. D., Gupta, J., and Savenije, H. H. G., 2013. Recent Revisions of Phosphate Rock Reserves and Ressources: Reassuring or Misleading? An in-Depth Literature Review of Global Estimates of Phosphate Rock Reserves a,d Resources. Earth System Dynamic Discussions 4, 2, 34-1005.

Eivazy, H., Askari-Nasab, H., 2012. A mixed integer linear programming model for short-term open pit mine production scheduling. Mining Technology 121, 97–108.

Encyclopédie de l'environnement, 2018. http://www.encyclopedie-environnement.org.

Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., Newman, A., 2013. MineLib: a library of open pit mining problems. Annals of Operations Research 206, 93–114.

FAO, Food and Agriculture Organisation, http://www.fao.org/home/en/.

http://www.fao.org

FAO, Les gisements de phosphates dans le monde : http://www.fao.org/docrep/007/y5053f/y5053f06.htm#TopOfPage

Faulkner, W., and Badurdeen, F., 2014, Sustainable value stream mapping: methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. Journal of Cleaner Production, 85.

Féniès, P., 2006. Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels: application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain (PhD Thesis). Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.

FICO Xpress Optimization Suite, http://www.fico.com/en/products/fico-xpress-optimization-suite

Fioroni, M.M., Franzese, L.A.G., Bianchi, T.J., Ezawa, L., Pinto, L.R., others, 2008. Concurrent simulation and optimization models for mining planning, in: Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation. Winter Simulation Conference, pp. 759–767.

Fitch Ratings, agence de notation financière internationale, 2017, https://www.leconomiste.com/flash-infos/prix-des-phosphates-les-previsions-de-ficth-pour-l-ocp.

Fourie, H., 2016. Improvement in the overall efficiency of mining equipment: A case study. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 116, 275–281.

Frantin, E., (2012), Management : La démarche Lean Méthode, exemples, simulations.

Gholamnejad, J., Moosavi, E., 2012. A new mathematical programming model for long-term production scheduling considerating geological uncertainty. Journal of the Southen African Institue of Mining and Metallurgy, 112, 2, 77-81.

Giraud, P.N., 2017. Economie des phosphates

Goffé, B., 2013. Matière et énergie : stocks et cycles [en ligne]. Dans L'énergie à découvert. Sous la direction de R. Mosseri et C. Jeandel. CNRS Éditions : 67–69. Disponible à http://bip.cnrs-mrs.fr/bip06/pdf/130215_Energie_Synopsis.pdf

Goldsmith, P.L., 1966. The theoretical performance of a semi-continuous blending system. Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician) 16, 227–251.

Gourgand, M., 1984. Outils logiciels pour l'évaluation des performances des systèmes informatiques (PhD Thesis).

Gourgand, M., Kellert, P., 1991. Conception d'un environnement de modélisation des systèmes de production, in: Actes Du Troisieme Congres International de Génie Industriel, Tours, France. pp. 191–203.

Govinda Raj, M., Vardhan, H., Rao, Y.V., 2009. Production optimisation using simulation models in mines: a critical review. International Journal of Operational Research 6, 330–359.

Hammond, L.L. and Day, D.P., 1992. Phosphate rock standardization and product quality. In A.T. Bachik & A. Bidin, eds. Proceedings of a workshop on phosphate

sources for acid soils in the humid tropics of Asia, Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science, 73-89.

Hasle, P., 2014. Lean Production-An Evaluation of the Possibilities for an Employee Supportive Lean Practice: An Employee Supportive Lean Practice. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries 24, 40–53.

Hattingh, T.S., Keys, O.T., 2010. How applicable is industrial engineering in mining, in: International Platinum Conference Proceedings, 205–210.

Helman,J., 2012. Analysis of the potentials of adapting elements of Lean Methodology to the unstable conditions in the mining industry. AGH Journal of Mining and Geoengineering 151–157.

Hugon, M.A., Seibel, C., 1988. Recherches impliquées, Recherches action : Le cas de l'éducation, Bruxelles, De Bœck Université.

Hustrulid, W.A., McCarter, M.K., Van Zyl, D.J., 2000. Slope stability in surface mining. Litleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc.

Indrawati, S., Ridwansyah, M., 2015. Manufacturing Continuous Improvement Using Lean Six Sigma: An Iron Ores Industry Case Application. Procedia Manufacturing, Industrial Engineering and Service Science 2015, IESS 2015 4, 528–534.

Isaaks, E.H. and Srivastava R.M., 1989. Applied geostatistics, Oxford University Press, New York, USA.

Jia, Z., Ierapetritou, M., 2003. Mixed-integer linear programming model for gasoline blending and distribution scheduling. Industrial & Engineering Chemistry Research 42, 825–835.

Jonuzaj, S., Adjiman, C.S., 2017. Designing optimal mixtures using generalized disjunctive programming: Hull relaxations. Chemical Engineering Science 159, 106–130.

Journel, A.G. and Huidbregts C.J., Mining Geostatics, Academic Press, San Diego, USA, 1978.

Karmarkar, U.S., Rajaram, K., 2001. Grade selection and blending to optimize cost and quality. Operations Research 49, 271–280.

Kellert, P., Tchernev, N., Force, C., 1997. Object-oriented methodology for FMS modelling and simulation. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 10, 405–434.

Klippel, A.F., Petter, C.O., Antunes Jr., J.A.V., 2008b. Management Innovation, a way for mining companies to survive in a globalized world. Utilities Policy, European Regulatory Perspectives 16, 332–333.

Klippel, A.F., Petter, C.O., Valle Antunes, JR. J.A., (2008a), Lean management implementation in mining industries, DYNA 75, 81–89.

Knights, P.F. and Bonates, E.J.L., 1999, Application of discrete mine simulation modeling in South America, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environmental 13, 69–72.

Konyukh, V., Galiyev, S. and Li, Z.,1999, Mine simulation in Asia, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environmental 13, 57–67.

Kozan, E., Liu, S.Q., 2016. A new open-pit multi-stage mine production timetabling model for drilling, blasting and excavating operations. Mining Technology 125, 47–53.

Kumral, M., 2003. Application of chance-constrained programming based on multi-objective simulated annealing to solve a mineral blending problem. Engineering Optimization 35, 661–673 (2003)

Kumral, M., 2012. Production planning of mines: Optimisation of block sequencing and destination. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 26, 93–103.

Kumral, M., 2013. Optimizing ore–waste discrimination and block sequencing through simulated annealing. Applied Soft Computing 13, 3737–3744.

Kural, A., Özsoy, C., 2004. Identification and control of the raw material blending process in cement industry. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing 18, 427–442.

L'Heureux, G., Gamache, M., Soumis, F., 2013. Mixed integer programming model for short term planning in open-pit mines. Mining Technology 122, 101–109.

Lambert, W.B., Newman, A.M., 2014. Tailored Lagrangian relaxation for the open pit block sequencing problem. Annals of Operations Research 222, 419–438.

Lamghari, A., Dimitrakopoulos, R., Ferland, J.A., 2015. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. Journal of Global Optimization 63, 555–582.

Leite-Corthésy, R., Gamache, M., Baptiste, P., 2016, Validation d'un plan de production minier à court terme par simulation, 11th International Conference on

Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'16 August 22-24 Montréal, Québec, Canada, Innovation in Technology for performant Systems.

Lerchs, H and Grossman, I.F., 1965. Optimum Design of Open Pit Mines, Joint CORS and ORSA Conference, Transactions Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Montreal.

Lewin, K., 1946. Action Research and Minority Problems, Journal of Social Issues, 2, 1946, 34-46. Réédité in Lewin, K., Resolving Social Conflicts & Field Theory in Social Science, Washington: American Psychological Association, 1997, 143-152.

Liu, S.Q., Kozan, E., 2016. New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimisation problems. Expert Systems with Applications 43, 59–65.

Lööw, J., Johansson, J., 2015. An Overview of Lean Production and Its Application in Mining. Presented at the Aachen International Mining Symposia : Mineral resources and mine development RWTH Aachen University, Institute of Mining Engineering I, 121–136.

Mahapatra, S.S., Mohanty, S.R., 2007. Lean manufacturing in continuous process industry: an empirical study. Journal of Scientific and Industrial Research 66, 19.

Meagher, C., Dimitrakopoulos, R., Avis, D., 2014. Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem—a review. Journal of Mining Science 50, 508–526.

Meagher, C., Dimitrakopoulos, R., Vidal, V., 2014. A new approach to constrained open pit pushback design using dynamic cut-off grades. Journal of Mining Science 50, 733–744.

Melton, T., 2005. The benefits of lean manufacturing: what lean thinking has to offer the process industries. Chemical Engineering Research and Design 83, 662–673.

Montante, G., Coroneo, M., Paglianti, A., 2016. Blending of miscible liquids with different densities and viscosities in static mixers. Chemical Engineering Science 141, 250–260.

Moosavi, E., Gholamnejad, J., Ataee-pour, M., Khorram, E., 2014. A hybrid augmented Lagrangian multiplier method for the open pit mines long-term production scheduling problem optimization. Journal of Mining Science 50, 1047–1060.

Moreno, E., Rezakhah, M., Newman, A., Ferreira, F., 2016. Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems. European Journal of Operational Research.

Mottola, L., Scoble, M., Lipsett, G., 2011. Machine monitoring and automation as enablers of lean mining, in: Second International Future Mining Conference, NSW, 22–23.

Mousavi, A., Kozan, E., Liu, S.Q., 2014. Integrated approach to optimize open-pit mine block sequencing. Industrial engineering non-traditional applications in international settings 83–98.

Mousavi, A., Kozan, E., Liu, S.Q., 2016a. Open-pit block sequencing optimization: A mathematical model and solution technique. Engineering Optimization 48, 1932–1950.

Mousavi, A., Kozan, E., Liu, S.Q., 2016b. Comparative analysis of three metaheuristics for short-term open pit block sequencing. Journal of Heuristics 22, 301–329.

Muduli, K., Govindan, K., Barve, A., Geng, Y., 2012. Barriers to green supply chain management in Indian mining industries: a graph theoretic approach. Journal of Cleaner Production 47, 335–344.

Myburgh, C., Deb, K., 2010. Evolutionary algorithms in large-scale open pit mine scheduling, in: Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. ACM, pp. 1155–1162.

Newman, A.M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., Eurek, K., 2010. A review of operations research in mine planning. Interfaces 40, 222–245.

O'Connor, D., Turnham, D., 1991. Environmental management in developing countries: an overview. Development and International Co-operation 3, 75–100.

OCP Développement durable, 2014 Rapport développementdurable. Technical report, OCP.

Oddsdottir, T.A., Grunow, M., Akkerman, R., 2013. Procurement planning in oil refining industries considering blending operations. Computers & Chemical Engineering 58, 1–13.

Pagès, J., 2013. Analyse factorielle multiple avec R. EDP sciences.

Panagiotou, G. N., 1999, Discrete mine system simulation in Europe, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 13, 43-46.

Porter Michael, 1999, La domination globale au niveau des coûts », dans : Choix stratégiques et concurrence. Techniques d'analyse des secteurs et de la concurrence dans l'industrie (1982), Économica , 38-39.

Poulard F., Daupley X., Didier C., Pokryska Z., D'Hugues P., Charles N., Dupuy J.-J., Save M., 2017. Exploitation minière et traitement des minerais Tome 6.

Radnor, Z., 2000. Changing to a lean organisation: the case of a chemicals company. International Journal of Manufacturing Technology and Management 1, 444–454.

Raghu, T.S., Vinze, A., 2007. A business process context for Knowledge Management. Decision support systems 43, 1062–1079.

Rahani, A.R., Al-Ashraf, M., 2012. Production flow analysis through value stream mapping: a lean manufacturing process case study. Procedia Engineering 41, 1727–1734.

Raj, M.G., Vardhan, H. and Rao, Y.V., 2009, Production optimisation using simulation models in mines: a critical review, International Journal of Operational Research 6, 330–359.

Rasche, T. and Sturgul, J. R., 1991, A simulation to assist a small mine: a case study, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 5, 123–128.

Rosienkiewicz, M., 2012. Idea of adaptation value stream mapping method to the conditions of the mining industry. AGH Journal of Mining and Geoengineering 36, 301–307.

Sarramia, D., 2002. ASCI-mi: une méthodologie de modélisation multiple et incrémentielle (PhD Thesis). Clermont-Ferrand 2.

Schumpeter, J.A., (1976), Capitalism, Socialism and Democracy, Harper & Brothers, New York.

Steinberg, J. g., De Tomi, G., 2010. Lean mining: principles for modelling and improving processes of mineral value chains. International Journal of Logistics Systems and Management 6, 279–298.

Steuer, R.E., 1984. Sausage blending using multiple objective linear programming. Management Science 30, 1376–1384.

Stiglitz, J.E., Sen, A.K., Fitoussi, J.-P., 2009. Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social.

Stokes, J.R., Tozer, P.R., 2006. Optimal feed mill blending. Review of agricultural economics 28, 543–552.

