

Hélène Lestage

De nos sensations proximales à notre perception de l'espace: l'attribution distale comme processus sensorimoteur et idéomoteur.

Thèse présentée et soutenue publiquement le 02/10/2018, en vue de l'obtention du doctorat en
Sciences et techniques des activités physiques et sportives
de l'Université Paris Nanterre

sous la direction du Professeur Vincent Dru
et de M. Thibaut Brouillet (Université Paris-Nanterre)

Jury :

Rapporteur :	Mr Charles Lenay	Professeur des Universités, Université de Technologie de Compiègne
Rapporteur :	Mr Arnaud Badets	Chargé de Recherche, HDR, Université de Bordeaux
Examineur :	Mr Michel-Ange Amorim	Professeur des Universités, Université de Paris-Sud
Examineur :	Mr Rémy Versace	Professeur des Universités, Université de Lyon 2
Directeur :	Mr Vincent Dru	Professeur des Universités, Université Paris-Nanterre
Co-directeur :	Mr Thibaut Brouillet	Maître de Conférences, Université Paris-Nanterre

De nos sensations proximales à notre perception de l'espace :
L'attribution distale comme processus sensorimoteur et idéomoteur

Hélène Lestage

Thèse dirigée par Vincent Dru et Thibaut Brouillet

« *Si tu veux voir, apprends à agir* »
(Heinz Von Foerster, 1988¹)

¹ « la construction d'une réalité », in : Paul Watzlawick, *L'invention de la réalité*, Éditions du Seuil, p.69

Je dédie cette thèse à Thibaut,
Qui a vécu cette aventure intellectuelle et l'a construite avec moi.
Qui m'a éduquée, éclairée, élevée, supportée, guidée
Qui m'a appris que « les vérités sont choses à faire et non à découvrir, ce sont des
constructions et non des trésors ».

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord très chaleureusement mes directeurs de thèse, Thibaut Brouillet et Vincent Dru. Les années de thèse sont souvent décrites comme des années éprouvantes. Grâce à vous, elles ont été pour moi des années heureuses, joyeuses, épanouissantes. Vous avez fait de mon doctorat une expérience de vie et professionnelle extraordinaire.

Thibaut, merci de m'avoir transmis ta passion pour la recherche et pour l'enseignement. Merci pour ta patience, ton soutien et ta confiance dans tellement de domaines ; des discussions passionnées autour des hypothèses de travail à la rédaction finale de la thèse, en passant par les expérimentations, l'organisation de TRACE ou du FSC, l'encadrement des étudiants mais aussi le Canada et les moments de vie gais ou difficiles. Merci de m'avoir supportée académiquement et personnellement, tout en me laissant la part d'indépendance et d'autonomie dont j'avais besoin pour m'épanouir.

Vincent, merci d'avoir pris le temps de me former à la psychologie, merci de m'en avoir ouvert les portes et de m'avoir fait découvrir le monde de la cognition incarnée. Merci pour m'avoir non seulement acceptée mais aussi intégrée dans le labo. Merci pour votre confiance, votre humanité et votre bienveillance et pour avoir fait de l'équipe et de l'environnement de travail un terrain extrêmement épanouissant.

Merci à tous les membres de notre équipe du laboratoire. Merci Hélène et Anna pour votre amitié, vos conseils, votre intelligence, vos personnalités irremplaçables. Merci pour les gâteaux ratés ou réussis, les dessins, les sushis, les savons Chanel. Merci Hélène d'avoir soutenu avant nous et de nous permettre de suivre tes traces, on espère à ta mesure.

Merci aux Nicolas, à Loïc, à Alex et à Joël pour votre disponibilité, votre sens de l'humour et votre soutien constant. Merci Nico pour les cours de stat ainsi que les tee-shirts et ceintures qui ont illuminé mes journées à l'université.

Merci à toutes les personnes précédemment citées pour avoir aidé à l'organisation et au déroulement de TRACE.

Merci à tous les étudiants de master que j'ai aidé à encadrer : Mathilde, Sophie, Pauline, Audrey, Oriol, Alexandre, Thomas et Robin. Merci pour votre implication et votre volonté, les sujets passés bien sûr, et votre bonne humeur contagieuse. Merci de m'avoir suivie dans cette aventure avec persévérance malgré mes erreurs, les sujets perdus, les résultats pas toujours au rendez-vous, les moments de doute. Merci pour vos suggestions et généralement tout le travail accompli.

Merci spécifiquement à Mathilde pour ta gentillesse, merci pour m'avoir fait sentir moins seule dans l'allée du rez-de-chaussée de la BU, merci pour ton amitié et tous les

moments que nous avons partagés. Merci d'avoir fait de ton partenaire un homme heureux et épanoui.

Merci spécifiquement à Sophie et Pauline pour leur folie, nos délires, votre amitié.

Merci à Morgane, Benjamin, Ikrame, et Hugo. Encadrer vos stages a été un honneur et un plaisir, et m'a confortée dans ma passion de l'enseignement.

Merci à Deborah qui a participé à initier ce travail de recherche.

Merci Thomas pour ta longue amitié, ta brillance intellectuelle qui m'a toujours inspirée, ton humour, les bonnes bouteilles de vin. Merci de m'avoir redonné confiance en moi dans les moments de doute et de m'avoir conseillée et poussée en avant quand j'en avais besoin. Merci de m'avoir encouragée à faire cette thèse. Merci à ta merveilleuse compagne Sonia pour ses précieux conseils lors de la préparation de l'oral du concours. Merci à vous deux pour votre accueil répété à Montpellier.

Merci Thomas et Romàn de m'avoir fait confiance pour organiser TRACE. Merci de l'avoir organisé avec moi. Merci pour votre passion et les bons moments que j'ai passé à vos côtés.

Merci à ma Céline, pour avoir tant de fois tenté (avec succès !) de comprendre mon travail de recherche et pour m'avoir encouragé tout le long du parcours. Merci pour les rires, la danse, les voyages, les hébergements, merci d'avoir été et d'être toujours présente dans ma vie et de l'illuminer continuellement de ton énergie, ta franchise et ton sourire.

Merci à Luna d'avoir rejoint notre duo et d'y avoir ajouté son grain de folie et d'intelligence.

Merci à Pierre et Evelyne. Je suis sûre que nos discussions philosophiques de lycéens ont été la prémisse de mon parcours universitaire.

Merci à mes amis du Cogmaster. Gabrielle et Antoine, c'est grâce à vous que j'ai commencé à aimer Paris et à m'y sentir chez moi. Maud, merci pour ta générosité sans borne, pour m'avoir offert un toit, pour ton énergie sans limite qui m'a donné de la motivation dans les premiers moments de rédaction. Tristan, Lise, Camille, Victor, merci pour les soirées entre amis et les partages. Merci également à mes co-fondateurs de cogni'junior : Héloïse, Roselyne, Alicia, Jessica, Adeline et Romain. Merci pour cette aventure qui encore aujourd'hui nourrit chaque instant de mon chemin d'enseignante.

Merci à Frédérique de Vignemont et Pierre Jacob pour l'encadrement de mes mémoires du Cogmaster. Cette thèse est nourrie de vos conseils et de mon parcours à vos côtés.

Merci à Roland Jouvent et Elise Lallart de m'avoir accueillie et fait découvrir le monde de la neuropsychiatrie et de la réalité virtuelle.

Merci à Rob Whitwell et James Enns pour m’avoir acceptée à UBC les bras ouverts et pour avoir monté un beau projet de recherche avec moi. Vous m’avez permis d’ouvrir mes perspectives de recherche et de mieux définir mes propos.

Merci à tous mes amis, toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont rendu ces années de thèses heureuses à vivre entre Paris, Toulouse, Montpellier, Saint Etienne et Vancouver.

Je remercie ma super famille pour tout l’amour, le soutien et le bonheur dont vous m’entourez. Merci Sylvie, Lionel, Séverine, Lucile, Stanislas, Ludivine, Fabien. Mention spécial à Stanislas : merci pour notre connexion unique et précieuse.

Merci à mon papa et ma maman pour m’avoir éduquée, élevée, supportée sans conditions avec tellement d’amour et de tendresse, et fait devenir la personne heureuse et épanouie que je suis aujourd’hui. Vous êtes parfaits. Merci à ma petite sœur pour la personne extraordinaire que tu es devenue et, même si on ne voit pas assez souvent, pour être ma partenaire de voyage (dans tous les sens du terme) préférée. Je vous aime de tout mon cœur.

Je remercie sincèrement les membres de mon jury de thèse de me faire l’honneur d’évaluer mon travail. Merci à Charles Lenay et Arnaud Badets d’avoir accepté d’être mes rapporteurs, et merci à Rémy Versace et Michel-Ange Amorim d’avoir accepté d’être examinateurs.

FINANCEMENT

Cette thèse a été financée par une bourse de recherche de l'Ecole Doctorale 566 « Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain » (Université Paris Saclay, Paris Descartes et Paris Nanterre) obtenue à l'issue d'un concours de contrats doctoraux. Elle a été réalisée au sein de l'équipe de psychologie Affects, Cognitions, Actions du Centre de Recherches sur le Sport et le Mouvement – CERSM (EA2931), à l'UFR STAPS de l'université Paris-Nanterre.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
FINANCEMENT	iv
Introduction.....	1
1. Partie théorique	5
CHAPITRE 1.1 : ACTION ET PERCEPTION SPATIALE : DE LA DISTINCTION RADICALE DU MODELE CLASSIQUE A L'UNITE RADICALE DE LA COGNITION INCARNEE ET SITUEE	6
1. L'approche « classique » cognitiviste	7
2. L'approche incarnée et située	10
CHAPITRE 1.2 : DU RÔLE DE L'ACTION DANS LA GENESE DE LA PERCEPTION SPATIALE : ETUDES AUTOUR DE LA SUBSTITUTION SENSORIELLE	16
1. Du problème de Molyneux au problème de la substitution sensorielle.....	18
1.1. Le problème de Molyneux dans le contexte empiriste	18
1.2. Expériences en lien avec le problème de Molyneux	23
1.2.1. William Cheselden.....	23
1.2.2. Les études de cas de Wallace et de Jeannerod.....	24
1.2.3. Le projet Prakāsh	27
1.3. Conclusion sur Molyneux et la perception visuelle.....	28
2. Les dispositifs de substitution sensorielle : présentation	29
2.1. Fonctionnement des dispositifs de substitution sensorielle.....	29
2.2. Quelques résultats et thèmes abordés	33
2.2.1. Plasticité cérébrale et apprentissage	33
2.2.2. L'intermodalité : la définition des sens et de la perception	36
2.2.3. Que permet la substitution sensorielle	39
2.2.4. L'échec phénoménologique.....	40
3. Attribution distale et action : élaboration de la question dans les dispositifs de substitution sensorielle	42
3.1. Attribution distale et perception distale.....	42
3.2. Les cinq étapes de l'appropriation d'un dispositif de substitution sensorielle d'Auvray	45
3.3. La nécessité du mouvement pour l'acquisition d'une perception distale	48

3.3.1.	<i>La nécessité du mouvement dans la substitution sensorielle.....</i>	48
3.3.2.	<i>Dans la perception en général</i>	51
4.	Etablir le rôle constitutif de l'action pour l'émergence de la perception distale dans les dispositifs de substitution sensorielle.....	54
4.1.	Réfuter l'hypothèse de la spatialité des retours sensoriels : les dispositifs minimalistes	55
4.2.	Réfuter l'hypothèse d'une contingence entre flux vibrotactile et mouvements	57
CHAPITRE 1.3 : EXPLIQUER L'ATTRIBUTION DISTALE PAR UN MECANISME SENSORIMOTEUR.....		60
1.	Définition et explication du processus	61
1.1.	Définition du processus sensorimoteur : le lien entre sensations et retours sensoriels.	61
1.1.1.	<i>Gibson : les invariants sensorimoteurs pour définir le rôle de l'action dans l'attribution distale.....</i>	62
1.1.2.	<i>La théorie sensorimotrice d'O'Regan et Noë.....</i>	66
1.2.	Préciser le processus sensorimoteur dans la substitution sensorielle : les hypothèses dans la littérature.....	71
1.2.1.	<i>La loi de triangulation.....</i>	72
1.2.1.1.	La loi de triangulation : une loi de contingence sensorimotrice	72
1.2.1.2.	Expérience perceptive ou inférence cognitive ?	73
1.2.1.3.	Une calibration de l'action organisée fonctionnellement : une invalidation de la loi de triangulation ?.....	77
1.2.2.	<i>Différence entre contingences sensorimotrices liées à l'appareil et contingences sensorimotrices liées à l'objet.....</i>	82
2.	Préciser les contingences sensorimotrices en jeu dans l'attribution distale : le rôle charnière de la proprioception	86
2.1.	La règle de réversibilité de Poincaré	87
2.2.1.	<i>Proprioception et construction de l'espace.....</i>	90
2.2.2.	<i>Proprioception et construction de l'espace dans la substitution sensorielle</i>	93
3.	Des contingences sensorimotrices à la perception distale : la construction de l'espace pour l'individu.....	95
3.1.	Au-delà du sensorimoteur : le but de l'action et le couplage sujet-environnement ..	95
3.2.	Ambiguïtés et limites de l'approche sensorimotrice	99
CHAPITRE 1.4 : EXPLIQUER L'ATTRIBUTION DISTALE PAR UN MECANISME IDEOMOTEUR.....		102
1.	Du mécanisme idéomoteur dans l'attribution distale	104
1.1.	Définition du mécanisme idéomoteur.....	104

1.1.1.	<i>Principe général : historique et définition</i>	104
1.1.1.1.	Historique : du réflexe cérébral au mécanisme général de l'idéomoteur	104
1.1.1.2.	Les deux phases de la mise en place du mécanisme idéomoteur	107
1.1.2.	<i>Paradigmes expérimentaux</i>	109
1.1.2.1.	Première démonstration expérimentale du mécanisme idéomoteur : Greenwald (1970).....	109
1.1.2.2.	Les deux phases du mécanisme : Elsner et Hommel (2001)	110
1.1.2.3.	Distinguer l'effet du stimulus : Kunde (2001).....	112
1.1.3.	<i>La théorie du codage des événements (Theory of Event Coding : TEC) : version moderne des théories idéomotrices</i>	113
1.2.	Un mécanisme d'attribution distale ? Les deux phases du mécanisme idéomoteur dans la substitution sensorielle.....	117
1.3.	Le statut de l'effet et de sa perception : espace et événements distaux	119
1.3.1.	<i>Avantage des événements distaux sur les événements proximaux</i>	120
1.3.2.	<i>Événements distaux et proximaux dans la substitution sensorielle</i>	123
2.	Représenter les théories idéomotrices	127
2.1.	Distinguer sensation et perception dans le mécanisme idéomoteur	127
2.2.	L'impact du mécanisme idéomoteur sur la perception.....	131
3.	Problématique et hypothèse	133
	2. Partie expérimentale	138
2.1.	Présentation de l'article soumis le 8 mars 2018 : Lestage, Camus, Dru, et Brouillet (submitted). How movements shape the spatial representation of their effects: about the dynamic character of the ideomotor bidirectional association, <i>Quarterly Journal of Experimental Psychology</i>.	139
2.2.	Présentation de l'article (<i>short paper</i>) en attente d'envoi : Lestage, Coutté, Camus, et Brouillet. When sounds move in space: About the correlative variation between movements and the spatial representation of effects in an ideomotor association.....	174
	3. Discussion	190
3.1 :	SYNTHESE DE NOS ETUDES ET LIMITES	191
2.	Limite des interprétations	197
2.1.	<i>Les biais de demande dans les expériences sur la perception</i>	197
2.2.	<i>Processus perceptifs ou processus de mémoire ?</i>	199
1.2.3.	<i>Mouvements réalisés ou imaginés ?</i>	200
3.	Perspectives théoriques.....	201
3.2 :	OUVERTURE : PROJETS FUTURS	206
1.	Tester d'autres propriétés du mouvement	206

2. Mouvement « réel » versus mouvement « imaginé »	207
Conclusion	212
LEXIQUE	214
BIBLIOGRAPHIE.....	216
Annexes	231
Apport des modèles bayésiens de la perception pour expliquer le rôle de l'action dans l'attribution distale (Briscoe, unpublished)	232
Perspectives neuroscientifiques sur la coordination perception-action (PAC)	243
TABLEAUX EXCEL DES DONNES BRUTS POUR CHAQUE EXPERIENCE ...	250

Introduction

Pourquoi et comment acquérons-nous une perception spatiale en trois dimensions ? A la question du « pourquoi », l'intuition suggère que nous possédons une perception spatialisée en trois dimensions « simplement » parce que le monde externe est spatialisé en trois dimensions : nous évoluons dans un monde tridimensionnel et notre perception reflète cette réalité. A la question du « comment », la réponse apparaît tout aussi triviale : la perception spatiale tridimensionnelle est le résultat d'un mécanisme de reconstruction de l'espace extérieur par notre système visuel, qui va des yeux au cortex visuel. L'étude biologique de ce système visuel semble confirmer cette approche en expliquant la perception tridimensionnelle par la disparité binoculaire : le traitement par le cerveau du décalage horizontal entre les deux images rétiniennes d'un même objet expliquerait la perception visuelle du relief.

Ces explications ne sont pas satisfaisantes. Tout d'abord, la perception spatiale tridimensionnelle n'est pas limitée à la perception visuelle : les individus non-voyants de naissance possèdent bien une notion de l'espace en trois dimensions sans jamais avoir eu l'usage la vision. Toute tentative d'explication de la notion de perception ne peut donc se limiter au système visuel : voir n'est pas l'équivalent de percevoir. La perception de la profondeur implique plus que les seules propriétés des yeux et des aires visuelles dans le cerveau.

La perception spatiale désigne les processus cognitifs permettant d'évaluer la position des objets dans l'espace distal et de comprendre leurs relations dans l'environnement. Si ces objets sont situés à distance de l'observateur dans son environnement extérieur, on parle alors dans ce cas de perception *distale*. Il est important dès ce point de comprendre que nous emploierons dans cette thèse le terme de perception *spatiale* pour référer à deux espaces : soit l'espace du corps, soit l'espace extérieur. La perception *distale* qualifie le second type de perception spatiale. La localisation spatiale des inputs sensoriels sera toujours considérée en tant que sens relative à la perception des positions relatives des différentes parties du corps – et en ce sens ne réfère qu'au premier type de perception spatiale. Expliquer la genèse et le fonctionnement de la perception spatiale tridimensionnelle, ou perception distale, est bien moins trivial que ce que l'intuition pourrait suggérer. Les questions posées par la perception spatiale tridimensionnelle – tout comme la perception en général – s'inscrivent dans le problème plus général du dualisme corps-esprit, qu'on peut renommer aujourd'hui le problème cerveau-pensée. Comment une distance extérieure, inscrite dans un monde physique

stable, tangible et universel, peut être vécue comme changeante et particulière aux individus ? Par exemple, un même trajet effectué tous les matins peut paraître plus ou moins long selon les individus et selon le contexte (charge de travail, état physiologique, préoccupations personnelles). Comment s'effectue le passage d'un monde extérieur objectif, palpable et avec des références communes, à un monde intérieur fluctuant, invisible et unique ? Comment passe-t-on de la matière à la pensée ? Et comment, par la pensée, peut-on agir avec un corps matériel sur ce monde extérieur ?

Si l'on reconnaît que l'occurrence de la perception en trois dimensions est plus qu'un phénomène visuel de reconstruction du monde, alors un grand nombre de théories classiques de la perception échoue à en rendre compte. De par la réduction de la perception à la vision et à un ensemble hiérarchique d'étapes conduisant de processus physiologiques de bas niveau à des processus cognitifs de haut niveau, ces théories passent à côté d'un aspect essentiel de la perception : son lien inhérent avec l'action. Des études relativement récentes – d'ailleurs de plus en plus nombreuses – mettent en avant l'importance de l'action pour la perception. L'action modèlerait la perception ; plus généralement, la cognition dans son ensemble serait incarnée dans le corps et distribuée dans l'environnement. Se posent alors plusieurs questions : Quelle est la nature de ces liens entre action et perception ? Comment s'enchevêtrent-ils ? Quels supports empiriques exhibent leurs interactions mutuelles ?