Sturgul, J. R. and EHarrison, J., 1987, Simulation models for surface mines, International Journal of Surface Mining, Balkema, (I), 187–189.

Sturgul, J. R. and Z. Li, 1997, New developments in simulation technology and applications in the minerals industry, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 11, 159–162.

Sturgul, J. R., 1999, Discrete mine system simulation in the United States, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 13, 37–41.

Tarshizi, E., Sturgul, J., Ibarra, V., Taylor, D., 2015, Simulation and animation model to boost mining efficiency and enviro-friendly in multi-pit operations, International Journal of Mining Science and Technology 25, 671-674.

Tchernev, N., (1997), Modélisation du processu logistique dans les systems flexibles de production. Thèse de doctorat, Université de Clermont Ferrand II (France).

Tenkorang, F., Lowenberg-DeBoer, J., 2009. Forecasting Long-Term Global Fertilizer Demand. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 83, 47-233.

Turner, R. J., 1999, Simulation in the mining industry of South Africa, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 13, 47–56.

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) & IFDC. 1998. Fertilizer manual. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 615.

Vagenas, N., 1999, Applications of discrete-event simulation in Canadian mining operations in the nineties, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 13, 77–78.

Van Kauwenbergh, S.J., Stewart, M., Mikkelsen, R., 2013. World reserves of phosphate rock. A dynamic and unfolding story. Better Crops 97, 18–20.

Walsh, S. AO, 2012. http://shinkamanagement.com/rio-tinto-lean-management-mining/.

Whittle, J., 1999. A decade of open pit mine planning and optimization-the craft of turning algorithms into packages.

Wijaya, A., Kumar, R., Kumar, U., 2009. Implementing lean principle into mining industry issues and challenges, in: International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection.

Wikipédia https://fr.wikipedia.org/wiki/Phosphate.

Williams, K.B., Haley, K.B., 1959. A practical application of linear programming in the mining industry. Journal of the Operational Research Society 10, 131–137.

Womack, J.P., Jones, D.T., (1996), Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation.

Yingling, J.C., Detty, R.B., Sottile, J., Joseph, 2000. Lean Manufacturing Principles and their Applicability to the Mining Industry. Mineral Resources Engineering 9, 215-238.

Yoon, W.B., Park, J.W., Kim, B.Y., 1997. Linear programming in blending various components of surimi seafood. Journal of food science 62, 561–564.

Yuriy, G. and Vayenas, N., 2008, Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model base on genetic algorithms, International Journal of Mining, Reclamation and Environment 22, 70–83.

Zhang, R., Lu, J., Zhang, G., 2011. A knowledge-based multi-role decision support system for ore blending cost optimization of blast furnaces. European Journal of Operational Research 215, 194–203.

ANNEXE

ANALYSE DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DE LA MINE DE BEN GUERIR

1 INTRODUCTION

Le secteur minier est un secteur industriel qui consomme beaucoup de ressources énergétiques et matérielles (notamment de l'eau, l'électricité, gaz, fuel…). Dans un contexte global de changement climatique et d'épuisement des ressources fossiles, il est primordial pour chaque entreprise minière d'analyser son impact sur l'environnement, ceci dans le but d'évoluer vers une production plus verte. Giraud (2017) distingue trois domaines où s'impose une gestion environnementale « responsable » : la réhabilitation de terrains miniers, la gestion optimale de l'eau et de l'énergie, la réduction des rejets aux niveaux exigés par la réglementation publique en vigueur et même au-delà pour les firmes les plus soucieuses de leur « image » à l'égard de leurs « parties prenantes ». Les techniques sont bien connues et en progression constante : réaménagement des terrains après exploitation par nivelage, reconstitution du sol et plantations ; usage d'eau urbaine ou industrielle recyclée et recyclage de l'eau utilisée ; écologie industrielle, dont la cogénération sur les sites chimiques ; filtration de rejets liquides et gazeux ; aires de stockage protégées, etc.… c'est une question d'investissement et de gestion optimale des opérations, donc aussi de formation des opérateurs. Les compagnies minières et chimiques sont depuis de longues années sous observation attentive des organisations de défense de l'environnement, qui ont fait pression pour que des investissements conséquents dans ces domaines et en rendent compte dans leur communication.

C'est pour cette raison que nous avons proposé d'inclure dans la démarche Lean Mining l'aspect environnemental, qui devient ainsi un « Lean Mining Responsable ». L'objet de cette nouvelle approche est de pouvoir répondre à la fois : 1. aux exigences de l'industrie minière visant à augmenter sa productivité, 2. aux principes de Lean Management visant à améliorer l'efficacité et l'efficience, 3. aux exigences environnementales visant à réduire la consommation énergétique et l'émission des gaz à effet de serre. C'est dans ce contexte que nous proposons l'approche du Lean Mining Responsable visant à répondre aux exigences citées précédemment et permettant à l'industrie minière d'être plus responsable vis-à-vis des générations futures surtout que la ressource minérale à extraire est non renouvelable.

Comme l'OCP est une entreprise qui s'intéresse énormément à cet aspect, nous avons traité cette problématique en collaboration avec Mlle. Serena Delgado étudiante en 2ème année de l'école des Mines de Paris dans le cadre de son projet de stage et nous avons travaillé sur la mine de Ben Guerir comme étant notre terrain d'expérimentation. L'étude qui a été menée dans ce sens sera présentée dans cette annexe (Delgado 2016) et se focalisera surtout sur l'aspect consommation énergétique mais cela n'empêche d'étendre la démarche pour inclure tous les aspects environnementaux. Dans cette optique, une cartographie des performances énergétiques des équipements de la mine de Ben Guérir a été réalisée.

La démarche suivie peut se décomposer en trois axes. D'un côté une recherche bibliographique sera entamée pour comprendre la notion de développement durable et comment elle est mise en œuvre dans les entreprises. D'un autre côté une observation sur le site de la mine de la mesure des performances existante ainsi qu'une collecte de données.

Et enfin, une exploitation de ces données par un calcul d'un indicateur de durabilité, puis une analyse des composantes principales (ACP) qui a permis de dégager les profils (multiples) des équipements de la mine. L'étude s'est intéressée aux équipements d'extraction, de transport, de premier traitement d'enrichissement (épierrage et criblage), jusqu'au chargement du phosphate dans des wagons pour expédition vers les sites de Youssoufia et Safi.

Les résultats de cette ACP - entre autres -pointent vers les équipements les moins "durables" selon les variables choisies. En effet, s'il n'y a pas d'alternative à ces équipements, l'extraction est impossible. L'ACP fournit une vision « absolue » pointant certains équipements, alors que l'amélioration passe par une vision de bilan différentiel. On trouve parmi les équipements du chantier, les camions à grande capacité, les chargeuses et les bulldozers D11 ; parmi les sondeuses la Sandvik et la SKF ; et parmi les installations fixes les stations d'épierrage et de criblage ainsi que la roue-pelle Krupp.

On peut alors se servir des résultats pour se focaliser sur ces types d'équipements dans le but d'améliorer les performances énergétiques de la mine : quelles sont les causes de ces mauvaises durabilités? Quelles potentielles solutions pour diminuer l'impact environnemental de ces équipements ? Jusqu'aux installations fixes, la chaîne cinématique de la mine n'est pas tout à fait linéaire (on a un degré de liberté sur le type d'équipement à utiliser pour chaque opération), on peut essayer de privilégier

l'utilisation de certains équipements catégorisés plus durables. Ou lorsque l'utilisation d'un équipement est inéluctable (comme par exemple la roue-pelle Krupp), essayer de minimiser sa consommation d'énergie en optimisant son utilisation.

2 BIBLIOGRAPHIE SUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE EN GENERAL ET A LA MINE EN PARTICULIER

Le développement durable est défini en économie comme étant le développement qui permet de répondre aux besoins actuels sans empêcher les générations à venir d'en faire de même. Selon le contexte marketing, il peut être défini comme une politique visant à conserver une croissance permanente tout en satisfaisant les rapports sociaux ainsi que l'environnement. Elle s'applique aux entreprises mais aussi aux Etats. La commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU (Organisation des Nations Unies) appelée « Commission Brundtland » a défini le développement durable en 1987 par la : « un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Deux concepts sont sous-jacents dans le développement durable : le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accrocher la plus grande priorité ; et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir ».
Nous essayerons à travers cette section de répondre aux questions suivantes : Qu'est-ce que le développement durable et comment est-il utilisé dans les différentes sphères de la société ? Qu'en est-il du secteur minier et de l'OCP en particulier ? Qu'est-ce que le Lean Management a à apporter au développement durable dans une entreprise ? Toutes ces questions ont fait l'objet d'une recherche dans la littérature scientifique.

2.1 À travers l'industrie et la société

De nombreuses publications s'accordent sur le principe de développement durable et de la "Triple Bottom Line" associée (environnementale, économique, sociale). Un grand nombre d'indicateurs et de méthodes existent cependant pour évaluer la durabilité à tous les niveaux de la société (état, ville, entreprise, produit…). Stiglitz *et al.* (2010) donnent une idée des principaux indicateurs mis en œuvre à travers le monde.

Le rapport souligne la diversité des méthodologies employées même pour le calcul d'un seul indicateur.

Tableau 37. Indicateurs mentionnés par Stiglitz *et al.* (2010)

Type	Indicateur
Indicateurs génériques adaptables	Tableau de bord Indices composites
PIB ajustés	Indice de bien-être économique soutenable Indicateur de progrès véritable PIB vert
Indicateurs de sous-investissement ou de surconsommation	Epargne nette ajustée Empreinte écologique Empreinte carbone

La plupart de ces indicateurs de durabilité prennent en compte plusieurs aspects distincts du développement durable en plus de l'aspect environnemental. De plus, ils sont aussi généralement conçus pour rendre compte de l'activité d'un pays entier. Dans le cadre du projet Lean Mining Durable, comme on ne s'intéresse qu'à l'aspect consommation énergétique, les indicateurs compatibles sont l'empreinte carbone et les indicateurs les plus adaptables tels que les tableaux de bord et les indices composites.

La recherche d'articles scientifiques sur le développement durable dans le moteur de recherche Web of Science a également permis de constituer une liste de méthodes et d'indicateurs employés par divers secteur de l'industrie, par les développeurs urbains et à l'échelle nationale.

Tableau 38. Tableaux des indicateurs et méthodes utilisées pour le développement durable dans les articles issus de la recherche bibliographique

Indicateur	Secteurs d'application trouvés	Objectif
Consommation spécifique d'énergie	Industrie du ciment	Analyse de l'utilisation d'énergie
Empreinte carbone	Industrie du ciment, développement urbain, échelle nationale	Mesure de la performance environnementale, identifier les facteurs influençant les émissions
Empreinte écologique	Industrie du ciment, échelle nationale	Mesure de l'impact environnemental d'une activité
Émergie	Industrie du ciment	Mesure de l'impact environnemental d'une activité
Indice de vulnérabilité environnementale	Échelle nationale	Mesure de l'impact environnemental d'une activité
Indice de performance environnementale	Échelle nationale	Mesure de l'impact environnemental d'une activité

Happy planet index	Échelle nationale	Mesure de l'impact environnemental d'une activité
Net economic welfare indicator	Secteur pétrolier	Mesure de l'impact environnemental d'une activité
Épargne nette ajustée &	Échelle nationale	Indicateur d'une économie (ou d'une activité) soutenable
Overall Environmental Equipment Efficiency	Usine de production	Application d'un management Lean & green
Full cost accounting	Industrie automobile	Outil d'aide à la décision
Life cycle assessment	Industrie du ciment	Mesure de l'impact environnemental d'une activité
Data envelopment analysis	Secteur pétrolier, développement urbain	Évaluation de la performance (environnementale) d'unités de production
Modèle STIRPAT	Secteur de l'énergie	Analyse de la contribution de différents facteurs aux émissions
Décomposition d'indices agrégés	Industrie du ciment	Analyse de la contribution de différents facteurs aux émissions
VSM durable	Usine de production	Visualisation des indicateurs de développement durable relatifs à chaque poste de travail

Tout comme les indicateurs présentés par le rapport de la commission, la plupart de ces indicateurs prennent en compte les trois aspects principaux du développement durable (économique, environnemental et social) ; seules l'empreinte carbone et la consommation spécifique d'énergie ne s'occupent que de l'énergie. C'est aussi le cas de la méthode de full cost accounting, qui s'attache à la Triple Bottom Line.

Une autre distinction qui différencie ces indicateurs et méthodes d'analyse est l'unité employée :

- Le $kgCO_2eq$ ou la surface équivalente pour les différentes empreintes.
- L'unité monétaire. Les résultats ont alors l'avantage de pouvoir être comparés à des données purement économiques. On donne une valeur à l'impact de notre activité (notamment à travers le Full Cost Accounting).
- L'absence de dimension.

De plus, certaines de ces méthodes analysent l'évolution d'une activité dans le temps (Data envelopment analysis, modèle STIRPAT, décomposition). Cette temporalité ne va pas être privilégiée par l'étude qui suit, car seules les données de fonctionnement de la mine sur une année ont été utilisées.

Certaines méthodes utilisent enfin des outils du Lean Management (l'OEEE, la VSM durable). On s'est efforcé de les mettre en avant et d'essayer de les incorporer à l'analyse, car elles sont compatibles avec les travaux du projet de Lean Mining Durable.

2.2 En entreprise

D'après Bourges *et al.* (2015) la comptabilité carbone d'une activité (ou de manière plus générale la mesure de son impact environnemental) intervient dans l'entreprise pour répondre à deux objectifs très différents. D'une part, il est de plus en plus répandu pour une entreprise de communiquer sur son bilan carbone et son impact environnemental à travers un Rapport Développement Durable. C'est d'ailleurs le cas de l'OCP (OCP Développement durable. Rapport de développement durable. Technical report, OCP 2014). Celui-ci joue un rôle croissant dans l'image publique d'une entreprise. Il permet de plus d'assurer la transparence de ses activités. Il faut toutefois être vigilant dans la communication de la méthode employée, des incertitudes et des allocations des émissions.

D'autre part, le bilan carbone peut également être un outil d'aide à la décision. Sous cette forme, l'exhaustivité des sources et la précision des mesures ne sont pas primordiales : le but est d'obtenir un ordre de grandeur fiable sur lequel baser sa décision. Deux objectifs distincts qui conduisent l'entreprise à avoir une comptabilité carbone externe (*reporting*) et une comptabilité carbone interne (action).

La démarche carbone préconisée pour une entreprise est alors la suivante :

- Concevoir des outils adaptés aux besoins de l'entreprise et les expérimenter dans le cadre de projets pilotes pour en tester la robustesse et obtenir l'adhésion des collaborateurs,
- Réaliser un *reporting* externe des émissions de GES à partir (ou non) des émissions internes comptabilisées,
- Concevoir un dispositif stratégique à partir de ces outils internes pour être en mesure d'effectivement agir à la réduction des émissions de GES et d'identifier les stratégies bas carbone
- Réussir à faire vivre le dispositif dans la durée pour accompagner l'entreprise dans une phase de transition bas carbone.

2.3 Dans les industries chimiques et minières

Nous pouvons distinguer des enjeux environnementaux bien particuliers au sein des industries minières et chimiques nécessitant une gestion « plus responsable ». Les domaines les plus importants où s’impose une gestion environnementale peuvent se

distinguer en trois (Giraud 2017) : la réhabilitation de terrains miniers, la gestion optimale de l'eau et de l'énergie, la réduction des rejets aux niveaux exigés par la réglementation publique. Les techniques utilisées pour répondre à ces exigences environnementales sont bien connues et en progression constante : la réhabilitation consiste à réaménager les terrains après leur exploitation afin de retrouver sa structure et forme initiale, la reconstitution du sol et plantations selon la nature et le climat de la zone exploitée ; usage d'eau urbaine ou industrielle recyclée et recyclage de l'eau utilisée ; écologie industrielle, dont la cogénération sur les sites chimiques ; filtration de rejets liquides et gazeux ; aires de stockage protégées, etc.… la mise en œuvre et la réussite de ces techniques sont liées principalement à des investissements réalisés par l'entreprise et de gestion optimale des opérations sans oublier la formation et l'engagement des opérateurs. Les compagnies minières et chimiques sont depuis de longues années sous observation attentive des organisations de défense de l'environnement, qui ont appliqué une pression accrue pour que des investissements conséquents soient réalisés dans ces domaines et en rendent compte dans leur communication.

2.4 À OCP-SA

L'OCP effectue un reporting environnemental annuel publié sur internet (OCP Développement durable. Rapport de développement durable. Technical report, OCP 2014). Celui-ci s'apparente à un tableau de bord, car il comporte de nombreux indicateurs environnementaux, économiques et sociaux. La dimension de consommation énergétique est ainsi présente dans le rapport à travers l'empreinte carbone et les émissions de gaz à effet de serre évitées par les diverses mesures de l'entreprise (ex : le slurry pipeline de l'axe Nord).

En interne, un monitoring environnemental a été mis en place. Il comprend en plus du calcul de l'empreinte carbone, la qualité de l'air en sortie des cheminées, l'empreinte eau et la qualité des eaux de process en entrée et en sortie de lignes, la quantité de déchets générés, traités et éliminés, la qualité des sols et les effluents liquides. Tous ces paramètres sont mesurés à diverses fréquences (annuelle, mensuelle ou trimestrielle). L'information prend donc aussi en interne la forme d'un tableau de bord d'indicateurs et de relevés de différents domaines environnementaux.

3 DONNÉES DE FONCTIONNEMENT DE LA MINE DE BEN GUERIR

Les données utilisées pour cette analyse sont les données mensuelles des équipements de la mine de Ben guerir pour l'année 2015. Les équipements concernés sont ceux qui appartiennent à la chaîne cinématique de la mine, de l'extraction sur le chantier à l'expédition vers les sites de Youssoufia et Safi. Celle-ci est mise en image sur le schéma de la Figure 65.

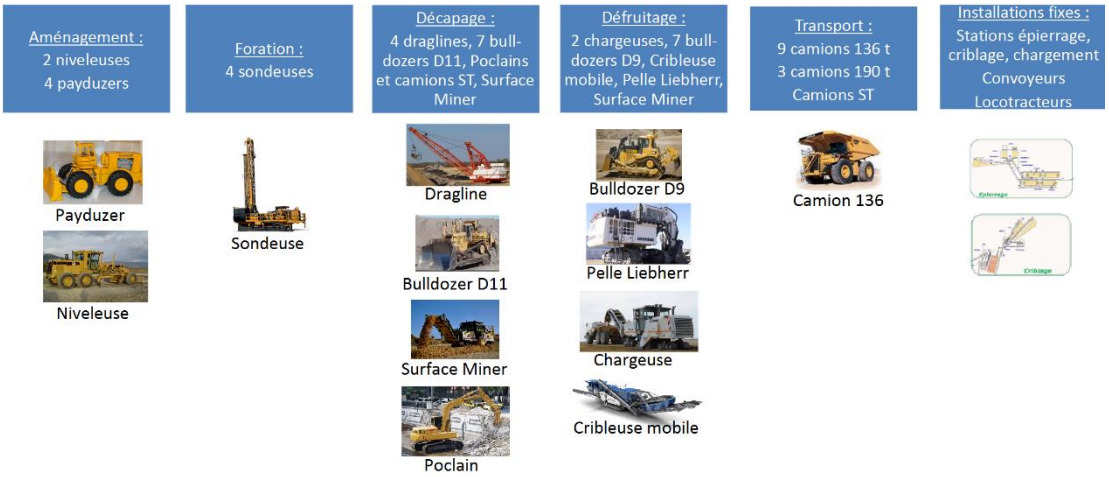


Figure 65. Les équipements impliqués dans l'étude.

3.1 Données des équipements OCP

Les données permettent de calculer les indicateurs de performance et de suivre la production et la consommation d'énergie. Elles font l'objet de mesures régulières par divers opérateurs sur le chantier.

Les heures de marche des équipements sont relevées à chaque poste, sur un rapport journalier pour chaque équipement. L'opérateur y consigne la valeur du compteur des heures de marche de l'équipement au début et à la fin de son poste, et effectue la répartition des 8 heures de son poste entre plusieurs activités :

- arrêts extérieurs (par exemple dus à une grève ou à une coupure de courant)
- arrêts matériels (tous les arrêts relatifs aux pannes ou maintenances)
- exploitation.

Les informations contenues dans ces rapports sont ensuite collectées et synthétisées par le service Performance (basée sur le carreau de la mine) et sont à l'origine du calcul des indicateurs de performance OCP que sont le taux de disponibilité (TD) et le taux d'utilisation (TU). Le taux de disponibilité est la fraction du temps où l'équipement considéré est disponible (c'est-à-dire où il ne subit pas d'arrêt matériel (AM)) sur les

heures total (HT). Le taux d'utilisation est la fraction du temps disponible où l'équipement considéré est productif (HTP).

$$TD = (HT - AM) / HT \text{ et } TU = HTP / (HT - AM)$$

Le produit du TD et du TU est l'OEE, Overall Equipment Efficiency. En général, l'OEE prend en compte trois aspects de la performance d'un équipement, à savoir la disponibilité, la performance et la qualité (Domingo et Aguado 2015). L'indicateur calculé par l'OCP ne prend en compte que l'aspect disponibilité de l'équipement.

$$OEE = HTP / HT = TD \times TU$$

L'incertitude de mesure des heures de marche est l'incertitude du compteur relevé au début et à la fin de chaque poste. La répartition du temps sur le poste est évaluée par l'opérateur, ce qui peut conduire à des approximations et des arrondis (la seule contrainte étant d'égaler les heures de marche données par le compteur).

La consommation des équipements gasoil du chantier est mesurée à chaque passage à la pompe par le volume de gasoil versé dans le réservoir. L'incertitude de mesure correspond donc à la précision du compteur de la station-service (au centilitre près). La consommation de chaque équipement est ensuite consignée dans un rapport mensuel, ainsi que les heures de marche. Cela permet à l'OCP de calculer un autre indicateur : la consommation spécifique qui s'exprime en L/h.

consommation spécifique= consommation de gasoil/ HM

La consommation des équipements électriques du site (et de la cité OCP) est mesurée par un compteur numérique qui permet au fournisseur de l'OCP de lui facturer l'électricité. Des compteurs de consommation électrique sont aussi installés au niveau de chaque poste fixe et sur chaque engin électrique du chantier. Les compteurs actuels sont mécaniques et de classe 0,5, mais ils sont en train d'être remplacés par des compteurs numériques de classe 0,2s (c'est-à-dire beaucoup plus précis). Le nouveau système comprendra une acquisition des données automatisée. Un réseau Ethernet permettra de les centraliser dans une base de données. À l'heure actuelle les relevés se font à la main. Ceci permettra à l'OCP d'accéder à des données plus précises, ainsi que des informations sur d'éventuelles anomalies sur le réseau. La classe 0,5 signifie que l'erreur de courant est de 0,5%. Pour les appareils de mesure de classe 0,2s, la précision est très importante pour des valeurs de courant très inférieures au courant nominal.

La consommation spécifique des équipements électriques et installations fixes (cette fois en kWh/h) est aussi calculée par l'OCP.

Les unités d'œuvre (UO) sont la mesure de la production des équipements et des opérations. Elles prennent plusieurs unités et sont obtenues par diverses méthodes de mesure.

- Pour la foration, la production est mesurée par le nombre de mètres-linéaires (ml) forés. La mesure est effectuée par les opérateurs à chaque fin de poste sur une sondeuse,
- Pour le décapage, la production est mesurée par le nombre de m^3 de stérile décapés, et pour le défruitage par le nombre de m^3 de phosphate déplacés vers le stock tout-venant ou l'épierrage. Ces mesures sont réalisées par les géomètres de manière journalière grâce à des GPS et un logiciel qui traite les données pour convertir les positions des GPS d'abord en surfaces, puis en volume défruité ou décapé (calculables dès qu'on a deux mesures de surface consécutives). La précision des mesures de position par les GPS est de 2 cm,
- Les unités d'œuvre de l'épierrage et du criblage sont déduites des variations mensuelles des stocks, elles aussi mesurées par les géomètres, qui doivent être égales au tonnage expédié. Les unités d'œuvre de l'épierrage et du criblage sont données dans plusieurs unités : le m^3 de phosphate défruité, la tonne humide épierrée (THE), la tonne humide criblée (THC), voire la tonne sèche et marchande (TSM). Pour chaque profil de phosphate, il existe des coefficients de proportionnalité reliant ces unités,
- Les opérations d'aménagement sur le chantier ne font pas l'objet de mesure des UO (ni la partie du défruitage effectuée par les bulldozers D9).

3.2 Cas de la sous-traitance

Les activités de sous-traitance sont de trois types à la mine de Ben Guérir :

- Le box-cut, qui est l'opération préliminaire à l'exploitation d'un panneau. Il consiste à creuser une première tranchée qui sépare en deux le panneau et à exploiter le phosphate de cette tranchée,
- Le décapage par poclain (ce sont des pelleteuses) et camions 36 tonnes. Il intervient après le décapage par bulldozer (où le stérile est poussé dans la tranchée voisine précédemment exploitée) et le décapage par dragline (lorsqu'il n'est plus possible de pousser le stérile car le niveau de la tranchée exploitée a rattrapé le niveau de la tranchée voisine). Lorsque la hauteur de déversement

des draglines ne permet plus de déplacer le stérile de cette façon, ce sont des poclain et des camions qui descendent dans la tranchée pour charger et déplacer le stérile dans un stock tampon,

- Le transport de phosphate lors du défruitage. Les camions de l'OCP ont des capacités importantes par rapport aux camions classiques et aux camions de sous-traitance (190 tonnes et 136 tonnes) et de ce fait ont une consommation spécifique importante. Ils sont spécialisés dans le transport de phosphate sur de petites distances (typiquement d < 10 km). Les camions 36 tonnes de la sous-traitance réalisent le transport du phosphate depuis les tranchées les plus éloignées des installations fixes et du stock tout-venant sur des distances qui peuvent aller jusqu'à plus de 30 km.