Notre point de départ pour investiguer la genèse et le fonctionnement de la perception spatiale tridimensionnelle, dans ses liens avec l'action, est la substitution sensorielle. Ces dispositifs, conçus pour les non-voyants et les malvoyants, permettent à des individus d'acquérir une sorte de perception spatiale tridimensionnelle possédant certaines propriétés de la vision – comme la capacité à dénommer et localiser des objets situés à distance dans l'espace. Leur fonctionnement consiste à transcrire des images enregistrées par une caméra en stimuli propres à une autre modalité sensorielle que la vision, comme le toucher ou l'audition. Nous nous intéressons plus particulièrement à un moment particulier dans l'apprentissage de ces dispositifs : l'attribution distale. Il s'agit du moment où les stimuli proximaux délivrés par le dispositif (impulsions tactiles ou sons) ne sont plus perçus comme tels par les utilisateurs mais acquièrent un véritable sens perceptif et sont alors considérés en relation directe aux objets contenus dans l'espace ; de la même manière que lorsque nous entendons le son causé par une voiture, nous identifions ce son comme « voiture » située à une certaine distance et non comme bruit à l'intensité et à la fréquence particulière. L'attribution distale a été jusqu'à

aujourd'hui étudiée dans le cadre des théories sensorimotrices. Celles-ci sont parvenues à établir le rôle nécessaire et constitutif du lien entre les mouvements de l'utilisateur (qu'il effectue avec la caméra du dispositif) et les sensations qu'il reçoit du dispositif. Néanmoins, elles laissent de côté la question de savoir comment une perception spatiale tridimensionnelle émerge à partir de ce lien mouvements-sensations. D'un autre côté, il existe un champ théorique qui cherche à investiguer ce lien entre les mouvements et leurs conséquences sensorielles : les théories idéomotrices. Si celles-ci ne se sont pas directement intéressées à la substitution sensorielle, elles ont notamment établi que des mouvements associés de manière répétée à des mêmes effets sensoriels ont pour conséquence la création d'un lien bidirectionnel, grâce auquel la sélection de l'action à réaliser est fonction de l'effet attendu. Bien que ces résultats aient surtout été exploités dans le domaine du contrôle de l'action, nous pensons qu'ils présentent un intérêt certain pour la compréhension de l'attribution distale. Comment l'association bidirectionnelle idéomotrice entre des mouvements et leurs effets sensoriels peut-elle contribuer à une meilleure compréhension du passage entre sensations proximales et perception distale ?

Les différents chapitres de cette thèse ont été conçus de façon à présenter le cheminement conceptuel qui nous a menés à l'idée selon laquelle la perception distale pourrait être un phénomène résultant du lien bidirectionnel qui unit les mouvements à leurs conséquences sensorielles. La thèse que nous défendons est que l'attribution de caractéristiques distales (en tant que spatialisation en trois dimensions de l'objet de perception) à des sensations proximales est une construction dépendante d'un processus idéomoteur. Plus précisément, nous avançons deux hypothèses solidaires : 1/ l'association bidirectionnelle mouvement-conséquences sensorielle est constitutive du caractère distal de l'objet de perception ; 2/ la spatialisation de tout objet perceptif est déterminée par les propriétés physiques du mouvement qui le constitue.

La partie théorique de ce manuscrit de thèse est divisée en quatre chapitres. **Le premier chapitre** introduit les principales approches concernant le lien perception-action. Il oppose une approche cognitiviste classique où perception et action sont abordées selon une distinction radicale, à une approche « incarnée » où les liens entre perception et action oscillent entre interaction modérée et unité fonctionnelle. Ce chapitre a pour but de poser le cadre dans lequel s'inscrit notre investigation. **Le deuxième chapitre** s'intéresse à la substitution sensorielle et au rôle de l'action dans l'attribution distale. Il introduit ce sujet par

le problème de Molyneux, qui permet de comprendre la place de l'action dans la perception du monde pour les non-voyants. Les principaux dispositifs et leur fonctionnement sont présentés, ainsi que les principaux résultats ayant émergé des études autour de la substitution. Le phénomène de l'attribution distale permet d'établir le rôle nécessaire du mouvement pour l'émergence de la perception spatiale tridimensionnelle. **Le troisième chapitre** s'attache à comprendre ce lien entre mouvements et attribution distale grâce aux théories sensorimotrices. Les apports et les limites de ce champ sont complétés par les théories idéomotrices, développées dans **le quatrième chapitre**. Les conclusions à l'issue de cette investigation théorique nous amènent à penser que l'attribution distale est en lien avec le processus idéomoteur d'association bidirectionnelle.

La partie expérimentale présente les travaux qui ont été menés afin de tester cette hypothèse. Elle consiste en deux articles scientifiques. L'un a été soumis dans le *Quarterly journal of Experimental Psychology* le 8 mars 2018. Le second est en attente de soumission dépendamment des retours du premier. Ils représentent en tout : une pré-expérience qui réplique les travaux de Kunde (2001, 40 participants) ; une expérience qui teste les conditions limites dans lesquelles l'effet que nous recherchons est susceptible de se produire (3 conditions expérimentales pour 108 participants) ; une expérience qui teste concrètement notre hypothèse principale (2 conditions expérimentales pour 96 sujets) et enfin une dernière expérience qui généralise notre hypothèse à d'autres conditions (2 conditions expérimentales pour 98 participants). Nous ne mentionnons pas dans ce manuscrit les expériences réalisées en première année de thèse car ces dernières n'ont pas été concluantes malgré les plus de 200 participants testés.

La partie discussion propose de revenir sur les résultats obtenus : leurs limites expérimentales et théoriques, ainsi que leurs ouvertures vers de nouveaux projets en cours d'élaboration.

1. Partie théorique

CHAPITRE 1.1

ACTION ET PERCEPTION SPATIALE : DE LA
DISTINCTION RADICALE DU MODELE CLASSIQUE A
L'UNITE RADICALE DE LA COGNITION INCARNEE ET
SITUEE

Ce chapitre introductif a pour but de présenter les différentes approches du lien entre la perception et l'action. La question de l'action est généralement absente des modèles de la perception ; pourtant, affirmer que l'action est liée à la perception est une proposition difficilement réfutable qui relève du truisme. En effet, la perception est indéniablement liée à l'action dans la mesure où nos actions sont pour le moins causées, ou justifiées, par la perception : je vois un animal dangereux, je cours. Le vrai débat concerne la façon dont ce lien est organisé.

L'approche cognitive « classique » considère la perception et l'action comme deux entités bien distinctes liées indirectement au travers de processus cognitifs indépendants. Implicitement, cette approche s'ancre dans une version moderne du dualisme cartésien où corps et cerveau sont considérés comme deux processus et deux champs d'études divergents. A cette version « radicale » de la séparation entre perception et action s'oppose le courant de la cognition incarnée et située, qui postule que perception et action sont au moins en interaction, voire même analogiques. Nous allons maintenant présenter ces différentes positions afin de contextualiser notre réflexion théorique.

1. L'approche « classique » cognitive

Selon une approche classique et intuitive, la fonction de la perception peut sembler évidente : elle sert à nous apporter de la connaissance concernant le monde, à construire l'information qui sera utilisée pour la compréhension et la conscience de ce monde. Selon cette approche la relation entre la perception et l'action est indirecte : la perception rend disponible le champ des actions permis par la connaissance ; nous adaptons ce que nous faisons en conséquence des choses que nous percevons. Par exemple, je peux souhaiter saisir un objet parce que quelque chose dans la manière dont il est perçu m'en donne l'envie (par exemple, une odeur agréable) et je le saisis effectivement parce que la vision dirige mes mouvements vers lui. En conséquence, la perception et l'action sont liées indirectement dans la mesure où la perception donne en premier lieu de l'information, information transposée en connaissance ensuite utilisée pour planifier et effectuer une action. Cette approche réfère à ce que Hurley (2001) appelle le modèle du « sandwich classique ». Selon ce modèle, la perception et l'action sont considérées comme séparées l'une de l'autre et périphériques de la

cognition. Celle-ci est l'interface entre les deux : elle est le contenu du sandwich. L'esprit est conçu comme structuré verticalement et modulairement (cf. Figure 1).

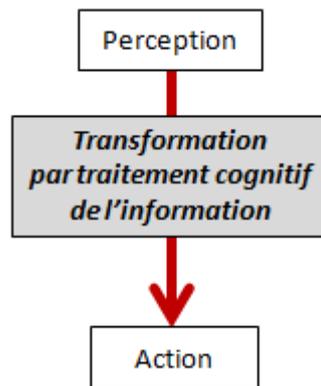


Figure 1 : Illustration du « modèle sandwich » (Hurley, 2001)

La majorité des études sur la perception en psychologie s'inscrivent dans ce « modèle sandwich », bien qu'elles prennent rarement la peine de le questionner ou encore même de le rendre explicite. En effet, ces études sont principalement intéressées par la machinerie que sous-entend ce modèle. En conséquence, bien qu'elles reconnaissent que la perception et la planification de l'action puissent être en interaction dans un grand nombre de situations naturelles, ces approches tendent à considérer les processus perceptifs de manière séparée – c'est-à-dire comme plus ou moins indépendants des processus de planification de l'action et du contrôle de l'action.

The perceptual system registers and constructs meaning for sensory events, while the action system formulates and executes motor commands. The two systems have no essential contact with one another, and they provide separate research areas. (Hurley 2001, p.11)

Historiquement, l'origine de cette approche se trouve chez Descartes (1964). La fameuse distinction cartésienne entre l'âme et le corps implique en effet que les actions soient comprises comme le résultat de la perception des événements. Le lien entre des « mouvements de l'âme » d'une essence purement immatérielle et des « mouvements du corps » inscrits au niveau biologique a lieu dans et par la glande pinéale – qui joue le rôle de transformation visuo-motrice selon le modèle sandwich. Depuis Descartes et pendant trois siècles et demi, un des problèmes ontologiques fondamentaux à résoudre par la philosophie et la psychologie a été le problème du rapport entre le corps et l'esprit. Il existe deux solutions

principales à ce problème : le dualisme ontologique et le monisme physicaliste. Le premier nie et le second affirme l'identité entre les choses mentales et les choses physiques². Le développement des sciences cognitives dans les années 1960 a donné un nouveau tournant à cette opposition entre matière et esprit. De par l'analogie entre le cerveau humain et l'ordinateur, les sciences cognitives ont fait émerger une identité physicaliste entre le cerveau et l'esprit : le modèle computationnel de l'esprit. Selon ce modèle, tous les processus cognitifs sont des processus exécutables par une machine physique (le cerveau) dotée d'un programme informatique qui traite de l'information. L'approche cognitiviste computationnelle, de par sa réduction de l'esprit au cerveau, rompt avec un dualisme séparant la matière de l'esprit et satisfait les exigences ontologiques du physicalisme. En revanche, ce réductionnisme doublé de l'analogie entre la pensée et le traitement d'informations implique un « nouveau » dualisme : celui entre le cerveau et le corps. Du dualisme corps-esprit, on est passé à un dualisme corps-cerveau.

L'approche cognitiviste de la relation entre perception et action découlant de ce nouveau dualisme est qualifiée par Hurley d'approche « Entrée-Sortie » (« the Input-Output Picture »). Selon celle-ci, la perception est une entrée du monde qui fournit des données au cerveau et l'action une sortie du cerveau dans le monde sélectionnée en fonction des données reçues – c'est-à-dire des stimuli perçus. En d'autres termes, une entrée environnementale provoque une sortie comportementale. Ce modèle explique la prévalence de la perception dans la recherche en psychologie, considérée comme « la fonction primaire et dominante », tandis que l'action est reléguée au rang de simple sortie, un sous-produit de l'activité mentale. Les études expérimentales ont donc en conséquence été davantage focalisées sur la perception alors que l'action a été au contraire mise de côté (comme le montrent MacKay, 1987 et Gallistel, 1980). De manière générale, ces deux systèmes ont été longtemps considérés comme deux champs de recherche bien distincts.

Selon cette approche, la perception est assimilée à l'ensemble des stimuli présents dans l'environnement tandis que les actions sont pour leur part assimilées à des réactions, c'est-à-dire des réponses déclenchées par des stimuli. La présentation des stimuli (la perception) est alors une condition nécessaire et suffisante pour déclencher la réponse appropriée. Quant à l'action, elle est la conséquence causale de la stimulation.

² Le modèle sandwich est en accord avec la première solution.

2. L'approche incarnée et située

Lorsqu'Hurley (2001) présente le modèle sandwich, c'est en fait dans le but de le critiquer. Elle souligne que ces dernières années – depuis environ les années quatre-vingt – ont témoigné d'un changement de paradigme. Selon elle, le rejet de la tradition d'une distinction inégale entre la perception et l'action est devenu presque « à la mode ». Certains affirment qu'elles sont inséparables (MacKay, 1987 ; Trevarthen, 1978), que le mouvement fait partie du processus perceptif (Jeannerod, 1979), que la conscience est structurée par l'action (Allport, 1987), ou encore que le comportement moteur est essentiel à la perception (Edelman, 1989 ; Llinas, 1987). Tous défendent l'idée que les processus cognitifs – parmi lesquelles la perception et l'action – sont « fonctionnellement horizontaux et modulaires dans leur structure », que les processus perceptifs et moteurs sont couplés et que le système dans son ensemble est couplé à l'environnement. Cette approche réfère aux théories de la cognition incarnée et située. La cognition n'est pas seulement implantée dans le cerveau, mais aussi dans le corps et même l'environnement. Aujourd'hui, cette approche gagne en popularité. Du moins il est reconnu que l'action et les manifestations du corps ne peuvent plus être mises à part. Comme le dit Prinz (2006), la version cartésienne d'un esprit associé au seul cerveau est aujourd'hui dépassée par la conception plus dynamique de l'esprit comme système incluant le cerveau, le corps et l'environnement : « *Mind doesn't supervene on the brain, as Cartesian materialists would suppose, but rather on a dynamical system containing brain, body, and things surrounding the body* » (Prinz, 2006, p.2).

Historiquement, on peut dater l'émergence du mouvement de la cognition incarnée et située aux années quatre-vingt dix (Varela, Thompson, & Rosch, 1993). Ce courant, inspiré de la phénoménologie de Merleau-Ponty et du bouddhisme, met l'accent sur la manière dont l'individu se construit à travers son interaction avec l'environnement.

Par le mot incarné, nous voulons souligner deux points : tout d'abord, la cognition dépend des types d'expérience qui découlent du fait d'avoir un corps doté de diverses capacités sensori-motrices ; en second lieu, ces capacités individuelles sensori-motrices s'inscrivent elles-mêmes dans un contexte biologique, psychologique et culturel plus large. (Varela, Thompson, & Rosch, 1993, p.235)

Cette approche holistique de la cognition située dans un corps et dans un environnement met l'accent sur les *relations* entre les phénomènes plutôt que sur les phénomènes eux-

mêmes. Au lieu de « disséquer » la perception et l'action séparément en processus hiérarchiques compartimentés, cette approche aborde avant tout leurs interactions, la manière dont ces deux instances sont liées pour former la cognition de l'individu. Ce lien est qualifié de « sensori-moteur » en référence aux influences réciproques des systèmes moteurs et des systèmes sensoriels. Non seulement ce lien sensori-moteur entre perception et action est direct, mais de plus il définit la manière dont le sujet perçoit et agit.

Le point de départ de l'approche propre à l'enaction est l'étude de la manière dont le sujet percevant parvient à guider ses actions dans sa situation locale. Dans la mesure où ces situations locales se transforment constamment à la suite de l'activité même du sujet percevant, le point de référence nécessaire pour comprendre la perception n'est plus un monde prédonné, indépendant du sujet de la perception, mais la structure sensori-motrice du sujet (la manière dont le système nerveux relie les surfaces sensorielles et motrices). C'est cette structure – la façon dont le sujet percevant est inscrit dans un corps -, plutôt qu'un monde préétabli, qui détermine comment le sujet peut agir et être modulé par les événements de l'environnement. (Ibid., p.236)

Actions et perceptions ne sont donc plus comprises comme des données passives du monde, mais comme des boucles rétroactives où les activités motrices ont des conséquences sensorielles et les activités sensorielles ont des conséquences motrices. (Varela, 1988) (Cf. Figure 2)

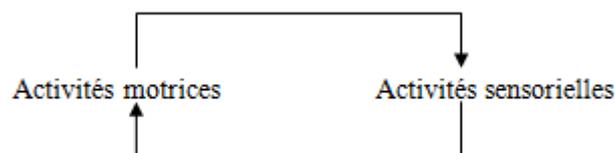


Figure 2 : Boucle sensori-motrice (Varela, 1988, p.27)

Pour Noë (2006, p.1), percevoir est une manière d'agir : « *The main idea [...] is that perceiving is a way of acting. Perception is not something that happens to us, or in us. It is something we do. [...] Perceptual experience acquires content thanks to our possession of bodily skills* ». L'approche « entrée-sortie » du cognitivisme classique est ainsi dépassée ; il n'y a plus d'« entrée » ou de « sortie » dans la mesure où il n'y a plus de distinction entre cause et effet de la perception – l'effet est intégré à la cause : « *perceptual content depends*

neither on input nor on output alone, but on dynamic feedback relations between input and output” (Hurley 2001, p.22).

Les adversaires de la version computationnelle du neurocentrisme font valoir que de nombreuses données expérimentales en sciences cognitives démontrent que des tâches cognitives de haut niveau mobilisent des activités dans les aires motrices, prémotrices et sensorielles du cerveau. Par exemple, Pulvermüller (2005) rapporte que lorsque des participants perçoivent les verbes d'action anglais ‘*to lick*’ (lécher), ‘*to pick*’ (pincer) et ‘*to kick*’ (donner un coup de pied), on observe des activités dans leur système moteur qui sont conformes à la représentation somatotopique des parties du corps humains impliquées par les actions décrites par ces verbes. Dans le même registre, Sato, Cattaneo, Rizzolatti, et Gallese (2007) ont utilisé la stimulation magnétique transcranienne pour étudier les changements d’excitabilité des muscles des doigts lorsque les participants effectuent des tâches de comparaison numérique entre des nombres situés entre 1 et 9. Ils rapportent une excitabilité spécifique des muscles de la main droite seulement lorsque les sujets comparent la cardinalité de nombres inférieurs à 5. Ils interprètent leurs résultats en termes d’une « *finger embodiment strategy* » sous-jacente à la représentation des petits nombres. Plus récemment, Mathôt, Grainger, et Strijkers (2017) ont montré que la taille des pupilles de participants est davantage réduite lorsqu’ils lisent ou écoutent des mots associés à la luminosité (e.g. *soleil*) que lorsqu’ils lisent ou écoutent des mots associés à l’obscurité (e.g. *nuit*). Ces résultats indiquent que la compréhension d’un mot est suffisante pour provoquer l’activation de processus sensori-moteurs et peut ainsi provoquer une réponse involontaire. Cela suggère que l’environnement corporel du cerveau n’influence pas uniquement les processus perceptifs, mais également les processus cognitifs de haut niveau (langage, raisonnement, cognition sociale, etc.).

Comme signalé en introduction, notre intérêt concerne un type particulier de perception qui est la perception spatiale tridimensionnelle. Avant de nous engager plus en avant sur une investigation de cette perception, nous voudrions apporter quelques nuances et précisions concernant les théories de la cognition incarnée et située.

Tout d’abord, affirmer un lien entre la cognition et le corps ne suffit pas à définir une théorie de la cognition *incarnée*. Comme Goldman et de Vignemont (2009) le soulignent, dire qu’un processus cognitif est incarné s’il est localisé dans le corps d’un individu n’est pas en soi contradictoire avec une approche physicaliste neurocentriste (y compris dans sa version

computationnelle), selon laquelle les processus cognitifs sont des processus cérébraux. En effet, le neurocentrisme physicaliste ne nie pas que la cognition ait lieu dans le corps puisque le corps inclut le cerveau. Une théorie énonciviste doit donc rendre compte de l'importance du corps (Clark, 2008).

The question is whether attention to details of embodiment and embedding contributes something important and previously unexpected to an understanding of mind and reason, not whether it contributes at all. (Clark 2008, pp.38-39).

Deuxièmement, comme l'a fait observer Clark, la cognition incarnée peut être plus ou moins inclusive selon si elle considère ou non l'environnement – selon si l'esprit est étudié dans une interaction duale avec le corps ou dans une relation ternaire avec le corps et l'environnement. Dans le second cas, on parle de cognition « située ».

There is a certain tension [...] between two strands of thought prominent in the recent literature on the embodied, embedded mind. One of those strands depicts the body as intrinsically special, and the details of a creature's embodiment as a major and abiding constraint on the nature of its mind: a kind of new-wave body-centrism. The other depicts the body as just one element in a kind of equal-partners dance between brain, body and world, with the nature of the mind fixed by the overall balance thus achieved. (Ibid., pp.56-57).

La cognition incarnée (« *embodied* ») mettrait ainsi l'accent sur la relation *binaires* entre le cerveau d'un individu et son corps, tandis que la cognition située (« *embedded* ») (voir par exemple le concept de l'esprit étendu de Clark et Chalmers, 1998) présente une version de la cognition où l'esprit d'un individu est une relation *ternaire* entre son cerveau, son corps et l'environnement extra-corporel. L'environnement acquiert alors un véritable statut cognitif : *“this is the thesis of the extended mind: when parts of the environment are coupled to the brain in the right way, they become parts of the mind.”* (Chalmers, 2008, p.1) Tenir compte de l'environnement au même titre que du corps dans l'investigation de la perception permet notamment d'investiguer la question de la séparation phénoménale entre soi et le monde extérieur, indispensable lorsque l'on s'intéresse à la perception de l'espace.

Il faut également noter qu'aujourd'hui la cognition incarnée et située n'est pas une théorie, mais un regroupement de différentes approches et données expérimentales. Si toutes

trouvent leur point d’ancrage dans l’affirmation du lien direct et fort entre l’esprit de l’individu et son corps, la nature de ce lien se décline de plusieurs façons. Certains partisans d’une théorie de la cognition incarnée et située « radicale » vont jusqu’à affirmer l’identité fonctionnelle entre perception et action, tandis que d’autres approches insistent davantage sur l’interaction perception-action dont émerge le monde de l’individu (cf. Figure 3).

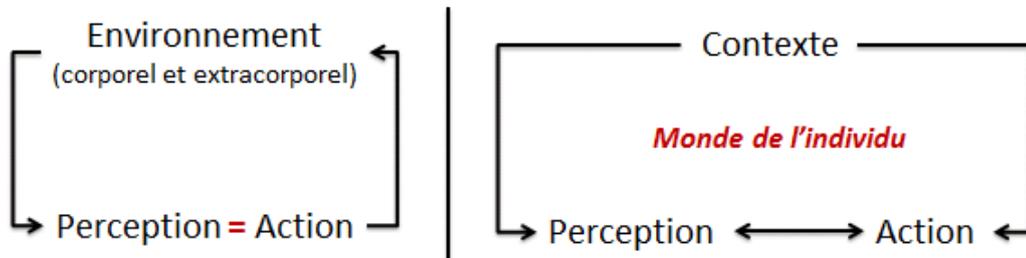


Figure 3 : A gauche : schéma d'une vision radicale de la cognition incarnée et située où perception et action sont conçues comme identiques et interagissent avec l'environnement. A droite : schéma d'une vision interactive de la cognition incarnée et située où perception et action s'influencent réciproquement en fonction du contexte pour former le monde de l'individu

Nous avons choisi de nous intéresser à ce lien perception-action dans le cadre de la genèse de la perception spatiale tridimensionnelle. En effet, la perception spatiale en trois dimensions implique la capacité de localiser des objets comme extérieurs à soi, dans l’espace. Cette « distalité » de la perception est au cœur de notre question initiale concernant le passage d’un monde extérieur stable et universel vers un monde intérieur instable et particulier. Quel est alors le rôle de l’action dans le développement de cette perception ? L’étude de l’ontogenèse de la perception spatiale tridimensionnelle permet difficilement de répondre à cette question : il est en effet difficile d’isoler les éléments nécessaires à la formation d’une perception si spécifique et en même temps si large. La raison en est que le nouveau-né développe sa perception de l’espace dans l’espace : les objets sont construits perceptivement comme déjà-distaux.

Chez l’individu normal, la perception de l’espace est avant tout assimilée à la perception visuelle ; il semblerait qu’elle en soit la propriété majeure. En effet, toute scène visuelle n’a de sens perceptivement que si elle est spatialisée. Pour autant, les perceptions auditive et tactile possèdent bien des caractéristiques spatiales : nous entendons des sons provenant de différentes locations, et nous ressentons des impulsions tactiles sur différentes parties du corps. En revanche, contrairement à la vision, cette spatialité n’est pas nécessairement distale

– elle peut être en une ou deux dimensions, comme c'est le cas pour certaines perceptions tactiles limitées à l'espace de la peau. C'est pourquoi nous avons centré notre investigation de la genèse de la perception spatiale tridimensionnelle sur les personnes non-voyantes. Plus particulièrement, nous nous sommes intéressées à l'acquisition d'une perception distale de type visuelle chez les individus non-voyants. Au XVIIIème siècle, les philosophes empiristes se sont demandés ce qu'il adviendrait à un individu non-voyant recouvrant subitement la vue : serait-il capable de percevoir des objets à distance ? Discutée initialement autour du problème de Molyneux, cette question atteint de nouvelles perspectives avec les avancées expérimentales de l'ophtalmologie. Plus récemment, elle trouve un nouveau champ d'investigation avec le développement de la substitution sensorielle : l'ensemble des technologies permettant aux non-voyants de développer une perception de type visuelle en utilisant d'autres sens que la vision.

CHAPITRE 1.2

DU RÔLE DE L'ACTION DANS LA GENESE DE LA PERCEPTION SPATIALE : ETUDES AUTOUR DE LA SUBSTITUTION SENSORIELLE

Approximativement 285.000.000 personnes dans le monde sont aujourd'hui en situation de handicap visuel. Parmi elles, quarante millions sont aveugles. Ceci constitue un défi à la fois clinique et scientifique pour le développement de techniques effectives de réhabilitation visuelle (Mariot, 2010). En France, les chiffres de l'INSEE pour 2008 estiment le nombre de malvoyants à 1 200 000 et de non-voyants à 65000 (sur 63,7 millions d'habitants). Une personne dite « malvoyante » est une personne dont l'acuité visuelle du meilleur œil, après correction et à cinq mètres, est inférieure ou égale à $3/10^{\circ}$ (pour la France) ; ce seuil varie selon les pays et les provinces. Une personne dite « non voyante », ou atteinte de cécité, a une acuité visuelle inférieure à $1/20$. Il existe une très grande variété de déficiences visuelles, que l'on peut regrouper en deux catégories : soit le système visuel est atteint au niveau de l'œil, soit il est atteint au niveau du cortex (voir La classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé de l'OMS, 2001). Dans le second cas, on peut dire que la *sensation* visuelle est intacte et la *perception* visuelle défectueuse. En effet, la perception visuelle ne peut pas être définie biologiquement par la simple sensation visuelle : la sensation visuelle désigne la lumière qui frappe la rétine ; la perception visuelle désigne l'« objet » correspondant, « ce que je fais avec ».

Les personnes non-voyantes et malvoyantes perçoivent le monde extérieur en utilisant les autres modalités sensorielles que la vue, notamment le toucher et la proprioception. En revanche, contrairement à une idée commune, les déficients visuels n'ont pas nécessairement un « surdéveloppement » des autres sens. Grant, Thiagarajah, et Sathian (2000) ont conduit une étude sur des personnes non-voyantes et voyantes : il s'agissait d'apprécier la précision de la perception tactile des deux populations et d'établir un éventuel lien entre le handicap et les capacités sensorielles. Les résultats révèlent que les non-voyants obtiennent de meilleurs résultats que les voyants au début des tests, mais cet avantage diminue au cours du temps de pratique jusqu'à disparaître. L'avantage de début de test serait expliqué par l'habitude acquise du Braille.

Du problème de Molyneux au XVII^{ème} siècle à la substitution sensorielle du XX^{ème} siècle, les aveugles sont un terrain d'étude expérimental et théorique pour la perception spatiale. Ils interrogent la manière dont l'environnement peut être saisi autrement par les sens. Les différentes technologies développées pour pallier aux handicaps visuels nous offrent également une source d'investigation unique pour étudier la genèse de la perception spatiale tridimensionnelle.

1. Du problème de Molyneux au problème de la substitution sensorielle

1.1. Le problème de Molyneux dans le contexte empiriste

Historiquement, le problème de Molyneux marque le moment où l'on commence à remettre en cause la définition classique et intuitive de la perception³. Il permet notamment d'introduire la question du rôle de l'action sur la perception.

La question est adressée par William Molyneux à John Locke en 1688 ; intégrée par Locke dans sa seconde édition de l'*Essai* en 1694. Il s'agit de savoir si un non-voyant de naissance retrouvant subitement la vue serait visuellement capable de faire la différence entre un cube et une sphère sans les toucher.

Suppose a man born blind, and now adult, and taught by his touch to distinguish between a cube and a sphere of the same metal, and nighly of the same bigness, so as to tell, when he felt one and the other, which is the cube, which is the sphere. Suppose then the cube and the sphere placed on a table, and the blind man made to see: query, Whether by his sight, before he touched them, he could now distinguish and tell which is the globe, which the cube? (Locke, 1694, II, ix, p.8)

La question de Molyneux apparaît dans le Livre II de l'*Essai* de Locke consacré aux idées et dans le neuvième chapitre consacré à la perception. On remarque que le chapitre concernant la perception est inscrit dans un livre dédié aux idées ; ce sont *les idées données par la perception* qui sont étudiées, la perception pour elle-même n'est abordée que sous cet angle⁴.

La précision par Molyneux que l'homme est adulte n'est pas innocente : « adulte » implique une capacité réflexive développée et une expérience sensorielle acquise. L'homme

³ Il marque également le moment où la philosophie – à l'époque, la psychologie n'existe pas – commence à se détacher de la théologie.

⁴ Notons également que la question de Molyneux arrive « *à propos de* », elle n'est pas posée pour elle-même. Elle a une valeur d'exemple, d'illustration d'une théorie ; elle a également une valeur argumentative qui inclut le débat sur les idées innées et la théorie lockéenne sur l'architecture de l'entendement. En conséquent, elle a pour sujet l'esprit, et non le corps – ce qui n'est pas si évident si l'on analyse la question sans son contexte.

est « *accoutumé à distinguer par le toucher un cube d'une sphère* » (Locke, 1694). Or, « distinguer » signifie discerner par l'un des sens ou par une opération de l'esprit, ou bien séparer nettement une chose d'une autre selon ce qu'elle a de propre, de spécial. On a donc compris dans la question de Molyneux (1) la question de la capacité de l'homme à discerner le cube de la sphère par le sens qui lui est nouvellement rendu (question introduite par Condillac (1754) : est-ce que le système visuel fonctionne normalement ?) et (2) la question de sa capacité à discerner et nommer le cube de la sphère par l'entendement ou par la raison. Le contexte focalise la question de Molyneux sur ce deuxième point, puisque c'est ce qui passe dans l'esprit qui intéresse d'abord les philosophes à l'époque. Les deux questions s'appliquent également à l'existence de propriétés communes à la vue et au toucher. Si de telles propriétés existent, sont-elles discernables par le seul exercice des sens ou par celui de la capacité réflexive ? Enfin, il est important de noter que l'expérience concerne une sphère et un cube et non un rond et un cercle : le problème est en trois dimensions. La perception tridimensionnelle implique en effet des capacités sensorielles et réflexives absentes de celle en deux dimensions. Par exemple, la perspective peut-elle être visuellement perçue par un homme nouvellement rendu à la vue, et si non, a-t-il néanmoins la possibilité d'acquérir cette perception visuelle en raisonnant à partir de la définition de la perspective et de ce qu'il en connaît tactilement ? La tridimensionnalité complexifie ainsi le problème à un autre degré.

Dans le contexte de l'époque, la question a pour principal intérêt de fournir un champ d'investigation concernant le lien des modalités sensorielles entre elles, qui rejoint le thème de la rencontre des sens dans la perception : on se demande ce que la vue et le toucher ont en commun dans l'esprit. On se demande également si ce qu'il y a en commun entre les idées de la vue et les idées du toucher est inné. Rapportée à notre question de la perception spatiale, le problème de Molyneux nous met face à trois interrogations : la perception visuelle a-t-elle un caractère immédiatement spatial ? Différentes modalités sensorielles peuvent-elles être porteuses d'une information spatiale commune ? Nous serons également amenés à nous demander quel est le rôle joué par la motricité dans la construction de représentations spatiales visuelles ou tactiles (Pacherie, 1997).

Il est possible que Locke puisse envisager que le sujet soit effectivement capable de *voir* le cube et la sphère, sur un plan strictement sensoriel. Néanmoins, comme nous l'avons mentionné, ce n'est pas le mécanisme biologique de la vision qui l'intéresse mais les idées données par les sens. Locke demande donc plutôt si l'esprit serait capable de nommer ce qu'il

voit. Sa réponse est que lorsque l'homme aveugle voit à nouveau, il a exactement la même idée visuelle de la sphère et du cube qu'une personne voyante sauf qu'*il ne connaît pas les mots correspondant à cette idée*⁵.

A la suite de Locke, Condillac (1754) apporte au problème de Molyneux l'idée de caractère actif de la perception. Il souligne notamment la différence entre voir et regarder, qui repose avant tout sur l'idée d'analyse : regarder implique d'analyser ce qui est vu.

Il semble qu'on ne sache pas qu'il y a de la différence entre voir et regarder ; et cependant nous ne nous faisons pas des idées, aussitôt que nous voyons ; nous ne nous en faisons qu'autant que nous regardons et que nous regardons avec ordre, avec méthode. En un mot, il faut que nos yeux analysent : car ils ne saisiront pas l'ensemble de la figure la moins composée, s'ils n'en ont pas observé toutes les parties, séparément, l'une après l'autre, et dans l'ordre où elles sont entre elles. (Condillac, 1754, III, p. 170)

A travers le problème de Molyneux, Condillac s'intéresse à l'existence du monde extérieur pour les individus. Cette existence est-elle inférée à partir de nos sensations, comme le suggère l'empirisme classique de l'époque ? Comment alors passe-t-on de ces sensations, qui sont propres à l'individu et ressenties en lui, à la croyance en un monde extérieur ? C'est la distinction entre un voir passif et un regarder actif qui permet à Condillac de répondre à cette question. Les sensations nous sont « données » par nos interactions avec le monde, mais pour arriver à percevoir ce monde comme spatialement structuré il faut en plus *analyser* ces sensations reçues. Or, pour Condillac les mouvements sont indispensables dans la construction de cette perception spatiale. Par mouvements, Condillac entend une définition proche de ce que nous appellerions aujourd'hui la proprioception : grâce à elle, la vision est « éduquée » ; c'est par l'analyse de ses sensations proprioceptives, reçues par le toucher et appliquée aux sensations visuelles, que l'individu construit sa perception spatiale. Aussi l'individu ayant subitement retrouvé la vue et se retrouvant face à un cube et une sphère ne pourra pas les distinguer. Il lui faut d'abord *apprendre à voir*, c'est-à-dire apprendre comment l'analyse des sensations propres au toucher s'applique aux sensations visuelles (voir Pacherie 1997).

⁵ Berkeley (1709), quoi que sur un fond théorique différent, apporte une réponse similaire.

Reid (1764), auteur peu reconnu par la philosophie occidentale⁶, a fourni des éléments majeurs pour une réponse au problème de Molyneux. Son approche permet notamment d'apporter un regard plus contemporain sur la question. La problématique abordée dans la troisième section de la « Recherche sur l'entendement humain d'après les principes du sens commun » (Reid, 1764) – où est évoqué Molyneux – est celle de la différence entre l'apparence visible des objets et leur « réalité », c'est-à-dire ce que nous percevons effectivement d'eux. Reid remarque que les objets n'ont pas la même apparence pour l'œil à différentes distances. Premièrement parce que les couleurs changent avec la distance : on qualifie une feuille comme « blanche » – et on la percevra effectivement blanche – pourtant si l'on compare deux de ces feuilles « blanches » on remarquera que leurs couleurs diffèrent, notamment en fonction de la lumière qu'elles reçoivent. Deuxièmement, l'apparence d'un objet change en fonction de sa position, selon les lois de la perspective. Troisièmement, la grandeur apparente de l'objet change selon la distance – ceci est particulièrement manifeste lorsque l'attention est portée sur la différence entre l'angle « géométrique » (ou « vrai ») et l'angle apparent d'un objet. Par exemple, les coins d'une table ont un angle géométrique de 90° mais on perçoit des angles apparents différents selon la position que l'on a par rapport à l'objet. En ce sens, l'angle apparent est défini selon la relation entre l'objet et celui qui perçoit.

What I see diminishes in apparent magnitude as I retreat from it. The table itself does not diminish in real magnitude as I retreat from it. [...] The real magnitude of an object is an intrinsic property of it [...] whereas the apparent magnitude of an object is a relation between the object and a perceiver. (Reid, 1764, p.182)

Cette différence entre apparence visible et réalité est à la base d'une autre distinction centrale à notre sujet, et constitue l'apport majeur de Reid : la sensation doit être distinguée de la perception. La sensation désigne la réaction « brute » des récepteurs sensoriels à l'environnement extérieur. La perception est perception *de* : elle implique que la sensation s'applique à un objet particulier du monde. La perception désigne la connaissance immédiate que nous avons des objets, la « croyance » que nous avons naturellement en leur existence ; c'est un acte de l'esprit indépendant de la sensation, bien que la contenant.

⁶ Il a été délaissé au profit de Kant.

'Sensation' doesn't in itself imply a conception of or belief in any external object. [...] 'Perception' implies an immediate conviction and belief in something external – something different both from the mind that perceives and from the act of perception. (Ibid., p.98).

Si Reid est le premier à faire la distinction, c'est que celle-ci n'est pas évidente pour le sens commun : toute perception s'accompagne de sensations et vice-versa ; tout comme, lorsque nous lisons un mot, nous ne séparons pas le signe (les lettres elles-mêmes) de la chose signifiée (ce que les lettres veulent dire).

Almost all our perceptions have corresponding sensations that constantly accompany them, and that fact makes us very apt to confuse the two. [...] Every perception comes along with its own special kind of sensation. The sensation is the sign, the perception is the thing signified. They coalesce in our imagination. They are given a single name, and are thought of as one simple operation. (Ibid., p.95)

Par exemple, dans « l'herbe est verte », « verte » peut référer à la sensation de couleur verte qui est dans l'objet – « donnée » par lui *via* la lumière frappant la rétine et définie par une longueur d'onde particulière – ou à la perception de la couleur verte, qui pour Reid est uniquement dans l'esprit.

C'est cette distinction qui lui permet de répondre au problème de Molyneux. L'individu nouvellement rendu à la vue ne serait pas capable de distinguer un cube d'une sphère car il n'aurait que des sensations sans perception ; que des suites de lettres (des mots) sans leur signification.

To a man newly made to see, the visible appearance of objects would be the same as to us; but he would see nothing at all of their real dimensions, as we do. [...] In a word, his eyes, though ever so perfect, would at first give him almost no information of things without him. They would indeed present the same appearances to him as they do to us, and speak the same language, but to him it is an unknown language; and therefore he would attend only to the signs, without knowing the signification of them: whereas to us it is a language perfectly familiar, and therefore we take no notice of the signs, but attend only to the thing signified by them. (Ibid., pp.84-85)

Alors que les sensations sont des données brutes et innées des récepteurs sensoriels, la perception est quant à elle une construction de l'individu, sous-tendue par un apprentissage. Les diverses expériences menées autour du problème de Molyneux donneront raison aux arguments théoriques de Reid, comme nous allons maintenant le voir.

1.2. Expériences en lien avec le problème de Molyneux

1.2.1. William Cheselden

Le chirurgien William Cheselden (1728) fait passer la question de Molyneux d'une expérience de pensée au champ expérimental. La première opération de la cataracte intervient en 1728, sur un jeune homme âgé de treize ans. Après l'opération, l'individu ne peut distinguer ni grandeurs, ni distances, ni positions, ni figures. En revanche, il peut apparemment distinguer les formes puisqu'il est capable d'apprendre leurs noms ; il ne peut cependant les deviner.

When he first saw, he was so far from making any judgment about distances, that he thought all objects whatever touched his eyes, as what he felt, did his skin [...] He could form no judgment of [objects] shapes. (Cheselden, 1728, p.448)

L'expérience confirme donc *a priori* les positions négatives de Locke, Berkeley, Condillac et Reid et elle est abordée comme appui de leurs théories. Néanmoins, il n'y a pas nécessairement de lien entre la réponse du sujet de Cheselden et les arguments défendus par les philosophes : ce sont les théories qui induisent la réponse négative au problème de Molyneux et non l'inverse. Autrement dit, le sujet opéré peut avoir répondu négativement pour d'autres raisons que celles proposées par Locke, Condillac ou Reid – notamment des raisons purement biologiques de déficience du système visuel qui ne serait pas encore parfaitement rétabli. Sa réponse n'est donc pas la preuve scientifique des théories empiristes. Par ailleurs, un certain nombre de commentaires peuvent être faits sur les conclusions tirées des expériences de Cheselden et l'infailibilité de la réponse négative. Tout d'abord, le sujet n'est pas exactement celui de Molyneux puisqu'il n'est pas complètement aveugle. Il se peut que le sujet ait répondu négativement parce que ses yeux ne fonctionnaient pas encore

parfaitement et nécessitaient du temps pour s'accoutumer à la lumière entre autre. Aussi, il n'y a aucun moyen de conclure à l'impossibilité de la distinction du cube et de la sphère dans l'esprit – puisque l'impossibilité est possiblement causée avant que l'esprit ne soit impliqué – au niveau des sensations avant qu'elles ne deviennent idées. Enfin, il se peut également que la manière dont Cheselden a posé la question ait joué un rôle dans la réponse.