Le contrat de l'OCP avec l'entreprise de sous-traitance concerne le tonnage réalisé et la distance parcourue par les camions. De ce fait, les camions pleins sont pesés sur des balance de précision, et le tonnage réalisé est classé par tranche de distance parcourue de manière mensuelle. Cependant, la consommation de carburant des poclain et des camions, ainsi que leurs heures de marche, ne sont pas mesurés par l'OCP.

Pour compléter les données (notamment concernant les activités de sous-traitance), un certain nombre d'extrapolations ont été effectuées.

3.3 Compléter le jeu de données

Pour pouvoir prendre en compte l'impact environnemental de l'activité de sous-traitance, il a fallu estimer la consommation des camions 36 tonnes en se basant sur les unités d'œuvre réalisées en fonction de la distance. La revue *Transport* (Chamay 2014) donnne une consommation spécifique pour un véhicule gasoil de 40 tonnes (ce qui correspond à peu près au gabarit des camions de sous-traitance qui ont une capacité de 36 tonnes) roulant à 90 km/h de 28,5 L/100 km. De cette valeur on déduit la consommation des camions par la formule :

$$consommation_{camions} = \frac{UO \times \mu_{gasoil}}{36} \times 2d \times consommationspécifique$$

Avec :

- $consommation_{camions}$ en L,

- d : distance en km entre le chargement et le déchargement (c'est une fourchette de distances qui est donnée par l'OCP, on prend la moyenne des valeurs),
- UO : le nombre d'UO réalisées pour cette fourchette de distances en m^3,
- μ_{gasoil} =840g/L (d'après la revue *Transport*).

De la même manière, on estime le nombre d'heures de marche par la durée du trajet, en se servant de la vitesse limite des camions de sous-traitance sur le chantier (30 km/h).

$$HM_{camions} = \frac{UO \times \mu_{gasoil}}{36} \times \frac{2d}{vitesse\,\lim ite}$$

Les camions de l'OCP sont de deux types : 136 tonnes et 190 tonnes. Cependant, les unités d'œuvre du transport ne séparent pas le volume de phosphate transporté par les 136 tonnes et les 190 tonnes. En supposant que les camions roulent tous à la même vitesse, la répartition des UO entre 136 et 190 tonnes dépend du temps d'utilisation de chaque type de camions et de sa capacité. Sachant que le chantier compte 3 camions de 190 tonnes et 9 camions de 136 tonnes dédiés au transport de phosphate, on en déduit une estimation des UO pour chaque type de camion ;

$$UO_{136tonnes} = \frac{9 \times 136 \times OEE_{136tonnes}}{3 \times 190 \times OEE_{190tonnes} + 9 \times 136 \times OEE_{136tonnes}}$$

$$UO_{190tonnes} = \frac{3 \times 190 \times OEE_{190tonnes}}{3 \times 190 \times OEE_{190tonnes} + 9 \times 136 \times OEE_{136tonnes}}$$

3.4 Émissions de gaz à effet de serre

Deux sources d'énergie différentes sont utilisées à la mine de Ben Guerir :

- L'électricité pour les installations fixes, les draglines et deux sondeuses (la PV1 et la 45R). La consommation d'énergie est mesurée en kWh.
- Le gasoil pour le reste des équipements de chantier. La consommation d'énergie est mesurée en L de carburant consommé.

Un moyen d'uniformiser la mesure de la consommation d'énergie est de la mesurer en termes d'émissions de gaz à effet de serre rejetés. On peut aussi convertir la consommation de gasoil en kWh grâce au pouvoir calorifique inférieur mais les résultats ne sont pas comparables avec la consommation d'électricité (pas les mêmes ordres de grandeur).

Pour convertir la consommation énergétique en émissions de gaz à effet de serre, il faut la multiplier par le facteur d'émission correspondant. N'ayant pas eu accès à ceux utilisés dans les bilans carbone de l'OCP, ce sont des facteurs d'émissions provenant d'autres sources qui ont été utilisées (l'ADEME est l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie).

Le mix électrique de chaque pays, et donc le facteur d'émissions de l'électricité, est différent ; c'est pourquoi il était important de se servir d'un facteur d'émissions portant sur le Maroc. Le gasoil peut aussi avoir un facteur d'émissions différent selon le pays (par exemple en fonction de la distance que le pétrole a parcourue pour arriver dans le pays, et les techniques de raffinage utilisées). Cependant, les recherches effectuées n'ont pas été fructueuses, c'est pourquoi le facteur donné par l'ADEME - le facteur français, donc -a été utilisé. On a donc dans une première approche considérée que la différence des facteurs français et marocain n'est pas significative pour le gasoil.

Tableau 39. Facteurs d'émission utilisés.

Source d'énergie	Facteur d'émission	Unité	Source
Électricité	0,59	$KgCO_{2eq}/kWh$	Ministère de l'énergie et des mines, royaume du Maroc
Gasoil	3,25	$KgCO_{2eq}/L$	Base de données de l'ADEME

Ainsi on peut comparer les dépenses énergétiques provenant des différentes sources.

4 ANALYSE DES DONNEES

4.1 Un indicateur de durabilité

4.1.1 Un facteur d'impact environnemental dans l'OEE

Le Lean Management est une théorie de gestion de la production développée par Toyota dans la seconde moitié du XXe siècle. Il possède de nombreux outils qui permettent de rendre une chaîne de production plus efficace et efficiente : la philosophie du juste à temps (minimiser les stocks en se montrant plus flexibles et en

produisant en fonction de la demande), la minimisation des actions de non-valeur ajoutée… c'est aussi une philosophie de l'entreprise.

Le Lean Management est souvent l'occasion pour l'entreprise d'essayer de maximiser l'OEE, ou *Overall Equipment Efficiency*. De nombreuses études de cas existent dans la littérature (par exemple Badiger *et al*. 2008) y compris dans le secteur minier (Fourie 2016). Domingo et Aguado 2015 proposent une étude de cas d'une usine de fabrication de tubes, où l'OEE comporte en plus un facteur environnemental. L'étude s'efforce de maximiser l'OEE des équipements en utilisant des méthodes du Lean Management. L'OEE et l'OEEE (pour *Overal Environmental Equipment Efficiency*) sont calculés sur toute la chaîne de production à l'état initial et à l'état final (à la fin de l'étude). L'article conclu que la mise en place de pratiques Lean dans l'usine fait évoluer les deux indicateurs dans le même sens. Dans le cas de cette usine du moins, Lean et Green Management sont compatibles.

L'OEE comporte trois facteurs relatifs à l'utilisation des équipements :

- La disponibilité, qui représente la proportion du temps total où l'équipement considéré est opérationnel et en production,
- La performance, qui fait le rapport entre la production réelle et théorique,
- La qualité, qui représente la proportion de bonnes pièces produites par rapport à la production totale.

L'indicateur de durabilité proposé est défini de la manière suivante :

$$durabilité = 1 - \frac{impact\ environemmental\ actuel\ du\ poste\ de\ travail}{impact\ environnemental\ initial\ de\ toute\ la\ chaîne\ de\ production}$$

L'impact environnemental est un indicateur environnemental à choisir. L'indicateur obtenu est compris entre 0 et 1, et est d'autant plus élevé que l'impact environnemental du poste de travail considéré est faible. Chercher à optimiser cet indicateur correspond donc à le maximiser, tout comme les trois autres composantes de l'OEE.

De plus, le fait d'utiliser l'impact environnemental initial de la chaîne de production au dénominateur permet d'établir une référence et de visualiser facilement l'amélioration réalisée.

L'OCP possède déjà un indicateur appelé OEE, mais celui-ci ne prend en compte que la disponibilité des équipements.

4.1.2 Adaptation à la chaîne de production de la mine

D'une part, notre étude concerne les performances énergétiques de la mine, ainsi il semble pertinent de prendre en compte la consommation énergétique dans l'indicateur d'impact environnemental. Pour uniformiser l'unité de mesure de cette consommation, celle-ci est convertie en émissions de gaz à effet de serre.

D'autre part, étant donné la diversité des profils d'utilisation -et donc de consommation -des équipements (surtout sur le chantier) choisir les émissions de gaz à effet de serre comme impact environnemental aurait pour conséquence de diluer l'impact des équipements les moins utilisés. Par exemple, la pelle Liebherr a une consommation spécifique moyenne très élevée sur l'année 2015 (de l'ordre de 150 L/h), mais en volume d'émissions elle se situe parmi les équipements les moins émetteurs car elle est très peu utilisée. Ainsi, il semble plus intéressant de prendre les "émissions spécifiques", en $kgCO_2eq/h$. Le numérateur est en fait l'impact environnemental de l'équipement, et pas du poste de travail.

\par Pour évaluer l'impact environnemental total du chantier, on calcule l'impact environnemental (les émissions spécifiques) de chaque opération de la chaîne : l'aménagement, la foration, le décapage, le défruitage et le transport.

Pour cela, on somme les émissions de gaz à effet de serre de tous les équipements concernés par une opération, et on divise par la somme des heures de marche de ces équipements. Par exemple, pour le décapage, on aura (les indices correspondent aux noms d'équipements impliqués dans le décapage) :

$$impact_{décapage} = \frac{ém_{7500} + ém_{P\&H} + ém_{D11} + ém_{SM_décapage} + ém_{ST_décapage}}{HM_{7500} + HM_{P\&H} + HM_{D11} + HM_{SM_décapage} + HM_{ST_décapage}}$$

On fait donc la somme des impacts de chaque opération pour obtenir l'impact environnemental total du chantier. L'impact environnemental total des installations fixes est simplement la somme des émissions spécifiques de chaque équipement (une opération est réalisée par un équipement à partir des installations fixes).

On obtient la durabilité mensuelle moyenne sur l'année 2015 pour chaque équipement (y compris ceux dont l'OEE n'est pas mesuré par l'OCP -niveleuses, paydozers et D9 sur le chantier et tous les équipements sauf la trémie épierrage et la station de criblage sur les installations fixes).

L'objectif de l'indicateur de durabilité est d'être incorporé à l'OEE pour évaluer les conséquences d'une politique environnementale (ou Lean) au sein de l'entreprise. Nous

disposons ici uniquement de la valeur de référence qui permettra cette évaluation. Il est tout de même possible d'effectuer une comparaison des équipements selon l'indicateur.

4.1.3 Résultats

La Figure 66 donne la durabilité mensuelle moyenne des équipements pour l'année 2015 : la référence pour mesurer les évolutions environnementales futures.

On remarque d'abord que l'indicateur varie beaucoup plus pour les équipements du chantier (entre 31,6 et 96,3 %) que pour les installations fixes (entre 80,5 et 98,4%). Sur le chantier, le type d'équipement à la durabilité la plus faible est les chargeuses (31,6%), et pas très loin au-dessus la pelle Liebherr (33,2%).

Les durabilités des camions 136 tonnes et 190 tonnes sont similaires (≈70%), alors que celle des camions de sous-traitance est parmi les plus élevées pour les équipements du chantier. Cela peut être dû à une sous-estimation de la consommation spécifique des camions de sous-traitance (en effet, la valeur utilisée est une référence sur route goudronnée ; or les conditions de route sur le chantier influencent la consommation des véhicules). L'ordre des types de camions pour la durabilité est cependant l'ordre attendu selon la capacité des véhicules : $durabilité_{190t} < durabilité_{136t} < durabilité_{36t}$. La proximité des camions 190 tonnes et 136 tonnes s'explique par le fait que les 190 tonnes sont beaucoup plus récents que les 136 tonnes.

Du côté des installations fixes, ce sont la trémie (80,5%) et la station de criblage (81,7 %) qui ont les durabilités les plus faibles.

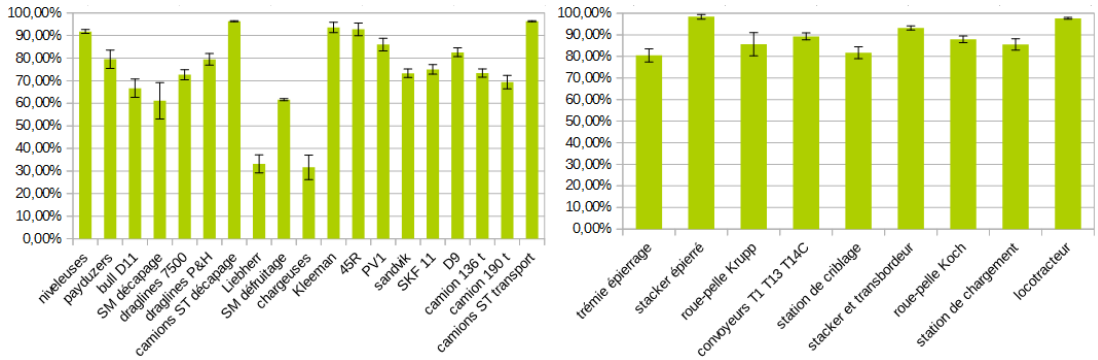


Figure 66.Durabilité mensuelle moyenne des équipements du chantier (à gauche) et des installations fixes (à droite) pour l'année 2015.