Si l'opération de Cheselden ne peut être invoquée pour appuyer les théories des empiristes, elle a néanmoins l'intérêt de faire passer la question de Molyneux dans le domaine expérimental. Ce passage change le statut de la question et réintroduit le corps dans la problématique en tant qu'objet d'investigation par lequel le problème de Molyneux peut trouver une réponse.

1.2.2. Les études de cas de Wallace et de Jeannerod

Des études plus modernes vont également dans le sens d'une réponse négative au problème de Molyneux. Néanmoins, les expérimentations concernant des aveugles de naissance d'âge adulte à qui la vue serait alors rendue sont rares. Les aveugles de naissance dont le trouble de la vision est opérable sont aujourd'hui généralement soignés avant d'avoir atteint l'âge adulte. Les expériences qui permettraient d'élucider la question de Molyneux doivent donc soit se situer à l'époque où les progrès de l'ophtalmologie émergent et permettent les premières opérations, soit concerner des sujets qui n'avaient pas l'occasion de se faire opérer avant l'âge adulte. Une autre difficulté est que les rares expérimentations qui correspondraient aux critères précédents concernent majoritairement des sujets qui présentent quelques nuances avec celui de Molyneux : ils ne sont généralement pas aveugles de naissance, certains ont perdu la vision vers l'âge de 2 ou 3 ans et d'autres avaient la possibilité de distinguer certains mouvements, formes ou couleurs. Les cas de complète malvoyance sont en fait ordinairement inopérables puisque la rétine n'est plus fonctionnelle. En somme, il est difficile de trouver un sujet qui soit *exactement* celui de Molyneux ; il faut donc tenir compte des nuances que présentent les sujets observés avec celui de l'expérience originale.

Il existe néanmoins des études de cas intéressantes. Nous nous pencherons sur ceux rapportés par Jeannerod (1975) et sur celui rapporté par Gregory et Wallace (1963). Pour les cas de Jeannerod, sept sujets non-voyants recouvrant la vue suite à une chirurgie sont étudiés. Parmi eux, aucun n'est capable d'identifier visuellement un objet connu tactilement à la sortie de la chirurgie. Les deux premiers jours suivant l'opération, les jugements perceptifs exprimés

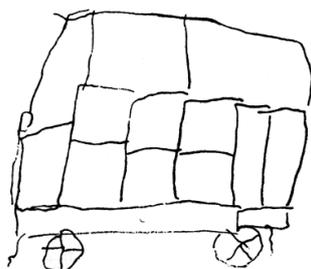
ne concernent que l'intensité lumineuse, et le mouvement n'est pas détecté. Jeannerod conclut que l'explication qui prévaut dans ces observations est que de tels sujets doivent « *apprendre à voir* ». Cependant, deux sujets invitent à nuancer ces résultats. Le sujet « 3 » de Jeannerod fait exception dans l'étude car elle parvient en quelques jours à reconnaître visuellement un grand nombre d'objets et même à lire. Quant à SB, le cas étudié par Gregory et Wallace, il semble n'avoir aucune difficulté avec la perception spatiale après l'opération. Il se révèle capable de reconnaître les visages et les objets ordinaires (chaises, lit, tables, etc.) immédiatement. Son explication est que même s'il ne pouvait voir aucune de ces choses auparavant, il avait une image mentale définie et précise de toutes les choses qu'il était capable de toucher⁷.

Y'a-t-il contradiction entre ces deux résultats ? Qu'est-ce qui fait la différence entre les sujets capables de perceptions visuelles claires et nommables et ceux perdus dans un flou encore aveugle ? Dans le cas de la jeune femme présentée par Jeannerod, sa différence avec les autres sujets commence par l'étiologie. Alors que les six autres présentent une cataracte congénitale bilatérale, elle exhibe une atrophie, une perte totale de l'œil droit et un leucome central de la cornée à l'œil gauche. Sa vision résiduelle est plus élevée que pour les autres sujets. Elle est de plus la seule à avoir un réel degré d'instruction et sa motivation pour apprendre à voir est manifestée comme plus intense. SB – le sujet de Gregory et Wallace – était également considéré d'une intelligence et d'une curiosité supérieure à la moyenne. Il avait perdu la vue à l'âge de dix mois et n'était donc pas aveugle de naissance. Il avait un grand nombre d'expériences visuelles, même avant l'opération : il décelait la perception de la lumière dans un œil et pouvait percevoir certains mouvements de mains lorsqu'ils étaient proches de son visage. Subséquemment, ces deux sujets n'infèrent pas une réponse positive à la question de Molyneux. Bien qu'ayant une facilité certaine à acquérir les perceptions visuelles, à la sortie de l'opération la jeune fille n'a cependant pas la capacité immédiate d'identifier visuellement un objet connu tactilement. Quant à SB, étant le seul sujet à avoir eu une vue « normale » jusqu'à l'âge de dix mois, il suggérerait plutôt que le transfert d'informations de l'expérience du toucher à l'expérience de la vue peut rester inscrite dans le corps durant des années – ce qui n'a pas de rapport direct avec la question de Molyneux. Notons néanmoins que l'implication du sujet dans l'apprentissage (le cas 3 de Jeannerod et

⁷ Ce n'est pas la première fois qu'un aveugle dit qu'il « voit » mentalement, qu'il a des images dans son cerveau. Néanmoins la question de l'analogie de ces images avec celles d'une personne voyante reste ouverte.

SB étaient jugés curieux et intelligents) semble avoir une possible influence sur la réussite de celui-ci.

Ces études soulèvent l'importance déjà mentionnée d'*apprendre à voir*. Il est notamment intéressant d'observer, pour le cas de SB, l'évolution de représentations picturales d'un bus produites par le sujet (cf. Figure 4).



2a



2b



2c

Figure 4: Evolution de la reproduction graphique d'un bus, quarante-huit heures (2a), six mois (2b) et un an (2c) après l'opération.

On remarque l'inclusion de nouveaux éléments visuels entre le premier et le dernier dessin, certains ne pouvant pas venir du toucher – par exemple, les lettres présentes sur les deux derniers bus. Plus pertinent encore pour notre sujet, ces dessins révèlent comment l'expérience corporelle particulière du sujet influence sa perception visuelle : dans les trois cas, les bus sont montrés de profil et du côté gauche ; or lorsqu'il était aveugle SB ne pouvait toucher les bus sous cet aspect (la circulation étant du côté gauche de la route dans son pays) et cet abord a été retenu même dans le dernier dessin.

Non seulement les sujets doivent donc apprendre à voir, mais on commence également à remarquer à quel point la perception qu'ils acquièrent est une *construction* propre à l'individu.

1.2.3. Le projet Prakāsh

L'intérêt du projet Prakāsh est qu'il nous procure des sujets proches de celui de Molyneux à une époque où les déficits visuels sont généralement soignés trop tôt pour pouvoir être rattachés à l'expérience de pensée. Ce projet, lancé en 2003 par le professeur Sinha, a un but double : humanitaire et scientifique, qui nous permet d'observer des aveugles de naissance opérés pour être rendus à la vue à l'âge adulte. L'aspect humanitaire permet ici le progrès scientifique : les sujets sont situés en Inde, pays qui contient 30% de la population aveugle mondiale. 80% des cas sont traitables, c'est pourquoi Sinha lance ce projet humanitaire (voir Sinha, 2013, et Sinha, Chatterjee, Gandhi, & Kalia, 2013).

La première expérience a lieu en juillet 2004 (voir Mandavilli, 2006) ; elle concerne SK, un jeune homme de 24 ans aux compétences visuelles de 20/900 – en dessous des compétences d'un aveugle dont la limite est déterminée à 20/400. Après son opération, l'acuité visuelle de SK est de 20/120. Alors que cette acuité demeure fixe avec le temps, ses compétences visuelles évoluent considérablement. Cette évolution souligne l'utilité de la distinction entre sensation et perception, puisque l'acuité visuelle reste la même (le sujet a toujours la même sensation de lumière sur la rétine) tandis que la perception se transforme. Concernant la tridimensionnalité, il est rapporté que SK n'est capable de reconnaître que les objets en deux dimensions pendant la première année suivant son opération ; il ne peut par exemple nommer une balle. Encore une fois, la négativité de la réponse au problème de Molyneux est confirmée.

SK nous apporte un autre élément essentiel. Alors qu'une certaine acuité visuelle vient juste de lui être rendue, SK perçoit un bovin de race Prim'Holstein comme un ensemble de taches blanches et noires. C'est *seulement lorsque l'animal commence à bouger* qu'il peut le reconnaître comme tel. De même, l'équipe du projet Prakāsh observe que si l'on présente à un sujet rendu à la vue un cercle entrecroisé d'un carré (cf. Figure 5), il percevra trois formes distinctes⁸. En revanche, si le cercle et le carré sont mis en mouvement (tout en demeurant croisés), il pourra nommer les deux formes.

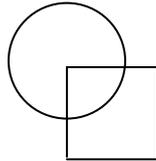


Figure 5 : Cercle entrecroisé d'un carré

Ces observations nous intéressent particulièrement car elles introduisent l'idée de l'importance du mouvement dans l'acquisition de la perception visuelle et en particulier la tridimensionnalité. On remarque que la perception visuelle n'est pas seulement un processus qui lierait le cerveau à un environnement figé, mais que le sujet a besoin de s'investir dans le monde pour le percevoir.

1.3. Conclusion sur Molyneux et la perception visuelle

De cette introduction sur la question de Molyneux, il nous faut retenir plusieurs points. Tout d'abord, la distinction entre sensation et perception. La *sensation* renvoie aux impressions produites par les objets sur les sens, tandis que la perception est au contraire perception *de* : elle désigne l'objet « correspondant » à la sensation, mais aussi ce que je vais faire avec. Etymologiquement, le terme « perception » est issu du latin « *perceptio* » qui désigne l'action de recueillir, la récolte ; « *perceptio* » lui-même est issu du verbe « *percipere* » : se saisir de, recueillir, prendre à travers. Emerge ici en creux cette idée que la perception est toujours construction active de quelque chose, une implication du sujet dans son environnement. Ceci fait écho au deuxième apport du problème de Molyneux à notre question de recherche : percevoir s'apprend, et cet apprentissage inclut très probablement le

⁸ La partie du cercle qui se situe dans le carré et la partie du carré qui se situe dans le cercle forment une figure géométrique ; les deux autres sont la partie du cercle hors du carré puis la partie du carré hors du cercle.

corps en action de l'individu. La question de Molyneux devient ainsi la question du rôle du corps dans la perception visuelle. Comment le corps est-il impliqué dans la réponse donnée par le sujet ? Est-ce uniquement par les sens et leurs rapports ? Le sujet recouvrant la vue construit-il une « nouvelle » perception visuelle ? Ou une « nouvelle » perception visuelle est-elle construite en lui ? Dans les deux cas, la construction se fait-elle par l'esprit (facultés intellectuelles – conscientes ou inconscientes – incorporelles), le cerveau ou le corps ? Ces questions autour du problème de Molyneux et du lien entre sensations et perception par le corps chez les non-voyants sont aujourd'hui investiguées par la substitution sensorielle. Similairement à l'aveugle du problème de Molyneux qui retrouve subitement la vue, les individus non-voyants qui utilisent les dispositifs de substitution sensorielle acquièrent un type de perception visuelle. Développés depuis les années soixante, ces appareils fonctionnent selon des principes de transformation d'une image visuelle (enregistrée par une caméra) en informations délivrées par un autre sens (le plus souvent, le toucher ou l'audition). Grâce à eux les individus non-voyants, après un certain temps d'apprentissage, deviennent capables de formuler des jugements de type visuels ; ils sont notamment capables de percevoir des objets à distance. Autrement dit, la substitution sensorielle est un exemple canonique d'acquisition d'une perception distale.

2. Les dispositifs de substitution sensorielle : présentation

Pacherie (1997) remarque deux évolutions philosophiques essentielles entre l'époque du problème de Molyneux et l'époque de la substitution sensorielle. Tout d'abord, il s'est effectué une modification radicale de la conception des rapports entre perception et sensation. De plus l'insistance est aujourd'hui beaucoup plus portée sur le caractère actif de la perception par opposition au caractère passif de la sensation. Ce sont en partie ces évolutions qui ont permis la conception des dispositifs de substitution sensorielle.

2.1. Fonctionnement des dispositifs de substitution sensorielle

Les dispositifs de substitution sensorielle sont des appareils créés pour pallier le handicap lié à la déficience visuelle, conçus à l'intention des non-voyants et des malvoyants.

Leur principe général est de transformer les caractéristiques d'informations propres à une modalité (la vision), en des informations propres à autre modalité sensorielle (par exemple, le toucher). Un système de substitution sensorielle peut être décomposé en trois composants distincts :

(1) Un capteur, qui permet la conversion d'une certaine forme d'énergie (lumineuse, sonore, mécanique ou autre) en signaux ;

(2) Ces signaux sont interprétés par un système de couplage (le plus souvent électronique) ;

(3) Le système de couplage permet ensuite l'activation coordonnée d'un stimulateur. La stimulation est généralement adressée aux cellules réceptrices d'un organe sensoriel et consomme ainsi de l'énergie électrique qui peut être convertie en énergie sonore – dans le cas des appareils visuo-auditifs – ou en énergie mécanique – dans le cas des appareils visuo-tactiles (voir Lenay, Gapenne, Hanneton, Marque, & Genouëlle, 2003).

Il existe un grand nombre d'appareils de substitution sensorielle (pour une revue, voir Dakopoulos & Bourbakis, 2010 ; Jones & Starter, 2008 ; et Visell, 2009). Auvray (2004) différencie les appareils invasifs, qui consistent en stimulation électrique des structures neurales – comme par exemple l'œil artificiel de Dobbelle (2000) – des appareils non invasifs. Parmi ces derniers, elle différencie les dispositifs de substitution tactile (comme la canne d'aveugle), les dispositifs de substitution visuo-tactile (comme le TVSS ou l'Optacon), les dispositifs d'écholocation (où des informations échoïques sont utilisées afin d'évaluer la distance d'obstacles) et les dispositifs de conversion image/son (comme The vOICe : Meijer, 1992 ; ou le PSVA *Prothesis Substituting Vision by Audition* : Capelle, Trullemans, Arno, & Veraart, 1998). La plupart des appareils utilisent la modalité tactile, notamment en raison de la grande prédisposition de la peau à discriminer les stimuli temporels et spatiaux et de son efficacité à mobiliser l'attention (Geldard, 1960 ; Van erp, 2007). Dans le cadre de notre problématique nous nous intéressons plus particulièrement au TVSS (dispositif de substitution visuo-tactile) et à The vOICe (dispositif de substitution visuo-auditif).

Le TVSS (Tactile Visual Sensory Substitution), développé par Bach-y-Rita (1967), est le premier appareil de substitution sensoriel inventé. Une caméra montée sur un tripode est manipulée par le sujet et enregistre les images données par l'environnement. L'image est ensuite transformée et projetée via des impulsions tactiles sur le dos du sujet. Une description

complète de l'appareil est donnée par White, Saunders, Scadden, Bach-y-Rita et Collins (1970).

The "eye" of the system consists of a television camera. This camera, which is mounted on a tripod, is manipulated by the S, who can aim the zoom lens at any part of the room, in order to localize and identify objects or persons. Stimuli can also be presented on a back-lit screen by slide or motion picture projection. The video image is electronically transformed and sent to a 20 by 20 matrix of solenoid vibrators mounted in the back of a stationary dental chair. The 400 stimulators, spaced 12 mm apart with 1 mm-diam tips, cover an area approximately 10 in. square. Each solenoid is designed to vibrate at 60 Hz when its locus is within an illuminated region of the camera field. The on-off activity of the vibrators can be monitored visually on an oscilloscope as a two-dimensional pictorial display. (White, Saunders, Scadden, Bach-y-Rita et Collins, 1970, p.23) (Cf. Figure 6)

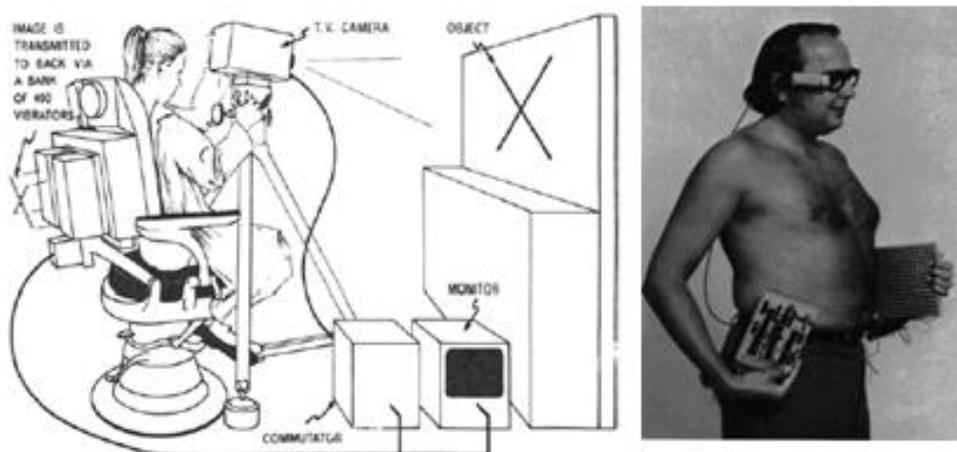


Figure 6 : Tactile Visual Sensory Substitution (TVSS)

Depuis 1967 le TVSS a été l'objet de nombreux perfectionnements techniques incluant la miniaturisation, l'amélioration de la définition de l'image ou encore le passage à la stimulation électrique (Aiello, 1998) (Cf. Figure 7). Il a été l'appareil de substitution sensoriel le plus cité en recherche fondamentale, c'est pourquoi nous nous intéressons à lui.

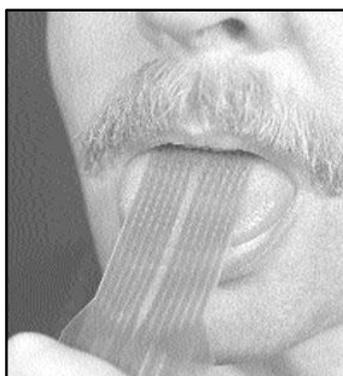


Figure 7 : TVSS amélioré

Un autre appareil devant retenir notre intérêt est le dispositif The vOICe (Meijer 1992), qui utilise pour sa part l'audition afin de pallier l'absence de vision. L'audition a l'avantage d'une finesse du seuil de discrimination d'intensité et de fréquence qui permet de traiter des stimuli complexes et variés, comme le langage (Hirsh, 1988) – également une faible consommation d'énergie. De même que pour le TVSS, The vOICe transforme des images captées par une caméra placée sur la tête de l'utilisateur. Ces images sont converties en échelles de gris et transformées en sons en fonction de la position et de la luminosité des pixels. Ce sont surtout les trois lois de transformation de l'image en son qui nous intéressent.

(1) La position verticale est convertie en fréquence : plus le pattern visuel est haut, plus le son est aigu ; plus le pattern visuel est bas, plus le son est grave. Cette association correspond à une correspondance cross-modale naturelle. Melara et O'Brien (1987) ont en effet montré que des participants répondent plus rapidement concernant la localisation de stimuli lorsque ceux-ci sont présentés en même temps qu'un son à la fréquence congruente (un stimulus visuel situé en haut du champ visuel avec un son à la fréquence aiguë et un stimulus visuel situé en bas du champ visuel avec un son à la fréquence grave) que lorsqu'ils sont présentés en même temps qu'un son dont la hauteur de la fréquence est inverse à la position du stimulus.

(2) La position horizontale est convertie par la temporalité du son. L'image est scannée de la gauche vers la droite ; le début du pattern sonore correspond à la transformation de l'extrémité gauche de l'image et la fin à la l'extrémité droite.

(3) Enfin, la luminosité – codée par les niveaux de gris – est transcrite par l'intensité du son émis (soit en amplitude d'oscillation). Plus le pixel est clair, plus l'intensité du son est importante.

Selon ces lois, une ligne claire en diagonale partant d'en bas à gauche et finissant en haut à droite de la scène visuelle est transcrite comme en son s'accroissant en hauteur ; deux lignes donnent deux sons ; deux points distincts donnent deux courts bips (voir Auvray, Hanneton, & O'Regan, 2007. Voir le site <https://www.seeingwithsound.com/> pour une description illustrée de l'appareil ainsi que pour entendre les exemples présentés). Nous allons maintenant nous intéresser aux résultats obtenus avec ces appareils afin de montrer comment ils permettent une meilleure compréhension de la perception spatiale tridimensionnelle.

2.2. Quelques résultats et thèmes abordés

Cette présentation des résultats et des thèmes les plus abordés par les études autour de la substitution sensorielle n'est pas exhaustive. Nous n'avons retenu que ce qui nous paraissait pertinent pour notre sujet. Nous avons notamment volontairement omis les études concernant l'aspect purement technique des dispositifs de substitution sensorielle, c'est-à-dire les études issues de la robotique.

2.2.1. *Plasticité cérébrale et apprentissage*

La majorité des études concernant la substitution sensorielle s'inscrivent dans le champ des neurosciences ; Bach-y-Rita, l'inventeur du premier dispositif de substitution visuo-tactile, est lui-même issu de ce champ. La plasticité cérébrale – ou neuroplasticité – est le principal sujet d'intérêt des études autour de la substitution sensorielle.

Paul Bach-y-Rita met au point le TVSS après avoir assisté à la rééducation de son père. Paralysé à la suite d'un AVC, celui-ci est pris en charge par son fils George Bach-y-Rita, étudiant en médecine, qui le rééduque pas à pas jusqu'à ce qu'il soit capable de jouer du piano, danser et même donner des cours à la faculté⁹. Notons que cette rééducation se développe dans l'action : l'homme a retrouvé ses capacités à force de pratiquer des mouvements. A sa mort, après autopsie du cerveau on découvre que 97% des nerfs liant le

⁹ George Bach-y-Rita rééduque son père à la manière d'un enfant qui apprendrait ses premiers mouvements. Il lui apprend d'abord à ramper et à se déplacer à quatre pattes en s'aidant d'un mur. Il transforme toutes les tâches quotidiennes en exercice moteur. Petit à petit, Pedro Bach-y-Rita parvient à se tenir sur ses genoux, à rester debout puis à marcher normalement. Après trois mois, il recouvre graduellement la parole. Il réapprend à taper au clavier. Au bout d'une année de rééducation, il est capable de retourner à son emploi à plein temps de professeur au City College de New York, qu'il garde jusqu'à sa retraite à 70 ans. En 1966, Pedro Bach-y-Rita meurt d'une crise cardiaque en 1966, à 72 ans. (Voir Doidge, 2007)

cortex cérébral à la colonne vertébrale avaient été détruits par l'AVC. Pedro Bach-y-Rita a vécu pendant six ans avec 3% de connexions seulement et a été rééduqué sur cette base. Paul Bach-y-Rita voit dans ce rétablissement la confirmation de l'existence de la neuroplasticité : le cerveau est capable de se modifier, de se recâbler, tout au long de la vie. Ce concept est au cœur du développement théorique et technique du TVSS.

Au-delà de l'aspect thérapeutique de l'appareil, les premières expériences de Bach-y-Rita avec le TVSS visent ainsi à démontrer le phénomène de la neuroplasticité, comme l'annonce le titre de son premier article paru sur la substitution sensorielle : « *Sensory plasticity: Applications to a vision substitution system* » (Bach-y-Rita 1967).

A large body of evidence indicates that the brain demonstrates both motor and sensory plasticity. The aim of this paper is to examine the evidence for plasticity as a fundamental basis for the development of a high resolution vision substitution system.
(Bach-y-Rita, 1967, p.1)

Bach-y-Rita définit la « plasticité sensorielle » comme la capacité d'un système sensoriel (comprenant les récepteurs sensoriels, les voies afférentes ainsi que les processus associés dans le système nerveux central) à assumer les fonctions d'un autre système après un temps d'apprentissage. Ainsi, le système sensoriel visuo-tactile (TVSS) qu'il développe vise à utiliser le système tactile pour que celui-ci assume les fonctions du système visuel.

A prosthetic challenge is offered by the possibility of using the tactile sensory system to carry optical information from an artificial receptor to the brain. After a training period, sensory plasticity may enable such information to be perceived as three-dimensional "visual" information. Sensory plasticity is defined here as the ability of one sensory system (receptors, afferent pathways, and the central nervous system representation) to assume the functions of another system. (Bach-y-Rita, 1967, p.1)

Ce concept de neuroplasticité est également au cœur des études faites par le projet Prakāsh : originairement, la portée scientifique des études menées est sous-tendue par une autre motivation que la démonstration du rôle du mouvement. Les conclusions mettent avant tout l'emphase sur la neuroplasticité : « *We are finding that the human brain retains an ability to acquire complex visual tasks even after several years of congenital blindness* » (présentation du projet Prakāsh, voir http://web.mit.edu/sinhalab/prakash_science.html)

Le phénomène de la plasticité s’oppose à l’approche plus conventionnelle qui réfère habituellement à une notion de « période critique » en lien avec le développement du cerveau chez l’enfant, après laquelle on ne pourrait notamment plus apprendre à voir. C’est en creux l’idée que si la vision de l’œil ne s’améliore pas, la capacité à interpréter ce qui est vu ne s’améliore pas non plus. Or, les expériences montrent que les malvoyants peuvent améliorer considérablement leurs capacités visuelles sans pour autant améliorer leur vision elle-même – l’image projetée sur la rétine est toujours la même. Plus précisément, au niveau anatomique des études montrent que des régions visuelles peuvent être recrutées pour des processus non-visuels chez les sujets non-voyants (Sadato, Pascual-Leone, Grafman, Ibanez, Deiber, & Dold, 1996 ; Wanet Defalque, Veraart, de Volder, & Metz, 1988) ; il a également été démontré que les aires cérébrales qui s’activent lors de l’utilisation du TVSS sont les aires de la vision – soit le cortex occipital (pour revue, voir Renier, Volder, & Rauschecker, 2014)

Via la plasticité cérébrale, l’idée soulignée par le rétablissement de Pedro Bach-y-Rita – ainsi que par le rétablissement des sujets de Wallace et Jeannerod, ou encore par la capacité des malvoyants à percevoir leur environnement avec le TVSS en recrutant les aires cérébrales corrélées à la vision – est que l’on peut toujours apprendre à voir. Le cortex cérébral garde sa capacité à apprendre de nouvelles fonctions (sa plasticité) depuis l’enfance. Ainsi, on ne s’étonnera pas que la maîtrise des dispositifs de substitution sensorielle ne soit pas automatique et nécessite un temps d’apprentissage.

Le concept de plasticité cérébrale nous intéresse dans la mesure où (1) il permet de comprendre pourquoi la perception est une construction particulière à l’individu et non strictement dépendante du monde extérieur, (2) il appuie l’idée que la capacité de perception du monde est modulable, non figée et (3) comme nous allons le voir, l’action est une de ses conditions : sans mouvements, les neurones ne créent aucune connexion¹⁰.

Un des éléments essentiels dans l’étude de la neuroplasticité est l’apprentissage. Comme nous l’avons mentionné, c’est par la répétition et l’entraînement que l’individu crée de nouvelles connexions cérébrales. L’étude de ce processus d’apprentissage est essentielle à la compréhension de la plasticité cérébrale et la substitution sensorielle en est un champ d’investigation exemplaire.

¹⁰ Nous serons néanmoins attentifs à ne pas confondre condition et cause : on ne peut pas inférer l’idée que le mouvement est la cause de la plasticité cérébrale de l’observation qu’il n’y pas de plasticité sans mouvement.

2.2.2. L'intermodalité : la définition des sens et de la perception

Beaucoup d'études – encore une fois majoritairement en neurosciences – concernent ainsi le processus d'apprentissage en jeu dans la substitution sensorielle. Celle-ci est alors comprise comme un paradigme qui permettrait d'investiguer la genèse de l'apprentissage perceptif tel qu'émergeant chez l'individu normal. Dans ce contexte, la question qui se pose est de savoir si l'apprentissage perceptif qui a lieu lors de l'utilisation d'appareils de substitution sensorielle est un apprentissage spécifique à un système sensoriel, et comment s'intègrent des informations visuelles et tactiles, ou visuelles et sonores, pour provoquer un recâblage cérébral.

La majorité des études en apprentissage perceptif ont jusqu'ici été plutôt bas-niveau et unisensorielles (Proulx, Brown, Pasqualotto, & Meijer, 2014); autrement dit, elles présupposent le schéma implicite classique de la perception allant des stimuli au cerveau en passant par les sens. Une étude plus récente qui s'est intéressées à la substitution sensorielle montre au contraire un recrutement des aires cérébrales à différents niveaux. Elle met en avant l'idée que l'organisation anatomique du cerveau ne dépendrait pas des sens (il n'y aurait pas une aire pour la vision, une pour l'audition, etc.) mais de l'information à traiter. Par exemple, il y aurait une aire pour la reconnaissance des formes, une autre pour la reconnaissance des couleurs, indépendamment des modalités sensorielles sollicitées : « *It matters less where information originates, but instead it matters more what the information is for so one can respond appropriately.* » (Proulx, Brown, Pasqualotto, & Meijer, 2014, p.21)

Ces études neuroscientifiques appuient l'idée que les sens ne sont pas organisés en fonction de spécificités liées à leur modalité. La vue n'est pas « dédiée » à la vision, c'est-à-dire à l'analyse physiologique de la lumière qui frappe la rétine et à la retranscription « visuelle » de stimuli extérieurs. Les sens seraient plutôt organisés en fonction de tâches. Autrement dit, la provenance sensorielle de l'information importe moins que sa fonction – intégrant le but de cette information.

All of these results contribute to a growing body of evidence accumulating over the last decade that challenges the canonical view of the sensory-specific brain. This evidence demonstrates that in both sighted and blind individuals the occipital visual cortex is not purely visual and that its functional specialization is independent of visual input (reviewed in Reich et al., 2011; Ricciardi and Pietrini, 2011), despite showing a clear

preference for the visual modality. This in turn has led to the hypothesis that the brain is task-oriented and sensory-modality independent (Reich et al., 2011; Striem-Amit et al., 2011), or in other words a “task machine”. (Maidenbaum, Abboud, & Amedi, 2014, p.8)

Cette manière d’aborder l’organisation cérébrale au niveau structurel et fonctionnel est un corollaire des réflexions autour de la notion d’intermodalité. La question du lien entre les sens au niveau perceptif est au cœur des questions soulevées par la substitution sensorielle, après avoir été le thème du problème de Molyneux. En suggérant que l’information a une certaine indépendance vis à vis des données sensorielles qui l’ont générée – la visée de l’information reçue est plus importante et mieux traitée au niveau neuronal que sa provenance ou même son contenu – ces études soulignent la possibilité d’une communication rapprochée entre les sens, et même d’une intégration. Elles répondent d’une certaine manière à un aspect du problème de Molyneux : oui, les informations reçues par un sens (le toucher) peuvent être comprises par un autre sens (la vue). C’est un des thèmes les plus abordés dans la recherche fondamentale sur la substitution sensorielle. Cependant, de nombreuses questions restent ouvertes quant à la caractérisation de la perception acquise par les dispositifs de substitution sensorielle. L’individu « voit »-t-il vraiment avec ces dispositifs ? La perception acquise doit-elle être qualifiée de visuelle, de tactile ou de « visuo-tactile » ? Peut-on parler de « multisensorialité » ? Est-il alors question de « substitution » ou de « suppléance » ?

Au niveau théorique, les réponses apportées dépendent de la signification que l’on choisit de donner aux sens et à la perception¹¹. Elles dépendent également de la définition que l’on donne à la vision : est-ce une expérience sensorielle ou une expérience perceptive ? Notre objectif ne concernant pas ces questions, nous choisissons de parler de « vision » pour désigner l’expérience sensorielle issue du système visuel (i.e. la lumière sur la rétine) et de « perception visuelle » pour faire référence à l’autre type d’expérience.

Une autre raison de ne pas prendre position dans le débat concernant la définition des sens est indirectement donnée par Deroy et Auvray (2012), qui apportent une perspective intéressante à cette question. Selon elles, le débat concernant l’intermodalité et la définition

¹¹ Lorsque l’on pose la question de la répartition de sens, on fait généralement référence aux quatre critères de Grice (1962). Selon son inventaire, on peut distinguer les sens : (1) Par rapport aux propriétés sur lesquelles ils nous informent (les odeurs pour l’odorat, les couleurs pour la vue, etc.) ; (2) par rapport aux caractéristiques subjectives des expériences éprouvées (critère souvent retenu car il a pour avantage de mettre en avant le caractère actif de la perception) ; (3) par rapport aux différences des stimuli qui les activent ; (4) par référence aux organes impliqués. (Voir Pacherie 1997 pour le lien avec la substitution sensorielle)

des sens ne trouvera pas de réponse dans la substitution sensorielle. Les études autour du fonctionnement de la substitution sensorielle assument implicitement une équivalence entre les capacités acquises par l'utilisation des appareils de substitution et la perception via une modalité sensorielle. Alors qu'elle n'a jamais été étudiée, cette assomption sert de cadre pour l'interprétation des données.

Robust evidence shows that sensory substitution devices provide their users with new abilities to detect and/or respond to changes in their environments. However, this repeated, but hardly ever examined equivalence between using a sensory substitution device and perceiving through a canonical sensory modality has turned into the dominant framework in which to interpret the data obtained with those devices. (Deroy & Auvray, 2012, p.1)

Il est plus approprié selon Deroy et Auvray de considérer les capacités délivrées par la substitution sensorielle sur le modèle de la lecture, plutôt que sur la perception. De même que l'apprentissage de la lecture ouvre de nouvelles voies cérébrales entre des voies déjà existantes (des voies « dérivées » qui permettent d'accéder à des informations existant au préalable), la substitution sensorielle engendre l'établissement de voies dérivées qui permettent de « lire le monde » plutôt que de le percevoir. Selon cette approche, les informations délivrées par les appareils (sons ou impulsions tactiles) sont à penser sur le modèle des lettres et des mots et non des images délivrées sur la rétine.

Instead of opening an autonomous route to previously inaccessible information, sensory substitution needs to be conceived as being a derived route which requires that a first route and ways of accessing information already exist. The analogy with dual-route models of reading then provides a novel way to specify this proposal and understand the integration of sensory substitution devices. [...] These devices provide a powerful means to “read” the world, but not to “see” it. [...] Letters and words act as newly visually coded speech sounds; in the same way auditory templates in sensory substitution devices like The vOICe act as newly auditorily coded visual shapes and objects. (Deroy & Auvray, 2012, p.2)

Les auteures concluent que les études sur la substitution sensorielle ne permettent pas d'investiguer la perception à proprement parler – puisque les informations délivrées par les appareils ne sont pas de même nature que celles délivrées par la perception visuelle. Il n'est

pas question d'intermodalité – la substitution sensorielle ne permet pas de « percevoir » le monde à l'aide d'une autre modalité sensorielle – mais de « facultés hybrides » permettant de construire de nouvelles routes cognitives entre des composants déjà existants.

The study of sensory substitution devices does not shed light on perception stricto sensu. Noticeably, these studies will be of no relevance in the debates regarding the definition or individuation of the senses and will not constitute canonical examples of what it is to perceive in a certain sensory modality. Rather, sensory substitution devices open-up questions about what we have called vertical faculties: some “hybrid capacities” might be built along sensory transducers faculties by exploiting their specific outputs, and relying on the structural features of the latter, and building new crossmodal correspondences or translations between them. (Deroy & Auvray, 2012, p.12)

Cette nouvelle perspective permet de recentrer notre question de recherche en précisant que celle-ci ne concerne pas la perception *visuelle*, dans la mesure où la substitution sensorielle ne permet pas d'acquérir ce type de perception au niveau phénoménal ou physiologique. En revanche, si l'on considère la perception *spatiale* comme une construction cognitive bien distincte de la perception visuelle, ce que Deroy et Auvray (2012) qualifient de « capacité hybride », alors la substitution sensorielle est bien un outil d'investigation intéressant.

Si les capacités acquises *via* la substitution sensorielle ne sont pas analogiques à la perception visuelle, quelles sont-elles ? Quelles aptitudes les utilisateurs deviennent-ils capables de manifester par ces appareils ?

2.2.3. Que permet la substitution sensorielle

Nous nous intéressons maintenant aux résultats comportementaux obtenus avec les dispositifs de substitution sensorielle. Quelles capacités sont acquises par ces appareils ?

Concernant le TVSS, White, Saunders, Scadden, Bach-y-Rita, et Collins (1970) rapportent la possibilité par les sujets utilisant le dispositif – après un temps d'apprentissage variant en moyenne entre cinq et quinze heures – de discriminer des formes (sous réserve que les sujets puissent effectuer des mouvements avec la caméra et qu'ils aient un feedback de l'examineur concernant leurs réponses), des jugements d'acuité et des jugements

d'inclinaison. Il est intéressant de noter qu'il n'y a aucune différence dans l'acquisition de ces compétences entre les personnes non-voyantes et les personnes voyantes. Plus exactement, les utilisateurs deviennent capables de distinguer des objets, de décrire leur arrangement spatial et d'évaluer correctement leur taille. Ils sont également capables d'évaluer des mouvements de rotation, d'estimer l'orientation des objets ainsi que d'autres phénomènes tridimensionnels. Ils répondent également aux illusions visuelles (e.g. l'effet de cascade) de la même manière que les voyants. De nombreuses études ont démontré l'efficacité d'une substitution de la vision par des stimuli tactiles. La substitution visuo-tactile permet notamment aux sujets de localiser des objets dans l'espace et d'effectuer des jugements perceptifs visuels tels que la perspective et des estimations concernant la profondeur (Bach-y-Rita, 1972, 1989, 1999; Bach-y-Rita, Kaczmarek, & Meier, 1998; Epstein, 1985; Kaczmarek, 1995; Kaczmarek & Bach-y-Rita, 1995; White, Saunders, Scadden, Bach-y-Rita, & Collins, 1970). Des résultats similaires sont obtenus avec les dispositifs visuo-auditifs, comme The vOICe (Auvray, Hanne-ton & O'Regan, 2003). L'ensemble de ces données sont disponibles dans le document de thèse d'Auvray (2004).

Autrement dit, les aptitudes manifestées par les utilisateurs de la substitution sensorielle sont identiques à celles habituellement exprimées *via* la perception visuelle. Nous insistons particulièrement sur la possibilité par les utilisateurs d'évaluer la position des objets dans l'espace extérieur et de comprendre leurs relations dans cet espace – capacité cognitive qui correspond à la définition de la perception spatiale tridimensionnelle.

2.2.4. L'échec phénoménologique

Outre le succès des appareils de substitution sensorielle sur le plan technique (ils fonctionnent au sens où ils remplissent leur but de faire percevoir le monde extérieur par le sujet malvoyant ou non-voyant) il s'agit d'un échec commercial. Les individus non-voyants ou malvoyants n'utilisent pas ces dispositifs dans la vie quotidienne (Bach-y-Rita, 1983 ; Lenay et al., 2003). Cet échec de la pratique a donné lieu à des tentatives d'explications qui peuvent être regroupées sous plusieurs hypothèses (voir Lenay, Canu, & Villon, 1997 ; Lenay et al., 2003). (1) Tout d'abord, sur le plan technologique les appareils peuvent être améliorés : plus discrets, légers, précis. (2) Il a également été proposé de travailler sur l'aspect social. Une technologie n'est adoptée que lorsqu'elle est partagée ; d'où l'idée de créer une communauté d'utilisateurs qui pourraient partager leurs expériences. (3) Enfin, il a été souligné que ce qui

pourrait faire défaut à la substitution sensorielle serait les « qualia » : des qualités phénoménales inexplicables et irréductibles à l'analyse, à la base de toute expérience¹².

Ce fossé entre technique et expérience subjective confirme l'hypothèse de Deroy et Auvray (2012) selon laquelle la substitution sensorielle n'est précisément pas la substitution d'un sens – elle ne délivre pas des perceptions construites – mais des informations. Ce qui manquerait à l'expérience faite avec les appareils de substitution serait le caractère subjectif et émotionnel des percepts, dont est dénuée l'information.

It is simply "information" about forms and their positions, but the quality of the experience is incomparable. What is most badly missing, according to users' declarations, are the subjective values of perceptions (for example, subjects discover their own face, or faces of their close relatives, without attributing any emotion to them) [...]. But the contrary would have been surprising. The emotional value of a form is not simply data which must be captured. It has to be built up through a specific learning process. (Lenay, Canu, & Villon, 1997, p.47)

Nous ne développerons pas plus avant la raison de ce fossé entre technique et appropriation de la substitution sensorielle. Nous pouvons cependant retenir de ces différentes hypothèses que la visée de la perception semble impliquer plus qu'une simple « (re)connaissance » du monde : la perception est bien une construction active propre à l'individu. Il s'agit donc maintenant de comprendre cette construction. Les études autour de la substitution sensorielle nomment « attribution distale » le processus sous-jacent à l'émergence de cette perception. Ce terme désigne la spatialisation des sensations délivrées par le dispositif dans l'environnement, autrement dit le passage d'un niveau proximal à un niveau distal. Il est de plus suggéré que ce processus est ancré dans le corps de l'individu au travers de l'action, indispensable pour acquérir la perception spatiale tridimensionnelle.