On peut dans un deuxième temps s'intéresser à l'influence de l'indicateur de durabilité sur l'OEE des équipements. C'est ce que montre la Figure 67, pour tous les équipements dont l'OEE est mesuré par l'OCP.

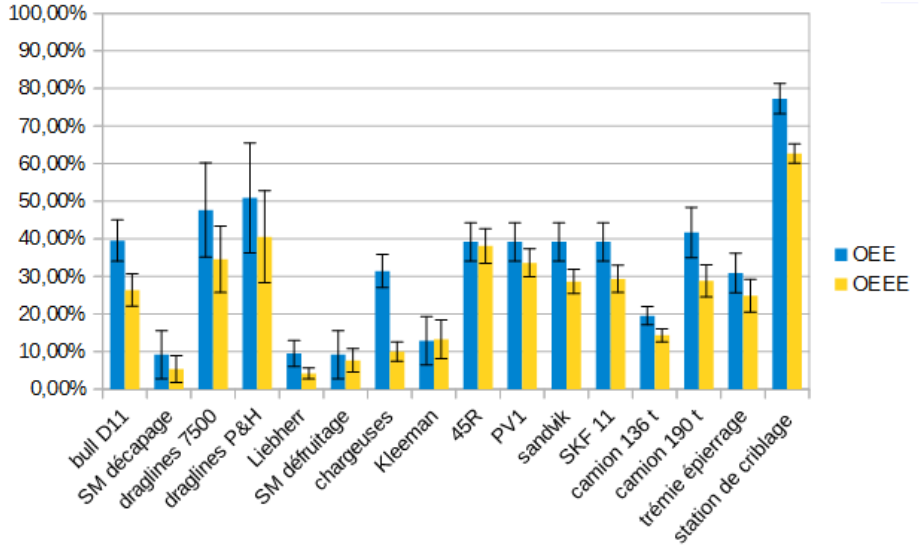


Figure 67. OEE et OEEE mensuels moyens des équipements pour l'année 2015.

Très logiquement, l'OEEE est inférieur à l'OEE, d'autant plus que la durabilité de l'équipement considéré est faible. L'étape suivante est d'évaluer dans quelle mesure les deux indicateurs évoluent par la mise en place de pratiques Lean. Alors on pourra s'intéresser à la question : est-ce que Lean Mining est compatible avec Green Mining ?

4.2 Analyse des Composantes Principales des données

L'ACP est la plus répandue des méthodes factorielles d'analyse de données. Elle permet, à partir d'un tableau de données *individus x variables*, de mettre en évidence les relations entre les variables grâce à de nouvelles variables composites appelées composantes principales. Ces composantes principales sont les dimensions qui expliquent le mieux le tableau de données car elles maximisent l'inertie représentée. Après avoir déterminé quelles dimensions représentaient le mieux nos données grâce aux valeurs propres associées à chaque composante, nous pouvons les interpréter à partir des variables d'origine. Les valeurs propres donne le pourcentage d'inertie représenté par chaque composante : plus celle-ci est importante et plus la composante en question a de poids dans l'interprétation du jeu de données. Il est alors possible de tracer des cercles de corrélation des variables et des nuages de points des individus pour observer de manière graphique le comportement des variables et individus vis-à-vis des composantes principales.

Sur un cercle de corrélation des variables, on représente deux composantes principales différentes - une pour chaque axe du repère - et les coordonnées des variables initiales sont les coefficients de corrélations entre ces variables et les composantes principales

choisies. Plus le coefficient de corrélation entre une variable initiale et une composante principale est grand, plus sa coordonnée selon cet axe sera grande.

Les nuages de points sont la représentation des individus selon chaque composante principale, tels les nuages de points des variables initiales.

L'ACP comporte de multiples avantages :

- elle résume l'information contenue dans un tableau de données (on conserve en général moins de dimensions pour l'ACP que les dimensions du tableau),
- les composantes principales sont hiérarchisées par ordre de variance décroissante et non corrélées entre elles, contrairement aux variables d'origine,
- l'information est lisible sur des graphes, ce qui permet de la "cartographier".

4.2.1 Choix des variables

Tout d'abord, à partir des données d'heures de marche, d'unités d'œuvre et de consommations, on peut obtenir 6 variables synthétiques (en calculant le rapport de deux des trois variables initiales). Deux d'entre elles sont des indicateurs calculés par l'OCP :

- le rendement (*rendement= UO/HM*)
- la consommation spécifique (*consommation spécifique=consommation/HM*).

Dans la littérature, la consommation spécifique est plutôt le ratio de la consommation sur la production : *consommation spécifique=consommation/UO*.

Un autre indicateur souvent calculé est l'efficience énergétique, rapport de la production et de la consommation :

efficience énergétique= UO/consommation=1/consommation spécifique.

Etant donné que toutes ces variables sont issues de 3 variables initiales, il paraît logique de choisir 3 variables parmi toutes. Ainsi on ne perd pas d'information sans être redondant. Celles qui ont été choisies pour l'ACP sont les suivantes :

- les UO, qui mesurent à la fois la production et l'intensité d'utilisation d'un équipement
- le rendement OCP (*UO/HM*), qui mesure la productivité d'un équipement
- l'efficience énergétique (*UO/consommation*), qui mesure aussi la productivité mais cette fois par rapport à la consommation énergétique. Tout comme le rendement, il est souhaitable que l'efficience énergétique soit la plus grande possible.

En plus de ces trois variables, la durabilité telle que calculée dans la partie précédente, ainsi que le TD et le TU qui donnent des informations nouvelles sur les équipements, ont été choisies (le TD et le TU ne sont cependant pas toujours mesurés).

Ce sont donc 6 variables (ou 4 lorsque le TD et le TU ne sont pas disponibles pour les équipements étudiés) qui entrent dans le tableau de données de l'ACP. La consommation a été remplacée par les émissions de gaz à effet de serre pour uniformiser la dimension de la consommation énergétique.

La Figure 68 compare le cercle des corrélations pour les deux premières dimensions de l'ACP des équipements du chantier. Le cercle de corrélation de gauche prend en compte toutes les variables représentées, alors que celui de droite ne prend en compte que les 6 variables sélectionnées (les variables représentées en bleu sont supplémentaires). On remarque que ces deux cercles de corrélation sont très semblables, autant au niveau de la position des variables sur le cercle qu'au niveau de l'inertie représentée par les composantes principales. On en déduit qu'ajouter des variables disponibles à l'analyse n'apporte pas plus d'information.

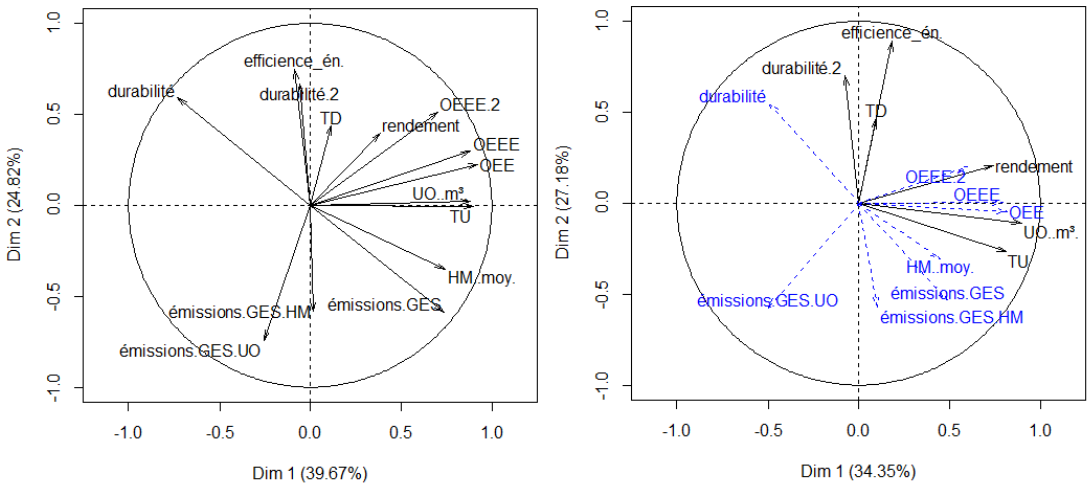


Figure 68. Cercles des corrélations pour les équipements de chantier avec toutes les variables disponibles (gauche) et les 6 variables sélectionnées (droite).

Une ACP séparée a été réalisée pour le chantier, pour la foration (dont les UO sont mesurées en ml et donc pas comparables avec le reste de l'équipement) et les installations fixes. Les trois analyses ont été réalisées au moyen du langage R (plus précisément l'interface R Commander et le package FactoMineR).

4.2.2 Le chantier (sauf la foration)

On commence par tracer les histogrammes des moyennes des variables sur l'année 2015 pour les équipements considérés (Figure 69). Cela nous aidera par la suite à interpréter les composantes principales de l'ACP.

De plus, cela nous permet déjà de répondre à un certain nombre de questions sur le profil des équipements. D'une part, on remarque en s'intéressant au TU et aux UO, que certains équipements sont très peu utilisés comparés à tous les autres : la pelle Liebherr, le Surface Miner et la cribleuse mobile Kleeman (10%<TU<20%). Ces équipements sont aussi ceux dont l'acquisition est la plus récente. A l'inverse, les équipements aux TU les plus élevés sont les draglines P&H (73,2%), les draglines 7500 et les bulldozers D11 (59,4%). On peut aussi ajouter à la liste des équipements les plus utilisés les sondeuses, avec un TU moyen de 57,6%. Ce sont aussi les équipements qui produisent le plus d'unités d'œuvre (on ne dispose pas du TU pour les camions de la sous-traitance). Les équipements au rendement le plus élevé sont les draglines 7500 (502 m^3/h) et les chargeuses (472 m^3/h). Les draglines P&H et les bulldozers D11 sont aussi parmi les meilleurs équipements de la mine en termes de productivité, ainsi que la pelle Liebherr, malgré son taux d'utilisation très bas. La cribleuse mobile Kleeman et le Surface Miner ont un rendement très variable (important écart-type). Les camions sont très nettement les équipements au rendement le plus faible.

Quant à l'efficience énergétique, c'est la Kleeman qui a la plus grande en moyenne avec 6,42 $m^3/kgCO_2eq$ (même si elle est très variable au vu de l'écart-type : 4,55 $m^3/kgCO_2eq$). Les camions de sous-traitance semblent avoir une meilleure efficience énergétique pour les activités de décapage que pour le transport de phosphate. Cela peut être expliqué par les distances parcourues qui sont très différentes pour les deux opérations. En effet, dans le cadre du décapage, les distances s'étalent entre 0 et 4 km avec une distance moyenne sur l'année de 2,14 km, alors qu'elles vont jusqu'à plus de 30 km pour le transport (en moyenne 6,06 km). Il se peut aussi que les estimations de la consommation et des heures de marche pour la sous-traitance ne soient pas adaptées.

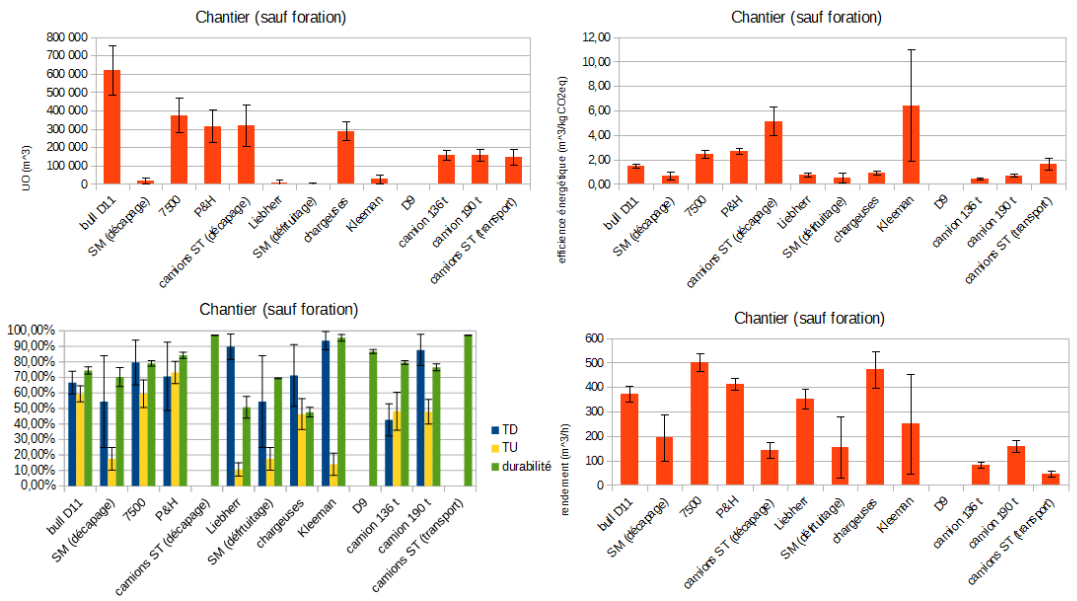


Figure 69. Moyennes des variables de l'ACP pour les équipements du chantier (sauf les sondeuses).