¹² Le terme contemporain – et extrêmement controversé – de *qualia* (singulier *quale*, signifiant en latin « quelle sorte, quel type ») est généralement utilisé pour désigner un type de propriétés des états mentaux non-représentationnels, non-intentionnels, et cependant phénoménalement présents à la conscience. De telles qualités sont donc selon leur définition impossibles à analyser scientifiquement, puisque les analyser serait les rendre représentationnelles. Autrement dit, les qualia sont « ce que cela fait » de subir subjectivement une expérience ; ce qui est irréductible dans cette expérience, ce qui échappe à l'individu lorsqu'il tente de comprendre une expérience sans l'avoir vécue.

3. Attribution distale et action : élaboration de la question dans les dispositifs de substitution sensorielle

Classiquement et intuitivement la perception spatiale en trois dimensions est conçue comme un mécanisme de reconstruction de l'espace tridimensionnel par notre système visuel. Or, la substitution sensorielle montre qu'on peut acquérir une sorte de perception spatiale ayant des caractéristiques visuelles sans le sens de la vue. Les études neuroscientifiques autour de la substitution sensorielle, qui exhibent notamment le phénomène de la plasticité cérébrale, suggèrent par ailleurs que la perception est une construction spécifique de l'individu et non une donnée passive du monde extérieur. Cette construction est dépendante d'un apprentissage, comme le montre l'exemple de la rééducation de Pedro Bach-y-Rita par son fils à la suite d'un AVC. Nous allons maintenant nous tourner vers le rôle essentiel de l'action dans la construction de la perception spatiale tridimensionnelle au travers des dispositifs de substitution sensorielle.

3.1. Attribution distale et perception distale

Lors d'une première utilisation d'un appareil de substitution sensorielle, les sujets ressentent des stimuli *proximaux*. Par exemple, ils reçoivent des impulsions tactiles ou des sensations auditives provoquées par l'appareil sur la peau ou dans les oreilles. Plus exactement, les utilisateurs ressentent la succession des stimuli sur une surface localisée de leur corps correspondant à l'endroit où sont situés les retours du dispositif (sur le dos pour les premiers TVSS, sur la langue pour les versions plus modernes, dans les oreilles pour The vOICe...). Le phénomène qui nous intéresse est qu'à force d'utilisation et après un temps d'apprentissage – les cinq à quinze heures d'entraînement – les sujets finissent par oublier ces sensations proximales pour parvenir à une perception du monde extérieur (Bach-y-Rita, 1972; White et al., 1970), c'est-à-dire une perception des objets localisés à distance. Ce passage des sensations proximales à une perception distale a été nommé *extériorisation*, ou *attribution distale*¹³.

¹³ Le terme d'« extériorisation » est propre à Lenay et Auvray. Dans un souci de cohérence bibliographique, nous lui préférerons le terme d'attribution distale.

This ability to recognize forms is accompanied by an exteriorisation, a projection of the percepts which become objects located in space. At first the user only senses a series of stimulations on his skin. But as he progresses in his perceptive learning, he gradually comes to forget these tactile sensations and to perceive stable objects at a certain distance, "out there in the world" in front of him. Thus, according to users' declarations, the proximal irritation caused by the tactile matrix is clearly distinguished from the perception itself. (Lenay et al., 1997, p.46)

Pour le dispositif visuo-auditif, il est rapporté qu'après que ce phénomène d'attribution distale ait eu lieu les utilisateurs parviennent à isoler les sons provenant du dispositif des autres sons provenant du reste de l'environnement. Ainsi, Pat Fletcher (2002) – une utilisatrice de The vOICe – relate que lors des premières utilisations elle entend des sons vides de sens et ne peut distinguer les sons du dispositif des sons du reste de l'environnement. En revanche, après un temps d'apprentissage elle dit percevoir automatiquement les sons comme des objets localisés dans l'espace : « Je pense que c'est comme écouter une émission à la radio, on entend les sons, mais on ne les remarque pas vraiment sans se focaliser véritablement dessus, on écoute tout simplement ce qui est dit ». Elle n'est plus concentrée sur les sons et fait l'expérience du dispositif comme s'il faisait partie d'elle. Face à des marches, avant apprentissage elle devait consciemment effectuer le raisonnement pour adapter le mouvement de ses jambes. Après avoir assimilé l'appareil, cette action devient automatique – comme elle l'est pour tout individu : « *mes sens voient les marches et mon corps sait par expérience ce qu'il doit faire ensuite* » (Fletcher, 2002, dans Auvray, 2004, p.17).

Une perception distale se distingue des sensations proximales. Outre les rapports subjectifs des utilisateurs rendant compte de ce phénomène, l'attribution distale est également corroborée par le fait que les aptitudes acquises continuent à se manifester même lorsque les informations de l'appareil sont délivrées par et à un autre endroit du corps – par exemple lorsque la caméra est déplacée (des mains à la tête) ou lorsque les vibrations sont déplacées du dos au ventre.

D'après les témoignages des utilisateurs, les irritations proximales que peut provoquer la plaque tactile sont nettement différenciées de la perception proprement dite : la perception est clairement distinguée de la sensation. Ce point est corroboré par le fait qu'une fois que les sujets sont entraînés, l'emplacement de la caméra ou de la matrice de stimulateurs n'a pas d'influence sur les performances des sujets. La caméra tenue

dans les mains peut être remplacée par une caméra miniaturisée attachée à une monture de lunettes ; le dispositif vibro-tactile peut être déplacé sur une autre partie du corps (par exemple du dos vers le ventre) : l'adaptation se fait quasi immédiatement. L'utilisateur retrouve une perception distale des objets qu'il explore. Les sujets entraînés ne perçoivent plus les images sur leur peau, mais ils les localisent dans l'espace. (Auvray, 2004, p.16)

Ce phénomène d'attribution distale est caractérisé par une automatisation des actions liées aux informations délivrées par les appareils ainsi que par l'oubli des inputs proximaux – et ce pour n'importe quel type de substitution. Ceci se manifeste par exemple par le comportement réflexe d'évitement de l'utilisateur suivant une expansion brusque des impulsions tactiles (provoquée par le zoom de la caméra) : il lève les bras et recule le corps en arrière (Bach-y-Rita, 2002).

L'attribution distale est le cœur de notre problématique : il s'agit du moment où le sujet maîtrise le dispositif et accède à « une autre dimension », au sens premier et second du terme. Le terme d'« attribution distale » suppose un mouvement de l'intérieur du sujet vers le monde – ce qui va à l'encontre de l'approche intuitive de la perception, qui considèrent que c'est le monde qui se « donne » au sujet, particulièrement à travers les sens. L'attribution distale suppose une construction du monde par le sujet. Autrement dit, il s'agit du processus par lequel le sujet s'« oublie » dans le monde. Il n'est plus concentré sur lui-même mais sur ce qui lui est extérieur, au sens spatial. On peut aussi qualifier ce moment par l'émergence d'une réalité, d'un espace, qui a du sens pour celui qui y évolue.

Nous avons choisi d'explorer les études autour de la substitution sensorielle car elles permettent de mieux comprendre ce processus. Mais l'attribution distale est en fait à l'œuvre dans tout apprentissage. On peut parler d'attribution distale pour faire référence au moment où l'enfant n'a plus besoin de regarder ses pieds pour marcher ; il n'est plus concentré sur son équilibre – sur lui-même – mais sur là où il veut aller – qui lui est extérieur. L'attribution distale a aussi lieu lorsqu'un individu apprend à jouer un instrument de musique : le débutant se concentre d'abord sur la technique liée à l'instrument (la position et les mouvements de ses doigts, notamment) et ce n'est que lorsque cette technique est maîtrisée qu'il peut s'en « extraire » et se concentrer alors sur la musique à part entière – sur le son produit par l'instrument. De même, dans l'acquisition d'une danse les rudiments consisteront à apprendre à placer son corps, tandis qu'un danseur professionnel sera concentré sur des éléments

extérieurs comme l'espace, ses partenaires, le rythme, etc. Un joueur de sport de balles débutant est meilleur lorsqu'il se concentre sur sa tâche, soit sur les mouvements de son bras ou de son pied contrôlant la balle (donc sur lui-même) ; un joueur professionnel est meilleur lorsqu'il se concentre sur la trajectoire de la balle (donc sur l'extérieur) (Beilock, Berthental, Carr, & McCoy, 2004 pour le golf et Ford, Hodges, & Williams, 2005 pour un même résultat sur le football). Enfin, lors de l'apprentissage d'une langue l'attribution distale concerne le moment où l'individu est capable de « penser » dans cette langue¹⁴ : le moment où la concentration passe du signe (le langage) à la chose signifiée (le monde). Tous ces exemples montrent que le processus d'attribution distale est le corrélat de la maîtrise de l'individu sur le monde. Nous avançons l'hypothèse que le processus d'attribution distale est le fondement et le principe explicatif de la construction du monde extérieur par l'individu, et nous voulons tenter de comprendre son fonctionnement.

Pour une question de précision et de clarté, nous utiliserons le terme d'« attribution distale » pour parler du processus, et de « perception distale » pour parler du phénomène. Comme nous venons de le mentionner, l'attribution distale est en jeu dans beaucoup d'autres phénomènes que dans la substitution sensorielle ; néanmoins la perception distale est une conséquence phénoménale propre à l'attribution distale appliquée à la substitution sensorielle.

3.2. Les cinq étapes de l'appropriation d'un dispositif de substitution sensorielle d'Auvray

Le processus d'apprentissage des dispositifs de substitution sensorielle mène donc de sensations proximales « brutes » et insignifiantes en tant que telles à une forme de perception distale où le sujet distingue directement son environnement et oublie le dispositif. Ce processus est décrit par Auvray (2004) en cinq étapes appelées « les étapes de l'immersion ». L'immersion est définie « dans un espace perceptif ouvert par un outil comme une appropriation active de cet outil » et les cinq étapes correspondent aux « cinq différents moments de cette appropriation » (p.79). Nous allons les spécifier afin d'y préciser la place de l'attribution distale. Auvray la définit pour sa part comme une « spatialisation des objets dans

¹⁴ L'apprentissage d'une seconde langue à un âge avancé illustre particulièrement bien le phénomène ; les individus commenceront souvent par traduire pour comprendre ou s'exprimer, avant d'être capable de s'extraire de leur langue natale.

le monde », « corrélatif de [...] la spatialisation de l'action, qui correspondrait à la compréhension de nos actions comme étant mouvements dans l'espace c'est-à-dire comme étant des déplacements ».

La première étape est celle du « contact ». Elle « implique l'apprentissage des régularités sensorimotrices nécessaires à stabiliser et à maintenir le contact perceptif avec le stimulus » (p.79). Il s'agit du moment où l'utilisateur extrait les lois de transformation de l'appareil, c'est-à-dire le moment où il comprend à quels mouvements correspondent quelles sensations en fonction de l'environnement extérieur à percevoir. Il s'agit du début du processus d'attribution distale, de son enclenchement.

La première étape de l'appropriation d'un outil, l'étape du contact, consiste en l'extraction des régularités entre les actions effectuées dans l'espace organique et les stimulations sensorielles résultantes. Les utilisateurs apprennent ainsi les régularités sensorimotrices nécessaires à stabiliser et à maintenir le contact perceptif avec le stimulus. (Auvray, 2004, p.80)

La seconde étape est celle de « l'attribution distale ». Elle désigne « la compréhension, par les utilisateurs, que l'origine de leurs sensations est due à la rencontre avec un objet provenant de l'espace perceptif ouvert par l'outil » (p.79). Sur la base de l'extraction des régularités entre actions et effets sensoriels de l'étape contact, les utilisateurs vont être capables d'identifier les variations de leurs sensations comme correspondant à un objet dans l'espace ainsi que d'identifier leurs actions comme déplacement dans l'espace – et non plus seulement comme déplacement proximal de la caméra.

Les utilisateurs doivent comprendre l'existence d'un couplage. Ils doivent ainsi extraire les relations invariantes entre leurs actions et la stimulation sensorielle résultante. La compréhension de ce couplage permet aux utilisateurs, d'une part, de comprendre l'existence d'un espace distal. Le déplacement de leurs points d'actions organiques est alors compris comme déterminant le déplacement d'un point d'action dans l'espace distal. La compréhension de ce couplage permet, d'autre part, aux utilisateurs d'extraire l'existence d'un objet distal. En d'autres termes, les utilisateurs doivent comprendre que les variations dans la stimulation sensorielle correspondent à des variations de points de vue sur un objet de l'espace distal. (Auvray, 2004, p.81)

Il s'agit de la définition même du processus d'attribution distale : la projection de ce qui n'était alors que sensations proximales dans des percepts distaux. Cette projection n'est pour l'instant qu'inférence indirecte ; les prochaines étapes sont indispensables à l'automatisation de cette projection.

La troisième étape est celle de « la maîtrise de l'espace distal ». Il s'agit de « l'apprentissage des variations des points de vue et d'inscription distaux, permettant ainsi aux utilisateurs de localiser objets et événements de l'espace perceptif distal relativement à un point de vue appartenant à cet espace » (p.79). L'utilisateur peut maintenant non seulement identifier l'espace, mais également faire varier ses points de vue et d'action. Il s'agit autrement dit de la mise en pratique du lien entre actions et sensations, établi lors de l'étape précédente de l'attribution distale. A l'étape de la maîtrise de l'espace distal correspond la « maîtrise » de l'attribution distale, son déploiement dans l'espace.

Une fois que les utilisateurs ont compris l'existence d'un espace perceptif distal et l'existence de points d'actions dans cet espace perceptif distal, ils peuvent apprendre à faire varier leurs points de vue et d'inscription distaux. La troisième étape, la maîtrise de l'espace distal consiste pour les utilisateurs à acquérir de nouveaux couplages sensorimoteurs, induits par l'outil, ce qui implique d'apprendre à faire varier leurs points d'actions dans l'espace perceptif ouvert par l'outil. Les utilisateurs parviennent ainsi à modifier l'espace perceptif distal et à localiser objets et événements de cet espace perceptif distal relativement à un point de vue appartenant à cet espace. (Auvray, 2004, p.82)

La quatrième étape est appelée « localisation distale ». Elle « se définit comme l'impression d'être dans l'espace perceptif ouvert par une médiation technique. Elle implique une automatisation du nouveau couplage sensorimoteur, permettant à l'utilisateur de se sentir entièrement là où il agit » (p.79). Cette automatisation de l'attribution distale a pour conséquent la projection du sujet dans l'espace ouvert par l'appareil et l'accès direct aux percepts sans le passage « conscient » par les sensations. Cette étape est le résultat final de l'attribution distale : la perception distale. Le processus est désormais finalisé. L'utilisateur a oublié l'appareil et il perçoit les objets à distance dans le monde extérieur.

La quatrième étape, la localisation distale correspond à l'impression de se situer et d'agir dans l'espace perceptif ouvert par l'outil. Cette étape implique une

automatisation du nouveau couplage sensorimoteur. Une fois que les utilisateurs parviennent à avoir un accès direct aux effets de leurs actions, sans avoir à réfléchir sur le maniement de l'outil ou sur le code utilisé, ils peuvent se sentir entièrement là où ils agissent, c'est-à-dire dans l'espace perceptif distal. (Auvray, 2004, p.84)

La cinquième étape est « la constitution d'une expérience distale ». Elle « *implique le partage de l'expérience perceptive, partage qui permet de constituer le sens, l'émotion et les valeurs communes attachées à cette expérience* » (Auvray, 2004, p.87). Cette étape manquerait actuellement aux utilisateurs de la substitution sensorielle ; elle renvoie au fossé précédemment mentionné entre technique et expérience subjective, et à l'échec phénoménologique actuel des appareils – qui ne sont pas utilisés par les populations malvoyantes et non-voyantes.

L'attribution distale est donc un processus permettant de mettre en lien des sensations proximales avec un monde extérieur (étape de l'attribution distale) et de comprendre leurs rapports au travers de régularités (étape de la maîtrise de l'espace distal) jusqu'à atteindre une autonomisation de ces rapports, conduisant à une perception directe d'un environnement distale et à l'oubli des sensations proximales (étape de la localisation distale). La perception distale émerge de ce processus.

3.3. La nécessité du mouvement pour l'acquisition d'une perception distale

L'attribution distale est le processus qui nous intéresse pour comprendre la construction cognitive de la perception distale et la substitution sensorielle est un bon paradigme pour en investiguer sa genèse. Ce passage de sensations physiologiques, ancrées corporellement, à une perception du monde extérieur pourrait permettre de comprendre comment l'individu acquiert une perception du monde spatialisé.

3.3.1. La nécessité du mouvement dans la substitution sensorielle

Une première observation concernant le fonctionnement de l'attribution distale est que ce processus a pour nécessité l'action : sans mouvement, l'individu n'acquiert aucune maîtrise

du monde qui l'entoure¹⁵. Ceci se concrétise dans la substitution sensorielle par la constatation que l'utilisateur passif qui ne manipule pas la caméra n'acquerra pas de perception distale. Les premières observations de ce phénomène ont été établies par le rapport subjectif des utilisateurs, lors des premiers essais avec le TVSS. Ceux ayant la possibilité de déplacer la caméra rendaient compte de leur expérience en termes d'objets localisés dans l'espace extérieur, tandis que ceux ayant reçus les stimulations tactiles d'une caméra immobile rendaient compte de leur expérience en termes de sensations reçues sur leurs dos.

In addition to the three-dimensional interpretation of motion in tactile displays, the results thus far point to the great importance of self-generated motions on the part of the observer. [...] With fixed camera, subjects report experiences in terms of feelings on their backs, but when they move the camera over the displays, they give reports in terms of externally localized objects in front of them. (White et al., 1970, p.25)

White suggère à partir de ces résultats l'hypothèse que la corrélation entre des mouvements auto-générés de l'utilisateur et des inputs sensoriels est la condition nécessaire et suffisante de l'attribution distale.

It is at least a plausible hypothesis that a translation of the input that is precisely correlated with self-generated movement of the sensor is the necessary and sufficient condition for the experienced phenomena to be attributed to a stable outside world. (White et al., 1970, p.25)

Comme Lenay et al. (1997) le soulignent, ceci indique que la simple « substitution » d'un input visuel par un input tactile ne suffit pas à permettre la reconnaissance des formes : il faut que l'utilisateur ait la possibilité de manipuler la caméra – manipulation définie comme des mouvements de droite à gauche et de haut en bas.

Forms that are shown to an immobile camera enable only limited discrimination of the stimuli received, and these are perceived as being situated on the surface of the skin. Thus, the mere substitution of an input through the optic nerve by a tactile input does not, as such, enable a spatial type of perception. However, if the user is given the

¹⁵ Aussi récente et contre-intuitive que l'idée puisse paraître, elle est pourtant logique si on la rapporte aux exemples de processus d'attribution distale cités précédemment : pour maîtriser un instrument, une activité physique, ou un langage, il faut le pratiquer, l'utiliser... De même, pour « maîtriser » la perception du monde, il faut l'« utiliser », c'est-à-dire agir dedans.

possibility to manipulate the camera (e.g. to perform right-to-left and up-and-down movements, forward and backward zooming, focusing changes), he/she develops spectacular abilities to recognize forms. (Lenay et al., 1997, p.45)

Expérimentalement, la nécessité du mouvement dans la substitution sensorielle a été observée dès les premières utilisations des dispositifs de substitution sensorielle avec le TVSS (Bach-y-Rita, 1967 ; White et al., 1970). En effet, la caméra du TVSS était initialement fixe. Ceci ne permettait qu'une acquisition limitée de la maîtrise de l'appareil, les utilisateurs n'étaient capables de discriminer les stimuli reçus que de manière très limitée (Bach-y-Rita, 2002). C'est seulement lorsque le sujet s'empare de la caméra, lorsqu'il rend ses sensations « actives », que l'attribution distale peut avoir lieu et que les informations proximales reçues prennent sens. Grâce aux mouvements possibles sur les différents axes (mouvements latéraux, verticaux, sagittaux, zooms éventuels, etc.), le sujet peut établir les liens entre ses actions et les sensations résultantes¹⁶. Cette nécessité du mouvement a par la suite été étudiée par l'équipe COSTECH (Lenay et al., 1997; Lenay et al., 2003) ; nous reviendrons sur ces études.