Les draglines ont aussi une efficience énergétique moyenne relativement élevée (>2 $m^3/kgCO_2eq$). C'est peut-être dû au fait que ce sont les seuls équipements électriques du diagramme.

Les valeurs propres comportent un léger décrochement entre la 4e et la 5e valeur propre. De plus, les 3 premières valeurs propres sont supérieures à 1. Les deux premières valeurs propres représentent à elles deux 61,53 % du jeu de données. La 3e valeur propre représente, quant à elle, 18,61% du jeu de données, ce qui n'est pas négligeable. On va donc essayer d'interpréter les 3 premières dimensions de l'ACP.

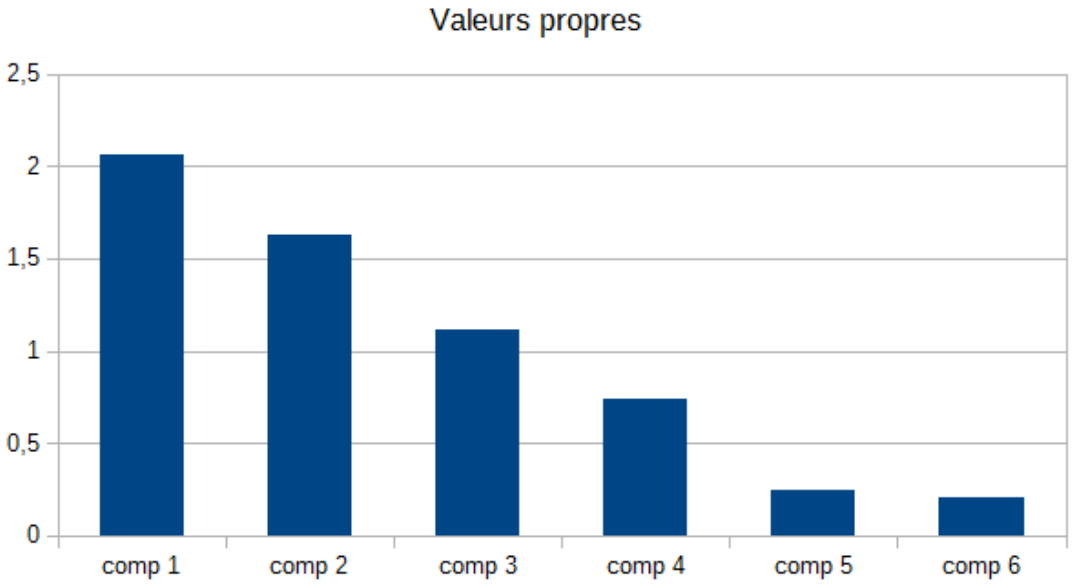


Figure 70. Diagramme des valeurs propres de l'ACP des équipements du chantier.

Selon le premier cercle de corrélation (Figure 71 à gauche), la dimension 1 est corrélée positivement avec (dans l'ordre de corrélation décroissante) les UO, le TU et le rendement. Les histogrammes des UO et TU vont aussi dans le sens d'une corrélation positive entre les deux variables : en effet, les équipements les plus utilisés sont aussi ceux à la production la plus importante, et inversement. Ainsi, en prenant également en compte le rendement, cette dimension donne un lien entre intensité de production et productivité.

La répartition des types d'équipements selon la première composante principale est caractérisée par 3 groupes :

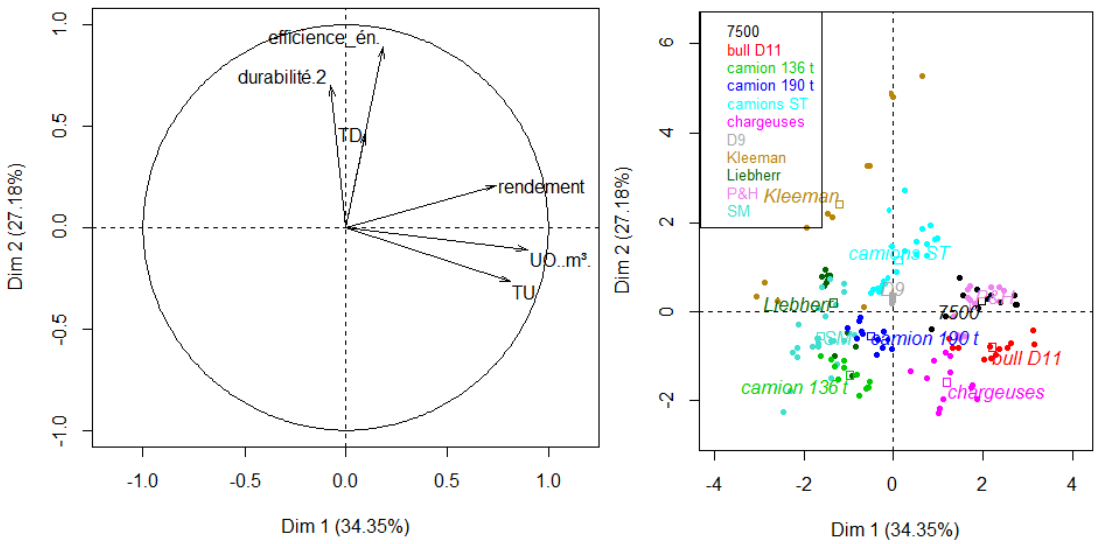


Figure 71. Le cercle de corrélation et le plan factoriel de l'ACP des équipements du chantier.

- Les draglines, les bulldozers D11 et les chargeuses qui ont une coordonnée positive. Ils ont été identifiés précédemment comme étant les équipements les plus utilisés et ayant le meilleur rendement. Cela va donc bien dans le sens de notre interprétation,
- La cribleuse mobile Kleeman, la pelle Liebherr, le Surface Miner et les camions 136 tonnes (voire les camions 190 tonnes), à la coordonnée négative. Les trois premiers équipements sont les moins utilisés sur le chantier, et ils produisent donc le moins d'UO. Les camions OCP sont caractérisés par un TU élevé mais des UO et un rendement faible. Celui des camions 190 tonnes est plus élevé que celui des camions 136 tonnes, ce qui explique la coordonnée plus proche de 0 des camions 190 tonnes,
- Enfin, les bulldozers D9 (dont on ne connaît ni UO, ni TU) et les camions de sous-traitance ont une coordonnée proche de 0. Ils ne sont pas bien représentés par cette composante.

La deuxième dimension est corrélée positivement avec l'efficience énergétique et la durabilité, et dans un deuxième temps avec le taux de disponibilité. Cette composante différencie les équipements selon leur consommation énergétique, et met en évidence un lien entre cet aspect et la fréquence des arrêts matériels. Plus le TD est élevé, moins les arrêts matériels sont fréquents, et inversement.

On remarque d'abord que la cribleuse mobile Kleeman se détache nettement du reste du nuage de points avec une coordonnée très positive : en plus d'avoir la plus grande efficience énergétique moyenne et une durabilité supérieure à 90 %, la Kleeman possède aussi le TD le plus élevé des équipements. Les camions de sous-traitance, qui ont aussi une coordonnée positive, se caractérisent aussi par une durabilité et une efficience énergétique élevées.

Les équipements à la coordonnée négative sont le Surface Miner, les bulldozers D11, les camions 190 tonnes. Les chargeuses et les camions 136 tonnes ont une coordonnée très négative selon cette dimension. Tous ces équipements se caractérisent par une efficience énergétique faible (seuls celle des D11 est supérieure à 1, avec 1,48 $m^3/kgCO_2eq$), une durabilité faible (comprise entre 31,6 % pour les chargeuses et 69,4 % pour les camions 190 tonnes). Leur TD varient entre très faible ($TD_{\text{camions 136 tonnes}}$ =42,7%) et très élevé ($TD_{\text{camions 190 tonnes}}$=87,7%).

La corrélation positive avec le TD semble être due plus principalement à la cribleuse mobile qu'à un véritable lien entre consommation énergétique et arrêts matériels. On note que les TD les plus élevés sont observés pour les équipements les plus récents (à l'exception du Surface Miner) : Kleeman, Liebherr et camions 190 tonnes.

Les draglines ont un meilleur impact environnemental que ce à quoi on aurait pu s'attendre (leur coordonnée selon la deuxième composante est légèrement positive).

Ce 1 er cercle de corrélation nous permet enfin de constater l'absence de lien entre les deux groupes de variables initiales : UO, rendement, TU et efficience énergétique, durabilité, (TD). Les deux aspects «production et productivité» et «impact environnemental» des équipements du chantier apparaissent donc comme indépendants à travers l'ACP. Cela n'est pas forcément le cas équipement par équipement.

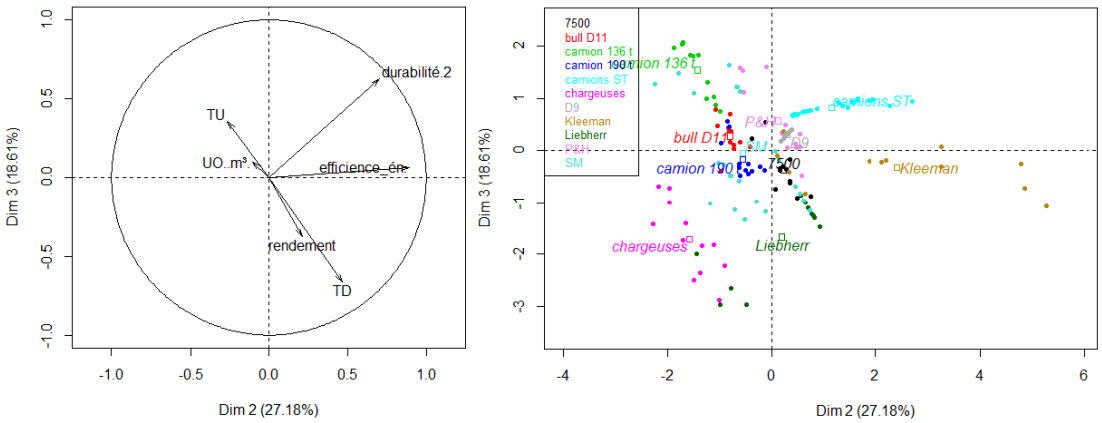


Figure 72. 2ème cercle de corrélation et 2ème plan factoriel de l'ACP des équipements du chantier.

Le 2ème cercle de corrélation de l'ACP des équipements de chantier (à gauche de la Figure 72) rapporte les contributions des variables aux composantes 2 et 3. La composante 3 oppose le TD (corrélé négativement) avec la durabilité (corrélé positivement). On observe principalement deux groupes d'équipements selon la 3ème dimension (outre les équipements dont la coordonnée est proche de 0) :

- Les camions 136 tonnes à la coordonnée très positive : ce type d'équipement possède le plus faible TD de tous les équipements du chantier, mais sa durabilité n'est pas élevée (elle est dans la moyenne),
- Les chargeuses et la pelle Liebherr à la coordonnée très positive : ces équipements ont des durabilités similaires (≈30%), mais des TD très différents.

Ces observations ne nous permettent pas vraiment de conclure sur la dimension 3.

Pour résumer, la première composante différencie les équipements très utilisés et très productifs des équipements peu utilisés et peu productifs, et la deuxième composante met l'accent sur la consommation énergétique.

4.2.3 La foration

De même que pour le reste du chantier, on commence par tracer les histogrammes des moyennes des variables pour chaque sondeuse (Figure 73).

On remarque d'abord que le TD et le TU ne sont mesurés par l'OCP que pour le groupe des sondeuses et pas pour chaque sondeuse individuellement. De ce fait, il n'est pas intéressant d'ajouter ces variables à l'ACP des 4 sondeuses.

Parmi les sondeuses, la 45R et la PV1 sont électriques, et la sandvik et la SKF fonctionnent au gasoil. La 45R est beaucoup plus ancienne que les trois autres sondeuses : elle avait fonctionné 77695 h à fin 2014, contre 19294 h, 6280 h et 5043 h pour la PV1, la SKF et la sandvik respectivement. On remarque que la 45R est aussi la sondeuse aux UO moyennes les plus faibles, donc au taux d'utilisation le plus faible.

Les profils d'unités d'œuvre sont similaires à ceux des rendements : la sandvik produit le plus d'UO et a le plus haut rendement moyen, puis la PV1, la SKF et enfin la 45R.

Tableau 40. Tableau récapitulatif des composantes principales pour le chantier.