Plus récemment, le rôle du mouvement dans la substitution sensorielle a été démontré par Díaz, Barrientos, Jacobs, et Travieso (2012). Les auteurs utilisent un dispositif de substitution sensorielle similaire à celui de Cardin, Thalmann, et Vexo (2007) et Reynolds, Cassinelli, et Ishikawa (2008). Des capteurs forment une barrette verticale sur le torse et réagissent par des vibrations en fonction de la distance des objets rencontrés : plus l'objet est proche, plus la vibration est intense. En plus de l'information statique, une information dynamique fonctionne en analogie avec le flux optique : si l'utilisateur se déplace vers un obstacle situé au sol, l'intensité de vibration des capteurs suivra un mouvement descendant sur la barrette. Avec ce dispositif, dans une première expérience les auteurs testent l'hypothèse selon laquelle une exploration active a pour résultat une meilleure performance. La tâche des sujets – qui sont aveuglés – est de déterminer la hauteur d'une cible (une planche de bois) par rapport au niveau du sol. Dans une première condition, les participants sont munis du dispositif et ont pour consigne de ne pas bouger. Dans une seconde condition, les participants sont encouragés à effectuer des mouvements exploratoires avec le dispositif. Les

¹⁶ Ceci a amené Lenay à critiquer l'appellation de « substitution sensorielle » : « La *perception* d'un objet stable devant soi est bien distincte de la succession des *stimuli sensoriels* très variables que reçoit le sujet alors qu'il déplace constamment sa caméra. Nous préférons donc parler de dispositifs de suppléance perceptive puisque l'usage de ce type de système est fondamentalement sensorimoteur (et non pas seulement sensoriel) et qu'il offre une expérience vécue spécifique assez différente de celle de la vision (ce n'est pas une substitution) » (Lenay, 2006, p.28).

auteurs trouvent un avantage significatif de la seconde condition par rapport à la première sur la tâche, montrant que le mouvement favorise effectivement la détection de la hauteur de la cible¹⁷.

Concernant le dispositif de The vOICe, Bermejo, Di Paolo, Hüg, et Arias (2015) comparent leurs résultats avec ceux de Brown, Macpherson, et Ward (2011). Dans les deux cas, les auteurs demandent à des sujets d'identifier des formes géométriques planes. La différence notable entre les deux études est que dans le cas de Brown et al. les participants ne sont pas munis du dispositif ; ils sont exposés à des paysages sonores préenregistrés obtenus avec The vOICe. Les participants de Bermejo et al. sont en revanche équipés du dispositif et ont la possibilité de se déplacer librement. Brown et al. observent un taux de réussite de 33% (niveau de hasard à 25%) sur 72 essais, par opposition au taux de réussite de 57% (niveau de hasard à 33%) en seulement 18 essais de Bermejo et al. C'est donc le mouvement qui ferait la différence entre les deux études et permettrait une meilleure « perception » dans le cas de Bermejo et al.

Le mouvement est donc un élément nécessaire au processus d'apprentissage de l'attribution distale – qui peut ainsi être qualifié d'apprentissage « perceptivo-moteur ».

La perception mise ainsi en œuvre n'a pas le caractère immédiat et abstrait d'un simple transfert passif d'informations d'une modalité sensorielle vers une autre modalité sensorielle : elle n'apparaît possible qu'à l'issue d'un apprentissage perceptivo-moteur. Le rôle des mouvements de l'utilisateur semble constituer le point crucial de l'apprentissage avec un dispositif de substitution sensorielle. (Auvray, 2004, p.15)

3.3.2. Dans la perception en général

Le rôle de l'action pour la perception ne se révèle pas uniquement dans la substitution sensorielle. Nous avons déjà cité les études de cas de Jeannerod (1975, 1979) et Gregory et Wallace (1963) ou encore le projet Prakāsh (voir Sinha, 2013, Sinha et al., 2013, et Mandavilli, 2006).

¹⁷ Nous reviendrons plus tard sur la suite des expériences de Diaz et al. : les auteurs testent notamment l'hypothèse que ce n'est pas le mouvement à proprement parler qui est nécessaire à l'acquisition d'une perception spatiale, mais le flux vibrotactile reçu en rapport avec les stimuli distaux (auquel cas l'action n'aurait qu'un rôle contingent).

L'une des premières études à montrer l'importance de l'action pour la perception est celle de Held et Hein (1963). Dix paires de chatons sont d'abord élevées dans le noir pendant dix semaines, afin de les empêcher d'établir un lien entre leurs actions et leurs perceptions visuelles. Une fois cette période achevée, deux à trois heures par jour les chatons sont placés par paires dans un manège et reliés entre eux (cf. Figure 8).

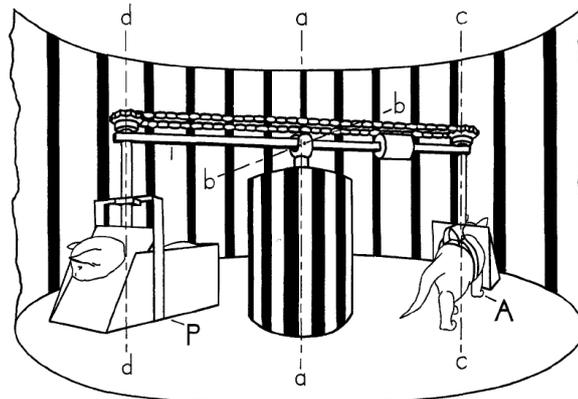


FIG. 1. Apparatus for equating motion and consequent visual feedback for an actively moving (A) and a passively moved (P) S.

Figure 8 : Dispositif expérimental de Held et Hein

Pour chaque paire et durant toute l'expérience, un chaton est placé dans la condition « active » et l'autre dans la condition « passive ». Le chaton de la condition active est attaché uniquement au milieu du corps tandis que le chaton de la condition passive est quant à lui installé dans une nacelle. Le chaton « actif » déclenche le manège en marchant tandis que le chaton « passif » avance uniquement parce que l'autre avance. Autrement dit, le flux visuel est identique pour les deux chatons, mais c'est le chat actif qui crée ce flux ; il est le seul à avoir une relation « correcte » entre perception et action. Dans un deuxième temps, Held et Hein font faire aux chatons le test de la falaise : les chats sont placés sur des vitres sous lesquelles est représentée une falaise. Les chats avancent sur la vitre en marchant (cf. Figure 9). On observe que le chaton actif s'arrête au niveau du dénivelé, tandis que le chaton passif a un comportement visuellement guidé anormal. Il agit comme s'il n'avait pas acquis de perception de la profondeur et ne s'arrête pas.

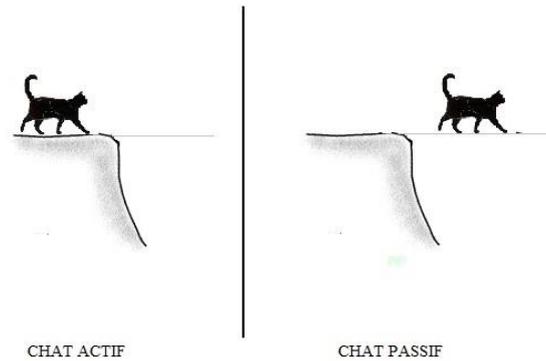


Figure 9 : Test de la falaise

Il semble donc qu'il faille bien avoir une action sur le monde pour avoir une perception correcte. L'individu a besoin d'agir et de mettre en relation ses actions avec les effets sensoriels qui en résultent pour accéder à la perception spatiale tridimensionnelle.

Néanmoins, le fait que l'expérience (ici, l'expérience perceptive) soit *affectée* par l'action ne veut pas dire que l'action ait un lien causal nécessaire à l'expérience. Que le mouvement permette l'attribution distale dans la substitution sensorielle ne veut pas nécessairement dire qu'il en soit constitutif. L'étude de Held et Hein (1963) démontre certes une influence contingente de l'action sur la perception visuelle, mais non un lien constitutif ; les chatons dans la condition passive peuvent avoir des troubles de la perception visuelle parce qu'ils ont été privés de mouvement, mais pas parce que le mouvement est nécessairement constitutif de la perception visuelle.

Le rôle de l'action dans la substitution sensorielle pour que le sujet parvienne à une « attribution distale » est aujourd'hui reconnu et largement établi : faire mention de l'aspect essentiel de l'action ne suffit plus. Il faut l'expliquer et, si l'on veut placer ces résultats dans le cadre des théories sensorimotrices, démontrer son rôle *constitutif*. C'est ce sur quoi les recherches les plus actuelles portent.

4. Etablir le rôle constitutif de l'action pour l'émergence de la perception distale dans les dispositifs de substitution sensorielle

Nous avons vu que le véritable débat concernant le lien entre action et perception ne porte pas sur l'existence ou la non-existence d'un tel lien, mais sur la manière dont celui-ci est organisé. Pour défendre l'hypothèse que le mouvement dans la substitution sensorielle est nécessaire *absolument* – et non de manière contingente – il nous faut montrer que le mouvement a un rôle causal et constitutif.

La nécessité du mouvement pour l'acquisition d'une perception distale dans la substitution sensorielle, observée chez Bach-y-Rita dès les premières expériences (1967) a souvent servi d'argument aux théories de la cognition incarnée et située – plus précisément aux partisans des théories sensorimotrices ; or que le mouvement soit nécessaire à la perception distale ne prouve pas qu'il y soit causalement lié et constitutif. Les résultats de Bach-y-Rita concernant le rôle du mouvement ne sont en fait pas opposés à un « sandwich model » (Hurley, 2001). En effet, dans la plupart des dispositifs (du moins dans le TVSS et dans The vOICE) les retours sensoriels sont spatialisés¹⁸ : l'utilisateur ressent des sensations tactiles ou auditives localisées (plus en haut ou plus en bas du dos, dans l'oreille droite ou dans l'oreille gauche, etc.). On peut donc suggérer que le mouvement est nécessaire simplement en tant que générateur de cette spatialisation : il permettrait uniquement de provoquer les retours sensoriels nécessaires à l'attribution distale ; je fais un mouvement vers le haut, en conséquence la sensation tactile est perçue en haut du dos – ou un son aigu est perçu qui s'interprète comme marquant le haut de l'espace. Dans ce cas, l'action serait seulement contingente de la perception. Si l'on veut démontrer le rôle causal de l'action sur la perception, il ne suffit plus de se contenter de l'observation qu'il n'y a pas de perception sans action : il faut montrer que l'action est nécessaire à la perception. Autrement dit, il faut montrer que l'organisation perceptive est tributaire des capacités d'action du sujet.

¹⁸ Attention néanmoins : le fait que ces retours sensoriels soient spatialisés ne veut pas pour autant dire qu'ils soient distaux. Une spatialisation n'est pas nécessairement tridimensionnelle : on peut ressentir des sons sur la peau et des ondes sonores dans les tympans, cela n'en fait pas des objets distaux.

4.1. Réfuter l'hypothèse de la spatialité des retours sensoriels : les dispositifs minimalistes

Pour réfuter l'hypothèse que l'action n'aurait que le rôle contingent de révéler la spatialité contenu dans les retours sensoriels des dispositifs, Lenay et al. (1997) mettent en place un dispositif dit « minimaliste ». Le retour sensoriel dans ce dispositif n'est plus spatial ; l'appareil est simplifié à l'extrême. Le but de cet appareil est de permettre de définir les conditions minimales pour l'attribution distale.

Our aim is to define the minimal technical conditions required for the emergence of the sense of exteriority of an object in a perceptive space where it can be located. To do this, we use a sensory substitution device which has been simplified to the extreme, so as to enable us to identify the limit where this spatialization becomes possible. (Lenay et al., 1997, p.46)

Une unique cellule photoélectrique fixée sur un doigt de la main droite est connectée à un stimulateur tactile (un simple vibreur) tenu dans l'autre main. Le vibreur réagit en tout ou rien au dépassement d'un seuil d'activation de la cellule photoélectrique (cf. Figure 10). Il n'y a ainsi qu'un seul point de stimulation correspondant à un seul champ récepteur – contrairement au TVSS qui dispose de 400 points de stimulation correspondant à autant de champs récepteurs distincts de la surface sensible de la caméra.

We have chosen a simple photo-electric cell fixed to a finger of the subject's right hand and connected to a tactile stimulator (a vibrator) which is held in the other hand. The vibrator reacts in all-or-none fashion to the crossing of a threshold of activation of the photo-electric cell, which captures a fairly wide ray of incidental light (approximately 20°). Thus there is only one point of stimulation, corresponding to one receptor field (by contrast, the TVSS has 400 stimulation points corresponding to the same number of distinct receptor fields on the camera's sensitive surface).” (Ibid.)

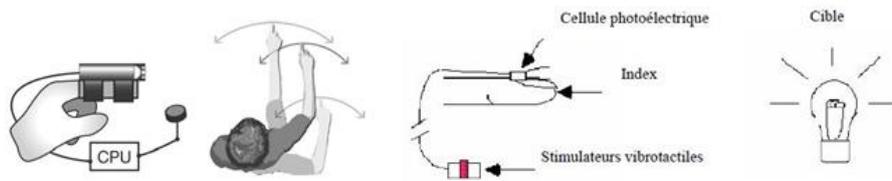


Figure 10 : Schéma du dispositif minimaliste de Lenay et al. (1997)

Or, après quelques minutes d'exploration, un sujet aux yeux bandés et qui peut librement mouvoir le bras et la main tenant le récepteur réussit à localiser une cible lumineuse, c'est-à-dire à indiquer sa direction et sa distance approximative. Alors qu'il maîtrise mieux la production active de ses stimulations tactiles, il ressent la présence d'un objet situé au-delà de lui dans l'espace. Ainsi, même sans spatialisation des retours sensoriels, un processus d'attribution distal est mis en place : les utilisateurs du dispositif minimaliste finissent après un temps d'apprentissage par attribuer les sensations reçues à des objets extérieurs et à se détacher de ces sensations pour percevoir un monde spatialement distant. Ce phénomène est observable à la fois dans l'analyse des résultats obtenus du point de vue de l'observateur extérieur (capacité de sujets à rendre compte de la direction, de la distance et du volume des objets dans l'espace) et dans le rendu subjectif des sujets.

Results from the point of view of the outside observer: after a few minutes of exploration, the subject proves able to locate the target, i.e. to indicate its direction and its approximate distance. He can also make a rough evaluation of the target's volume. [...] Results from the point of view of the subject: after an initial period searching for any activation of the vibrator, he perceives those first tactile stimulations as located on his skin. But very soon, as he gains better control over the production of such stimulations, he senses the presence of an object located in space outside of him. The succession in time of the sensations he receives seems to point to different "contacts" with a single distal object. (Lenay et al., 1997, p.46)

Ce dispositif permet d'observer la mise en place d'une attribution distale malgré des retours sensoriels eux-mêmes non spatialisés. La spatialisation de la perception ne peut donc pas émerger de la spatialisation des retours sensoriels.

Ici, il est clair que la perception ne peut être fondée sur une simple analyse interne de l'information sensorielle ne serait-ce que parce que celle-ci ne possède aucune spatialité intrinsèque, mais n'est qu'une suite temporelle de sensations s_0 , s_1 . La perception est nécessairement une synthèse des successions d'actions et sensations.
(Lenay, 2006, p.29)

4.2. Réfuter l'hypothèse d'une contingence entre flux vibrotactile et mouvements

Les dispositifs minimalistes suffisent-ils à prouver la nécessité constitutive de l'action dans la substitution sensorielle ? Dans les expériences menées par Diaz et al. (2012), il est mentionné l'hypothèse que ce n'est pas l'action en elle-même qui serait nécessaire, mais seulement le *lien* entre actions et effets sensoriels. Que se passe-t-il si les utilisateurs reçoivent ces sensations de quelqu'un d'autre, sans effectuer d'action ?

Nous avons déjà mentionné la première expérience de Diaz et al (2012) qui démontre qu'une exploration active avec leur dispositif de substitution sensorielle a pour résultat de meilleures performances qu'une exploration passive (où la caméra est immobile). Or, les auteurs remarquent que la supériorité du groupe dynamique sur le groupe statique peut en fait être attribuée à deux causes : au flux vibrotactile plus riche pour le groupe dynamique et (/ou) au fait que le flux vibrotactile dans le groupe dynamique ait été généré par les participants eux-mêmes et était de ce fait consistant avec les mouvements exploratoires. Cette ambiguïté concernant la cause de la meilleure performance du groupe dynamique est également présente dans les autres dispositifs de substitution sensorielle. Le bénéfice d'une exploration active est-il *uniquement* dû au fait qu'une exploration active mène à un flux vibrotactile plus dynamique et donc plus riche, ou est-il en plus nécessaire que le flux dynamique soit consistant avec les actions exploratoires ? Dans le second cas, l'action ne serait pas constitutivement nécessaire à l'attribution distale.

Les expériences 2 et 3 de Diaz et al. visent à lever cette ambiguïté. L'expérience 2 (p.1583) compare deux groupes de participants : un groupe avec un fonctionnement actif « normal » du dispositif, où les sujets reçoivent un flux vibrotactile correspondant aux mouvements qu'ils effectuent ; et un groupe qui reçoit un flux vibrotactile préenregistré (celui

généralisé par le premier groupe) et donc indépendant de ses mouvements. L'analyse des résultats révèle une plus grande proportion de réponses correctes pour le groupe dynamique (groupe 1 ; .85) que pour le groupe « attelé » (« *yoked group* ») (groupe 2 ; .76). De plus, les participants du groupe 2 effectuent moins de mouvements. Ceci indique la supériorité des actions exploratoires auto-générées par l'utilisateur.

This indicates that the exploratory actions used to generate the vibrotactile flow facilitated perception beyond the fact that the flow caused by the exploratory actions was richer than the flow that would have occurred in the absence of such movements. (Diaz et al., p.1585)

L'expérience 3 permet de vérifier que cette différence ne soit pas due à des styles différents d'exploration. En effet, les auteurs remarquent que différents participants du groupe dynamique utilisent différents styles d'exploration. Par exemple, certains participants gardent le dos droit et marchent lentement en avançant ou en reculant, tandis que d'autres marchent moins mais penchent davantage leur dos d'avant en arrière. L'expérience 3 a donc pour but de vérifier que le groupe dynamique de l'expérience 2 (groupe actif de l'expérience 1) a une meilleure performance que le groupe rattaché, non seulement parce que les participants génèrent le flux vibrotactile eux-mêmes, mais aussi parce qu'en conséquent ils reçoivent une structure de flux correspondant à leur propre style d'exploration. Ainsi, les participants de l'expérience 3 accomplissent la tâche deux fois : une dans la condition dynamique et une dans la condition « attelée à soi » (« *self-yoked condition* ») où ils reçoivent la structure de flux qu'ils ont eux-mêmes générés dans la condition dynamique. Or, la moyenne proportionnelle des détections correctes est toujours significativement meilleure dans la condition dynamique (.81) que dans la condition attelée (.76). La supériorité du flux auto-généré (sur un flux imposé) n'est donc pas attribuée aux préférences individuelles pour un style d'exploration, mais bien au mouvement lui-même.

The fact that the same vibrotactile flow results in different levels of performance depending on the consistency of the flow and the exploratory movements means that perception is not limited to patterns of stimulation on the skin, and immediately underlying tissue. Instead, perceivers may use a complex flux of stimulation that involves receptors in the different parts of the movement system. (Diaz et al., p.1588)

Les auteurs concluent que le rôle du mouvement pour l'attribution distale dans la substitution sensorielle semble acquérir un statut informatif car il permet la création d'un flux d'invariants – flux d'invariant qui a pour fonction de mettre l'accent sur la manière dont les variations des sensations proximales se répètent selon le type de mouvements. Autrement dit, le mouvement de la caméra permet de mettre en lien l'action avec les sensations pour faire émerger la perception distale.

With embodied substitution devices, the movements of users in an environment become informative. Moving in an environment gives rise to complex sensory flows, distributed over the receptors of the skin and of the user's movement apparatus. These complex flows may contain invariants that specify action-relevant properties and can hence be used to perceive such properties. (Diaz et al., p.1592)

Ces observations sont en accord avec la théorie gibsonienne de la perception (voir Gibson, 1962, 1966, 1979) et les théories sensorimotrices (voir O'Regan & Noë, 2001 ; O'Regan, Myin, & Noë, 2005 ; Hurley & Noë, 2003 ; Lenay et al., 1997 ; Lenay, 2006) que nous allons maintenant développer. Nous allons voir comment le lien entre sensations et mouvements peut expliquer l'attribution distale selon ces théories.

CHAPITRE 1.3

EXPLIQUER L'ATTRIBUTION DISTALE PAR UN
MECANISME SENSORIMOTEUR

1. Définition et explication du processus

Nous arrivons maintenant au cœur d'une question essentielle à notre problématique, à savoir : comment est organisé le lien entre action et perception ? Quel est le mécanisme sous-jacent permettant à ce lien de faire émerger la perception distale ?

1.1. Définition du processus sensorimoteur : le lien entre sensations et retours sensoriels.

La majorité des études s'intéressant au rôle de l'action dans la substitution sensorielle inscrivent leurs résultats dans la théorie sensorimotrice (O'Regan & Noë, 2001 ; O'Regan, Myin, & Noë, 2005 ; Hurley & Noë, 2003 ; Lenay et al., 1997 ; Lenay, 2006). Selon cette théorie, le rôle de l'action dans la substitution sensorielle serait de faire le lien entre les mouvements exploratoires effectués avec la caméra du dispositif par les utilisateurs et les retours sensoriels que ces mouvements provoquent – c'est-à-dire les sensations « proximales » reçues via le dispositif (auditives ou tactiles pour la majorité des appareils).