Composante % de variance	**Utilisation et productivité 34,45%**	**Impact environnemental 27,31%**
Draglines 7500	+	0
Draglines P&H	+	0
Bulldozers D11	+	-
Chargeuses	+	--
Kleeman	-	++
Liebherr	-	0
Surface Miner	-	-
Camions 136 tonnes	-	--
Camions 190 tonnes	-	-
Sous-traitance	0	+
Bulldozers D9	0	0

A l'inverse, c'est la 45R qui a l'efficience énergétique moyenne la plus importante (0,37 *ml/kg*CO_2*eq*) - même si celle-ci est très variable. Celle de la PV1 est semblable à celle de la 45R (0,33 *ml/kg*CO_2*eq*), alors que celle des sondeuses gasoil est beaucoup plus basse (0,18 *ml/kg*CO_2*eq*).

Le diagramme des valeurs propres (Figure 74) montre un décrochement net entre la 2ème et la 3ème valeur propre. De plus, seules les deux premières valeurs propres sont supérieures à 1. Cela nous encourage à ne considérer que les deux premières dimensions de l'ACP, qui représentent d'ailleurs à elles deux 87,24 % du jeu de données.

On commence par s'intéresser au cercle de corrélation (à gauche de la Figure 75). La première composante sépare les variables initiales en deux groupes : les UO et le rendement de production, corrélés négativement, et l'efficience énergétique et la durabilité, corrélées positivement. Cette dimension oppose donc les sondeuses qui consomment et produisent beaucoup (les deux sondeuses gasoil) et les sondeuses qui consomment et produisent moins (la sondeuse 45R). Cette interprétation et la position

des sondeuses sur cet axe concordent bien avec nos observations concernant les variables initiales.

Selon la deuxième composante, toutes les variables sont corrélées positivement. Selon cette dimension, la sondeuse PV1 a une coordonnée positive et la SKF une coordonnée négative. Cela met en évidence le fait que la PV1 a des performances globalement meilleures que la SKF (et en se référant aux histogrammes on a bien qu'en moyenne, les 4 variables initiales sont plus élevées pour la PV1 que pour la SKF). La 45R et la sandvik ont une coordonnée proche de 0 sur cet axe car leurs performances ne sont pas homogènes comme celles des deux sondeuses précédentes. La 45R consomme moins, mais produit aussi moins, que la sandvik.

Pour résumer, ces deux dimensions séparent les sondeuses selon qu'elles ont un profil productif ou durable, homogène ou hétérogène.

Tableau 41. Tableau récapitulatif des composantes principales de la foration.

Composante % de variance	**Productivité vs. impact environnemental 53,67%**	**Performances globales 33,59%**
Sandvik	--	0
SKF	-	-
45R	+	0
PV1	0	+

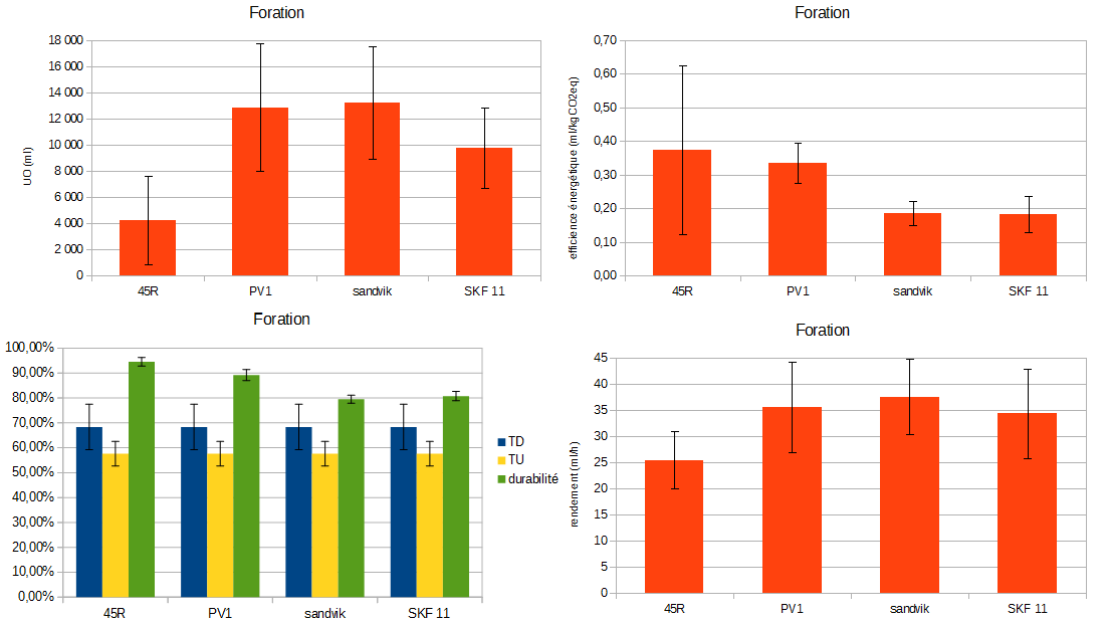


Figure 73. Moyennes des variables de l'ACP des sondeuses.

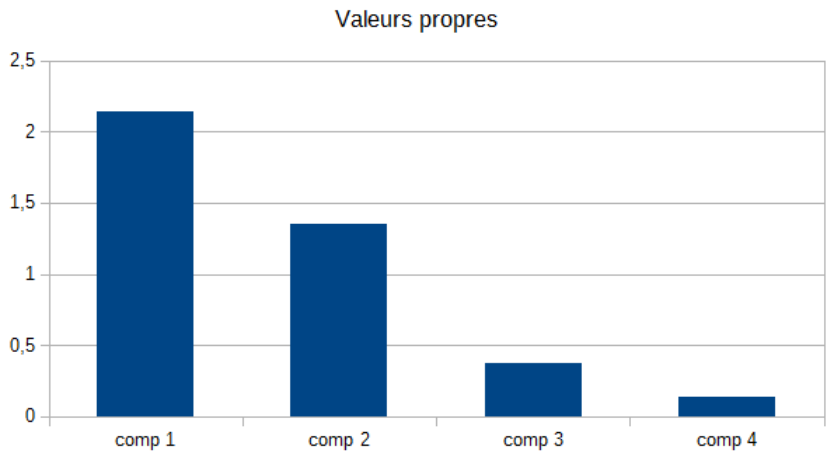


Figure 74. Diagramme des valeurs propres de l'ACP des sondeuses.

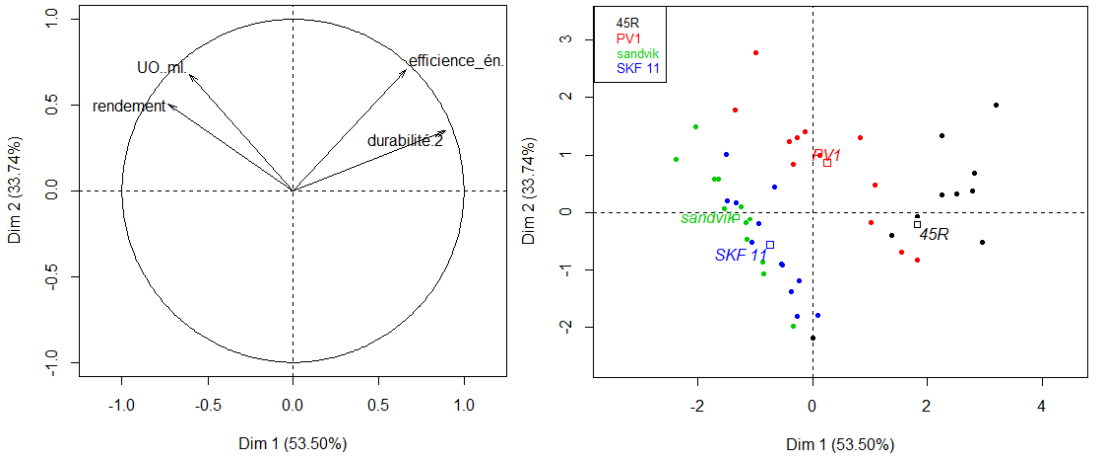


Figure 75. 1er cercle de corrélation et 1er plan factoriel de l'ACP des sondeuses.

4.2.4 Les installations fixes

De même que pour les deux premières ACP, on trace les histogrammes des moyennes des variables sur l'année 2015 pour les installations fixes (Figure 76).

Tout d'abord, le TD et le TU ne sont disponibles que pour la trémie d'épierrage et la station de criblage, donc il n'est pas très pertinent de les prendre en compte dans l'ACP. On remarque tout de même que le TU de la station de criblage est deux fois plus grand que celui de la trémie d'épierrage, alors que les UO des deux équipements sont similaires.

En fait, les UO de la trémie d'épierrage, des convoyeurs entre épierrage et criblage, de la station de criblage, et du chargement sont toutes les mêmes. Ceci est cohérent, car contrairement au chantier, les installations fixes sont une chaîne linéaire.

Les UO d'alimentation et de reprise post-épierrage et post-criblage sont plus faibles. Cela indique qu'une partie du phosphate épierré et criblé ne passe pas par un stock mais est acheminé directement au procédé suivant.

La roue-pelle Koch a le rendement le plus élevé (1790 THC/h). La station de chargement et les locotracteurs ont aussi un rendement important (de l'ordre de 1400 THC/h). Le rendement le plus faible est celui des stackers post-épierrage (518 THC/h).

Les locotracteurs ont la meilleure efficience énergétique moyenne (61,3 THC/ $kgCO_2eq$). Etant donné que leur seule fonction est de tirer les wagons de phosphate lors du chargement, ceci est cohérent.

Enfin, on remarque que les profils des différentes stackers et roue-pelles sont très différents.

Le diagramme des valeurs propres (Figure 77) ne comporte pas de décrochement particulier. On observe que les deux premières valeurs propres sont supérieures à 1 et les deux premières dimensions représentent à elles deux 74,07 % du jeu de données. La troisième dimension représente tout de même 20,86 % du jeu de données, ce qui n'est pas négligeable.

Le cercle de corrélation à gauche de la Figure 78 donne la répartition des variables initiales selon les deux premiers axes principaux de l'ACP. Le premier axe est corrélé positivement avec l'efficience énergétique et la durabilité ; il différencie donc les équipements selon leur impact environnemental. Le deuxième axe, quant à lui, est corrélé positivement avec les UO et le rendement. Il lie encore une fois la production et la productivité des équipements. Ce sont deux corrélations présentes pour les 3 ACP réalisées. Comme pour l'ACP des équipements du chantier, les deux aspects «impact environnemental » et «production et productivité » apparaissent indépendants pour les installations fixes.

Selon la première composante, les locotracteurs se démarquent très positivement. Cela est cohérent avec leur durabilité et efficience énergétique moyennes très élevées. Les stackers post-épierrage ont aussi une coordonnée nettement positive. C'est le deuxième type d'équipement dont l'efficience énergétique et la durabilité moyennes sont particulièrement élevées.

La trémie d'épierrage et la station de criblage ont les coordonnées les plus négatives. Ce sont les équipements à l'efficience énergétique et la durabilité moyennes les plus faibles. Ces observations confortent donc notre interprétation de l'axe. On

remarque enfin que la roue-pelle Krupp et la station de chargement ont une coordonnée négative (bien que moins négative que la trémie et la station de criblage).

Selon le deuxième axe, outre les équipements à la coordonnée proche de 0, on retient trois groupes d'équipements :

- La station de chargement, les locotracteurs et la roue-pelle Koch dont la coordonnée est positive. Ce sont les équipements au rendement moyen le plus élevé (respectivement 1407, 1422 et 1790 THC/h). La station de chargement et les locotracteurs ont de plus les UO moyennes les plus élevées (408484 THC),
- Les stackers post-épierrage dont la coordonnée est très négative. Elles ont les UO et le rendement moyens les plus faibles (323961 THC et 518 THC/h),
- La roue-pelle Krupp et les stackers post-criblage avec le transbordeur, dont la coordonnée est négative.

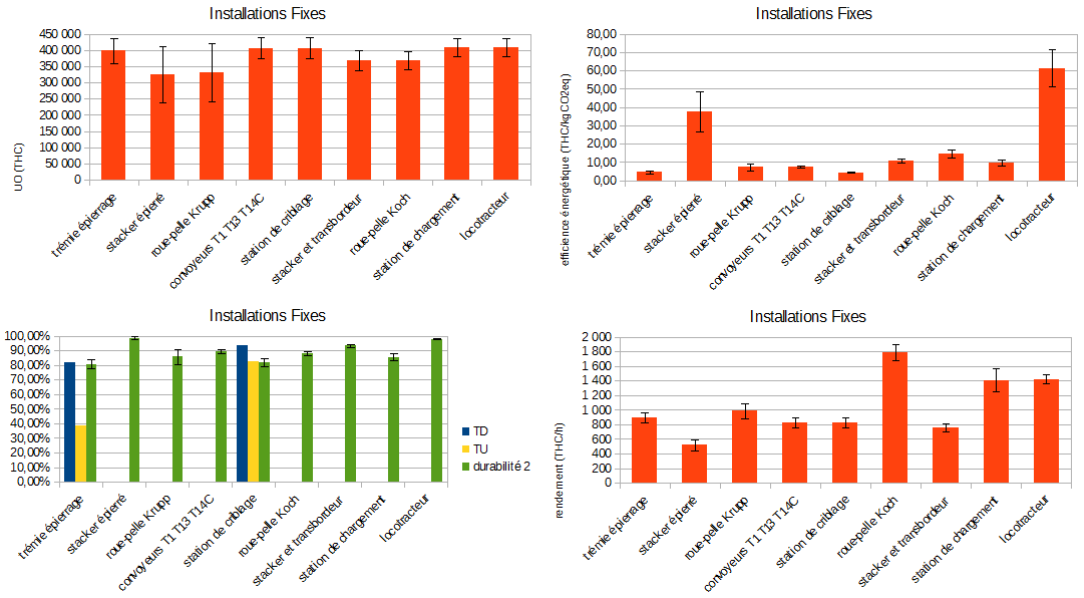


Figure 76. Moyennes des variables de l'ACP pour les installations fixes.

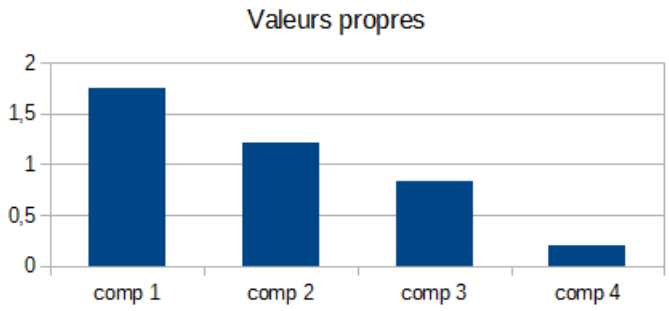


Figure 77. Digramme des valeurs propres de l'ACP des installations fixes.

Ce découpage des types d'équipement est en accord avec notre interprétation de la deuxième composante.

Comme le montre le cercle de corrélation de la Figure 79, la 3ème dimension de l'ACP oppose les UO (corrélées positivement) et le rendement (corrélé négativement). Alors que la 2ème dimension classe les équipements en fonction de leurs performances globales de production et de productivité, la 3e dimension oppose ceux à la grande production (et donc utilisation) avec ceux à la grande productivité.

Selon cet axe, la roue-pelle Koch se démarque négativement par rapport aux autres équipements. La roue-pelle Krupp a aussi une coordonnée relativement négative. Les convoyeurs, la station de criblage et les stackers post-criblage ont quant à eux une coordonnée positive.

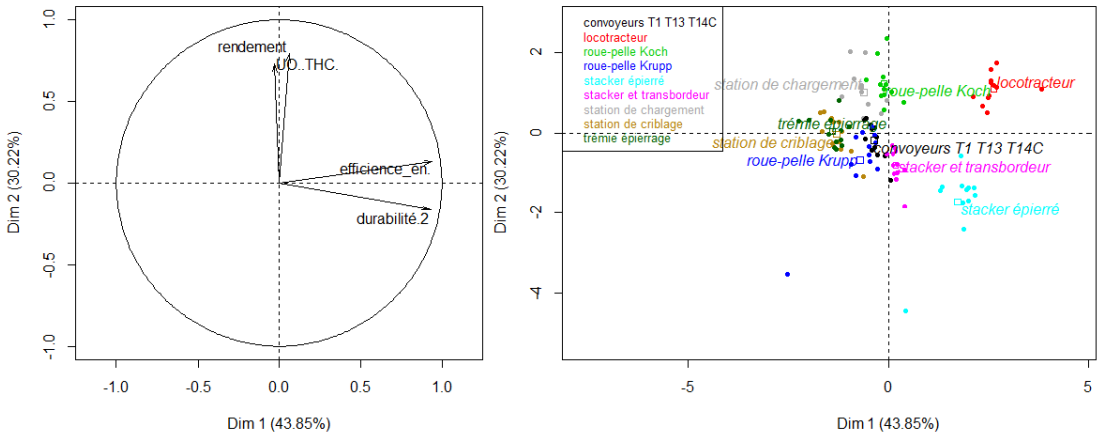


Figure 78. 1er cercle de corrélation et 1er plan factoriel de l'ACP des installations fixes.

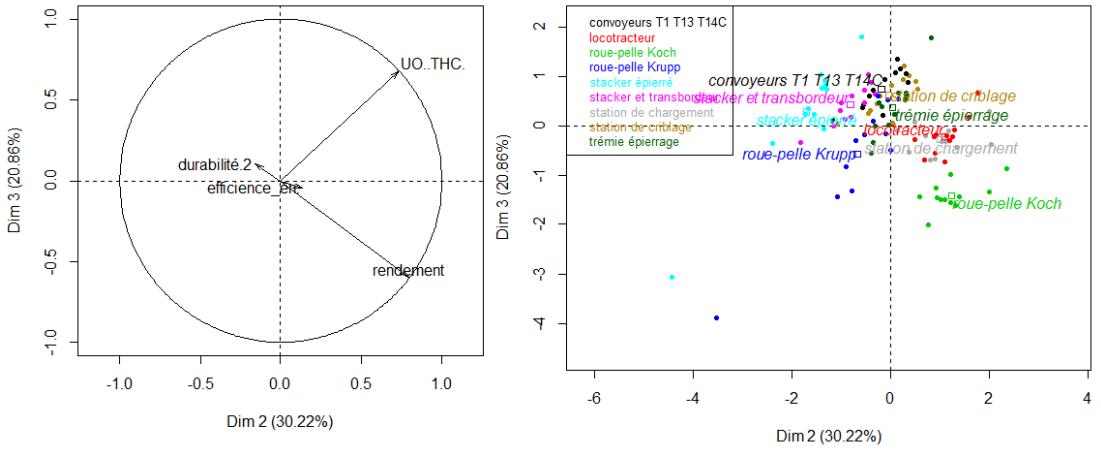


Figure 79. 2ème cercle de corrélation et 1er plan factoriel de l'ACP des installations fixes.

Pour résumer, la première composante caractérise les équipements selon leur impact environnemental ; la deuxième et la troisième composantes selon leur production et leur productivité. La deuxième composante classe les équipements en fonction de leurs performances globales, alors que la troisième oppose ceux dont la production est élevée à ceux dont le rendement est élevé.

On remarque que les roue-pelles Krupp et Koch ont des profils très différents. D'un côté, la roue-pelle Krupp a un impact environnemental et des performances de production négatifs par rapport aux autres équipements, alors que la roue-pelle Koch est relativement neutre au niveau impact environnemental est se démarque positivement par ses performances de production. La roue-pelle Krupp a donc de moins bonnes performances que la roue-pelle Koch. Cela pourrait être dû à l'énergie nécessaire à faire bouger la roue-pelle le long du stock. En effet, la roue-pelle Krupp, qui se trouve après la station d'épierrage, est beaucoup plus mobile que la roue-pelle Koch. En effet, traverser le stock post-épierrage prend 30 à 40 minutes à la roue-pelle et dépense beaucoup d'énergie -mais n'est pas une activité productive (au sens de la mesure des unités d'œuvre).

4.2.5 Conclusion de l'ACP

L'analyse des équipements de la mine de Ben Guérir par ACP nous a permis de dégager les corrélations (ou absences de corrélation) entre les variables et ainsi de caractériser les profils des équipements. Il apparaît que les équipements les moins durables (comparativement aux autres équipements d'une même analyse) sont :

Ces équipements et les opérations où ils interviennent sont donc ceux sur lesquels se concentrer en priorité pour améliorer l'impact environnemental de la mine.

On peut penser par exemple essayer d'utiliser plutôt les draglines dans le décapage pour minimiser l'utilisation des bulldozers D11, ou encore augmenter l'utilisation de la cribleuse mobile qui permet de réduire le volume transporté par les camions et qui de plus est un des équipements du chantier les moins consommateurs d'énergie. Les sondeuses les moins durables étant les deux sondeuses gasoil, on peut essayer de maximiser l'utilisation des sondeuses électriques (sachant qu'en plus la sondeuse PV1 possède les meilleures performances globales parmi les sondeuses). Enfin, il serait intéressant de comprendre plus précisément l'origine des différences

entre les deux roue-pelles (est-ce une différence technologique, opérationnelle...? -- les éléments de réponses accessibles pointent vers une différence opérationnelle).

Tableau 42. Tableau récapitulatif des composantes principales des installations fixes.

Composante % de variance	Impact environnemental 43,85%	Performances de production 30,22%	Production vs. productivité 20,86%
Convoyeurs	0	0	++
Loctracteurs	++	+	0
Roue-pelle Kock	0	+	--
Roue-pelle Krupp	-	-	-
Stackers épierré	+	--	0
Stackers et transbordeur	0	-	+
Station de chargement	-	+	0
Station de criblage	--	0	++
Trémie épierrage	--	0	0

Tableau 43. Tableau récapitulatif des équipements les moins durables.

Chantier	Foration	Installations Fixes
Camions OCP Bulldozers D11 Chargeuses	Sandvik SKF	Epierrage Criblage Roue-pelle Krupp

4.3 VSM durable

Un des objectifs du projet de Lean Mining durable était de produire une Value Stream Mapping pour l'axe centre de l'OCP (dont la mine de Ben Guérir fait partie). La VSM a pour but de mettre en évidence toutes les actions (de valeur ajoutée comme de non-valeur ajoutée) nécessaires à la fabrication d'un produit (ou d'un groupe de produits issus des mêmes ressources) depuis les matières premières jusqu'au client (Rahani et Ahraf, 2012). La VSM réalisée pour l'axe centre rend compte des flux de matière et d'informations le long de la chaîne cinématique.

Comme mentionné précédemment, un certain nombre de recherches s'attachent à développer des outils Lean qui se focalisent aussi sur le développement durable. C'est le cas de Faulkner et Fazleena (2014), qui développe des indicateurs de développement

durable pour la VSM. Ces indicateurs couvrent la consommation d'énergie, d'eau, la production de déchets et plusieurs critères de pénibilité du travail pour rendre compte de l'aspect social du développement durable.

\par Dans le cadre de la cartographie énergétique de la mine de Ben Guérir, deux lignes ont simplement été ajoutées à la VSM pour visualiser la consommation énergétique de chaque source d'énergie (gasoil et électricité). Pour chaque opération depuis l'aménagement du chantier jusqu'au chargement du phosphate, la consommation spécifique (sous forme consommation/h et consommation/production) ainsi que l'indicateur de durabilité moyennes sur l'année 2015 ont été consignées pour chaque type d'équipements.

Cela permet une autre visualisation de la consommation d'énergie, cette fois focalisée sur la chaîne cinématique de la mine.

5 CONCLUSION

Cette étude s'est efforcée de comparer les performances des équipements de la mine pour les caractériser. A la suite d'une recherche bibliographique, un indicateur de durabilité a été construit à partir des données de fonctionnement fournies par l'OCP. Celui-ci permet de compléter les indicateurs de performance déjà calculés habituellement par l'OCP en y ajoutant une dimension environnementale. De plus, il rend possible la comparaison entre équipements électriques et gasoil, car ce sont les émissions de gaz à effet de serre dues à chaque type d'équipement qui ont été utilisées.

L'analyse des composantes principales effectuée met en évidence de façon rigoureuse les profils des équipements. Elle peut constituer une base sur laquelle s'appuyer pour optimiser l'utilisation de chaque type d'équipement à la mine, notamment du point de vue énergétique. On constate encore une fois, grâce à l'ACP, la diversité de ces profils.

Cependant, plusieurs facteurs peuvent influencer les performances énergétiques des équipements n'ont pas été étudiées. En effet, certaines études (par exemple Awuah-Offei (2016) se sont intéressées à l'efficience énergétique des camions et des draglines des mines à ciel ouvert. Elles s'accordent sur le rôle important joué par les conditions d'exploitation (l'état des routes par exemple), mais aussi par les conditions d'opération. Un bon contrôle du facteur humain peut générer des économies importantes d'énergie. Ce facteur, ainsi que les moyens de le contrôler (grâce à une automatisation partielle de la conduite des équipements, des campagnes de formation...) seraient à explorer.

Un autre aspect important qui constitue la base des mesures environnementales dans les entreprises est l'obtention de données fiables. Or, sur le site de Ben Guérir, de nombreuses données de fonctionnement sont encore mesurées à la main par les opérateurs. Cela introduit de nouveau un facteur humain, potentiellement à l'origine d'erreurs (ne serait-ce que des erreurs de recopie) et d'incertitudes. La maîtrise de l'information sur le site industriel est importante pour toute analyse. L'OCP travaille actuellement à Ben Guérir à passer au numérique et à la mesure programmée et complète des données de consommation électrique, mais ce n'était pas du tout le cas en 2015.

Enfin, il peut être intéressant de mesurer et analyser la durabilité par des méthodes différentes pour observer si les résultats concordent.