Il convient de préciser avant d'aller plus loin que, comme le signalent Lenay et al. (1997), la question posée par l'émergence de la perception distale dans la substitution sensorielle n'est pas de savoir comment le sujet parvient à avoir une notion de l'espace – il en a déjà une – mais bien de savoir par quel processus cette notion de l'espace peut s'appliquer à un monde « extérieur » à partir des sensations données par le dispositif.

The problem is not so much to understand the way in which the notion of space is generated as such. The subjects already have general notions of exteriority, space and time. What we are looking at is the process of constructing the spatialisation of an object which will thereafter be thought of as the source of the subject's sensations.
(Lenay et al., 1997, p.48)

Autrement dit, comment par ses actions le sujet parvient-il à inférer l'existence d'objets extérieurs provoquant ses sensations ? La plupart des études s'appuient sur l'approche écologique de Gibson (1962, 1966, 1979) et la théorie sensorimotrice d'O'Regan et Noë (2001) pour répondre à cette question.

1.1.1. Gibson : les invariants sensorimoteurs pour définir le rôle de l'action dans l'attribution distale

Gibson (1966) distingue les qualités d'une expérience vécue – ce que l'on ressent lorsque l'on vit une expérience, autrement dit l'expérience du point de vue du sujet – et l'information que contient cette même expérience – ce que cette expérience me dit du monde extérieur ; le point de vue est alors déplacé vers un extérieur « objectif ». Cette distinction est à la base de l'attribution distale¹⁹. En conséquent, les sens eux-mêmes ont un rôle double : ils peuvent être conçus à la fois comme canaux de sensations, en ce sens *passifs*, sources des qualités conscientes de l'expérience ; ou bien comme systèmes perceptifs *actifs* qui extraient ces informations et sont sources de connaissances sur le monde (Gibson, 1966). Par exemple, la vision est à la fois la réception passive de lumière sur la rétine et la source active des informations visuelles associées (ce que je *perçois* quand je reçois cette lumière). Cette distinction permet à Gibson d'effectuer une séparation radicale entre sensations et perception se rapprochant de celle de Reid : « *la sensation n'est pas un prérequis de la perception, et les impressions sensorielles ne sont pas les 'données brutes' de la perception* » (Gibson, 1966, traduit et cité par Pacherie 1997, p.21), elles n'en sont qu'un accompagnement occasionnel. Cette distinction tranchée concorde particulièrement avec les résultats de l'attribution distale dans la substitution sensorielle, puisque cette attribution distale est justement l'acte de séparation des sensations brutes (reçues par le dispositif) avec la perception d'un monde extérieur. Cependant, si l'on peut effectivement distinguer sensations données par le dispositif et perception distale, il demeure que la perception distale est bien *basée* sur ces sensations : c'est par le codage entre sensations et caractéristiques du monde extérieur que l'attribution distale a lieu. Par exemple, une sensation sentie en haut du dos (pour les dispositifs visuo-tactiles) ou aigue (pour les dispositifs visuo-auditifs) code le haut de l'image. Si le sujet n'est pas mis au courant de ces codes, il n'acquiert pas de perception distale (cf. Auvray, 2004). Ce que la théorie gibsonienne permet de suggérer dans ce contexte est à quel point ce codage est contingent. L'essentiel n'est pas qu'une sensation spécifique soit rattachée à une perception spécifique, mais qu'il y ait simplement rattachement. Autrement dit, ce ne sont pas les caractéristiques de la sensation (e.g. pour la vision, la manière dont la lumière est reçue et structurée par le système visuel) ni de la perception (e.g. les caractéristiques « extérieures » et

¹⁹ Nous l'avons explicitée plus haut : l'attribution distale suppose le passage d'un point de vue « intérieur » (le sujet est concentré sur ses sensations corporelles) vers l'extérieur (le sujet est concentré sur « le monde »).

« objectives » des objets dans le monde) qui importent pour l'attribution distale, mais simplement le fait que sensation et perception soient liées dans et par l'action.

Comment se construit la perception si celle-ci est distincte des sensations ? Si la perception visuelle d'un objet n'est pas extraite du traitement de la sensation de lumière sur la rétine, d'où vient-elle ? Gibson répond à cette question en redéfinissant la perception comme un processus d'extraction d'invariants sensorimoteurs. L'exemple couramment utilisé pour expliciter cette définition est celui de « champ optique ambiant » (Cf. Figure 11). Le champ optique ambiant est l'ensemble des réflexions lumineuses d'un environnement perçu par un observateur depuis un point de l'environnement²⁰. Il remplace dans la théorie gibsonienne le concept d'image rétinienne. La sensation visuelle correspond à la lumière qui structure le champ optique ambiant ; c'est la structure de ce champ qui constitue l'information contenue dans la perception. Mais cette variation de définition de la sensation – d'une projection sur la rétine à un champ optique ambiant – n'est pas suffisante en soi : elle n'apporte aucun renseignement supplémentaire sur une transition de la sensation à la perception. Comment la perception est-elle construite à partir d'un champ optique ambiant ? Gibson répond à cette question en se tournant vers les *relations* qu'entretient le sujet avec le champ optique. La solution se trouve dans l'idée que la structure de ce champ n'est perceptible que dans la mesure où elle varie. Autrement dit, ce sont les *invariants* de la structure et non la structure elle-même qui sont perçus.

Par-delà les changements dans les stimuli d'un lieu à l'autre et d'un temps à l'autre, on peut également montrer que certaines variables d'ordre supérieur — énergie du stimulus, rapports et proportions, par exemple — ne changent pas. Elles demeurent invariantes par rapport aux mouvements de l'observateur et aux changements d'intensité du stimulus. [...] Ces invariants du flux d'énergie qui arrive aux récepteurs d'un organisme correspondent aux propriétés permanentes de l'environnement. Elles constituent, par conséquent, de l'information sur l'environnement permanent. (Gibson, 1966 traduit et cité par Pacherie, 1997, p.21)

²⁰ L'environnement contient de la lumière. Gibson distingue deux types de lumière : la lumière rayonnante (*radiant light*) et la lumière ambiante (*ambient light*). La lumière rayonnante est celle qui provient d'une source comme le soleil, un feu, une ampoule, etc. Cette lumière vient frapper des objets qui la réfléchissent, réfractent, ou transmettent. Généralement, la lumière perd en intensité au fur et à mesure qu'elle frappe des objets. La lumière qui se diffuse ainsi jusqu'à « remplir » l'environnement est la lumière ambiante. Chaque point de l'environnement est donc l'intersection de rayons lumineux provenant de toutes les directions.



Figure 11 : Illustration du champ optique de Gibson (1966)

Le champ optique ambiant est donc un flux dans lequel les changements et les invariants (les invariants – ce qui ne change pas – étant perçus grâce aux changements) sont captés par l'œil. Or, la perception des changements dans ce flux optique n'est possible que grâce au mouvement : le flux change par déplacement des objets dans l'environnement, déplacement de la source de lumière, ou déplacement de l'observateur. Ainsi, le rôle du mouvement chez Gibson est de produire les invariants sensorimoteurs nécessaires à la perception ; l'espace n'est perceptible qu'à travers les déplacements du sujet.

En conséquent, la définition du monde comme ensemble de stimuli sensoriels se « donnant » aux individus dans la perception ne peut plus convenir ; d'où le concept Gibsonien d'affordances pour redéfinir l'environnement (Gibson, 1979). Les affordances permettent de déterminer comment le mouvement permet la perception. Elles sont définies comme des interactions potentielles entre un sujet et son environnement. Elles sont l'ensemble des possibilités qu'un environnement offre à un être vivant – le mot est construit à partir du verbe anglais « *to afford* » qui signifie « permettre », « fournir », et il est traduit par « opportunité ». Par exemple, pour l'homme, les poignées de portes offrent l'opportunité de tirer ou de pousser (tirer et pousser sont des affordances de la poignée de porte) ; les baskets offrent l'opportunité de courir (courir est une affordance des baskets). De plus, les affordances sont des propriétés de l'environnement en relation à l'être vivant qui évolue en lui ; elles sont ce que l'environnement permet à un animal de faire à *condition qu'il soit capable de percevoir et d'utiliser cet environnement*. Par exemple, le sol offre aux hommes la possibilité de marcher mais n'offre pas cette même opportunité aux poissons. Les affordances sont donc un exemple d'interaction entre la perception et l'action : les perceptions sont influencées par

les actions potentielles qu'elles permettent, et les actions potentielles sont à leur tour influencées selon ce que le sujet est capable de percevoir et de faire.

Selon la théorie Gibsonienne, les relations entre la perception et l'action sont donc définies à un niveau d'*interaction*²¹. Elles ont un rôle réciproque de modulation l'une envers l'autre. Ce qui nous intéresse particulièrement, c'est que cette interaction semble dépendre de la tâche (le niveau d'activité) et du contexte. La perception d'un sac en vente dans un rayon de magasin est ainsi modulée par l'acte de le remplir et de le porter : il pourra paraître plus grand ou plus lourd chez soi que dans le magasin. Le même sac pourrait paraître plus grand à un enfant qu'à un adulte, et il serait sans doute perçu plus gros sur le dos d'un enfant que sur celui d'un adulte. Ainsi, un sac «*afforde*» la possibilité de porter et d'être porté ; sa perception est modulée par cette *affordance* et les conditions dans lesquelles elle se manifeste. Les actions potentielles modulent la perception. Réciproquement et d'une manière qui peut sembler beaucoup plus évidente, la perception module l'action : on court avec des baskets parce que les baskets «*affordent*» de courir, le thé est servi en utilisant l'anse de la théière parce que l'anse «*afforde*» de tenir. Appliqué à la substitution sensorielle, on peut dire que les appareils «*affordent*» un type de perception : les actions potentielles avec la caméra modulent la perception des objets extérieurs (via les stimulations proximales reçues par les récepteurs sensoriels et les muscles) et la perception acquise par l'appareil module l'action (la perception consistant à identifier les objets motive l'action consistant à la découvrir).

Au-delà de l'introduction du rôle de l'action dans la perception, la distinction entre sensation et perception de Gibson permet la remise en cause d'une autre distinction bien ancrée dans les théories perceptives et cognitivistes en général : la séparation entre sensation et mouvement. En effet, en «*extrayant*» la perception de ce que le sujet ressent intérieurement à un moment donné, Gibson peut inclure dans ces «*ressentis proximaux*» les sensations et le mouvement, tout en redéfinissant l'un par l'autre. La sensation (alors comprise comme stimulus d'un champ récepteur) et le mouvement (alors compris comme activation d'un muscle) sont tous les deux parties des «*invariants sensorimoteurs*» définissant la perception ; mais alors la distinction entre l'aspect «*sensoriel*» et l'aspect

²¹ La théorie de Gibson est couramment utilisée comme support théorique par les défenseurs des théories de la cognition incarnée et située. Cependant, ceci est déjà une interprétation de sa théorie – qui, si elle intègre effectivement l'action, ne la définit pas analogiquement à la perception (contrairement aux théories radicales de la théorie incarnée).

« moteur » des invariants (ou de la perception) n'a plus de sens. La sensation est le mouvement, le mouvement est la sensation²².

1.1.2. La théorie sensorimotrice d'O'Regan et Noë

Les études sur le rôle de l'action dans la substitution sensorielle réfèrent à Gibson en tant que précurseur de la théorie sensorimotrice de la perception défendue par O'Regan et Noë (2001). En effet, cette théorie sensorimotrice et l'approche écologique de Gibson insistent toutes les deux sur le rôle de l'action et sur les mécanismes sensorimoteurs à l'œuvre dans la perception²³.

L'idée centrale de l'approche sensorimotrice d'O'Regan et Noë est celle d'« activité exploratoire » : les sens sont des modes d'exploration du monde, arbitrés par la connaissance de ce qui est appelé les contingences sensorimotrices (O'Regan, 2001, p.940). Les contingences sensorimotrices sont des lois physiques définissant les changements sensoriels produits par un mouvement donné. Par définition, ce sont elles qui permettent de distinguer les sens entre eux.

What differentiate vision from, say, audition or touch, is the structure of the rules governing the sensory changes produced by various motor actions, that is, what we call the sensorimotor contingencies governing visual exploration. Because the sensorimotor contingencies within different sensory domains (vision, audition, smell, etc.) are subject to different (in)variance properties, the structure of the rules that govern perception in these different modalities will be different in each modality. (O'Regan, 2001, p.941)

Ces contingences sensorimotrices font échos aux invariants sensorimoteurs de Gibson. Néanmoins, il nous faut noter une différence, qui se révélera essentielle pour notre sujet : pour Gibson, le mouvement sert à détecter les invariants du flux optique, action et perception sont donc en *interaction* ; tandis que pour la théorie sensorimotrice, le mouvement *constitue* la perception (action et perception sont une seule unité) : « *Perceiving is a way of acting. Perception is not something that happens to us, or in us. It is something we do* » (Noë, 2004, p.1). Autrement dit, la théorie sensorimotrice d'O'Regan et Noë présente une version de la

²² Nous distinguons néanmoins mouvement et action – cette distinction sera spécifiée plus tard.

²³ Les deux approches rejettent également la notion classique de représentation interne. Cependant, selon O'Regan lui-même, “the two approaches have very different agendas, with the sensorimotor approach being aimed at solving a problem that Gibson was not concerned with, namely the problem of the origin and nature of phenomenal experience” (O'Regan, 2011)

cognition incarnée et située plus radicale que la théorie des invariants de Gibson (voir Figures 3 et 4, chapitre 1).

Pour O'Regan et Noë, l'action est donc bien au cœur de la perception, dans la mesure où elle définit et permet de découvrir les lois gouvernant cette perception ; ces lois étant différentes pour chaque modalité sensorielle – et en effet, nous avons des perceptions différentes associées aux différentes modalités. Plusieurs lois sensorimotrices organisent une même modalité. Par exemple, une des lois sensorimotrices propres à la vision est la loi selon laquelle le mouvement de rotation des yeux entraîne une distorsion particulière de la stimulation sensorielle sur la rétine. Cette loi prend notamment en compte l'amplitude du mouvement des yeux, la forme sphérique de la rétine, ou encore la nature de l'optique oculaire. Une autre loi caractérise la manière dont la structure du flux lumineux sur la rétine s'étend lorsque le corps est mis en avant et se rétracte lorsqu'il est mis en arrière. La vision est aussi caractérisée par la loi sensorimotrice qui veut que la stimulation change brusquement et drastiquement lorsque les yeux clignent : la rétine devient vierge de stimuli externes.

A first law distinguishing visual percepts from perception in other modalities is the fact that when the eyes rotate, the sensory stimulation on the retina shifts and distorts in a very particular way, determined by the size of the eye movement, the spherical shape of the retina, and the nature of the ocular optics. Another law that characterizes the sensorimotor contingencies that are particular to visual percepts is the fact that the flow pattern on the retina is an expanding flow when the body moves forwards, and contracting when the body moves backwards. Visual percepts also share the fact that when the eyes close during blinks, the stimulation changes drastically, becoming uniform (i.e., the retinal image goes blank). (O'Regan, 2001, p.941)

Ces lois diffèrent par exemple de celles propres à l'audition. Les contingences sensorimotrices auditives sont plutôt affectées par les rotations du mouvement de la tête – ces rotations entraînant un asynchronisme entre l'oreille droite et l'oreille gauche. Les mouvements de la tête dans la direction de la source sonore impactent l'amplitude du son perçu²⁴.

²⁴ Les mouvements de la tête modifient aussi le champ visuel ; mais l'idée ici est que la vision n'est pas impactée de la même manière que l'audition.

In contrast to all these typically visual sensorimotor contingencies, auditory sensorimotor contingencies have a different structure. They are not, for example, affected by eye movements or blinks. They are affected in special ways by head movements: rotations of the head generally change the temporal asynchrony between left and right ears. Movement of the head in the direction of the sound source mainly affects the amplitude but not the frequency of the sensory input. (Ibid.)

Les lois sensorimotrices sont ainsi définies comme les lois liant les mouvements d'un organisme aux changements qui en résultent sur les entrées sensorielles. Elles définissent l'ensemble des possibilités qu'une action ouvre comme conséquences – cet ensemble définissant précisément ce qu'est la perception. Il est assez aisé de comprendre comment cette approche peut rendre compte du toucher²⁵. En effet, le système tactile n'est pas passif, il consiste en un ensemble d'activités exploratoires. O'Regan donne pour exemple l'activité de tenter de reconnaître un objet sans le voir, dans un sac opaque par exemple. L'activité consiste alors à explorer l'intérieur du sac jusqu'à éprouver un changement qualitatif de la sensation au moment où l'objet est identifié – et ce sans aucun changement de l'entrée sensorielle. Ce phénomène est d'ailleurs un nouvel exemple d'attribution distale, où l'on retrouve le passage des sensations à la perception avec pour résultat une meilleure maîtrise du monde extérieur qui, soudain, prend sens. O'Regan conclut que la continuité, ou « présence » de la sensation réside dans le fait d'être engagé dans le processus d'acquisition de l'entrée sensorielle et non dans la présence elle-même de cette entrée. La perception tactile implique l'activité corporelle, elle n'est pas séparable de l'action ; en ce sens elle est *incarnée* et *située* : elle est définie dans son interaction entre l'être vivant et l'environnement. Cependant, la question est de savoir si le caractère incarné et situé de ce type de perception peut être appliqué plus généralement aux autres cas de perception. Il est en effet plus ardu de comprendre comment l'approche sensorimotrice peut s'appliquer à des types de perception intuitivement abordées comme passive, comme par exemple la perception des couleurs. Cependant, O'Regan affirme que l'approche sensorimotrice est généralisable et en mesure de rendre compte de ce type d'expérience. La perception des couleurs est ainsi déterminée selon la loi sensorimotrice qui définit la manière dont la lumière reflétée par un objet change selon le mouvement de l'observateur²⁶ (cf. Figure 12). O'Regan mentionne également l'exemple du concept de ligne

²⁵ Les théories de la cognition incarnée sont restées focalisées sur la vision, bien que le toucher soit pour elles un meilleur paradigme.

²⁶ O'Regan mentionne également un argument évolutionniste pour supporter cette définition : “The brain should be built to extract not the changing color of the light coming off the object, but the object itself: we need to

géométrique : celui-ci peut être redéfini selon sa propriété sensorimotrice spécifique qui est que l'objet perceptif ne change pas quand les yeux bougent.

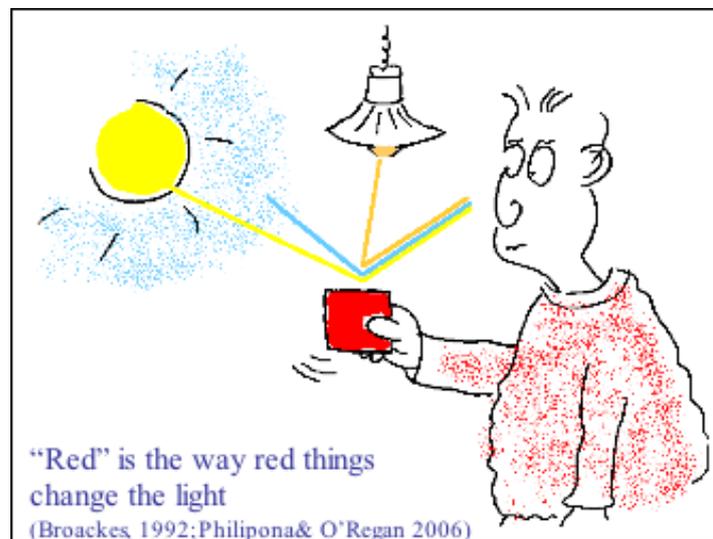


Figure 12 : Représentation du "rouge" dans la théorie sensorimotrice : la couleur rouge est définie par la manière dont les choses rouges changent la lumière (O'Regan, 2011)

Pour O'Regan et Noë, la nécessité du mouvement rapportée dans le TVSS est un soutien empirique de leur théorie : « *seeing constitutes the ability to actively modify sensory impressions in certain law-obeying ways.* »²⁷ (O'Regan & Noë, 2001, p.958). Nous considérerons plutôt, comme pour l'approche de Gibson, qu'il s'agit davantage d'un cadre théorique permettant d'interpréter les résultats de la substitution sensorielle plutôt qu'une preuve directe d'une théorie. Si nous souscrivons à ce cadre, quels sont les lois sensorimotrices gouvernant la perception dans la substitution sensorielle ?

Lenay et al. (1997) reprennent et précisent la signification des lois sensorimotrices dans la substitution sensorielle. Tout d'abord, ils notent le double rôle de l'action dans les dispositifs, comme dans tout type de perception : celle-ci est à la fois le *moyen* d'accéder aux lois sensorimotrices (puisque le mouvement permet de lier sensations et perceptions), mais également le *contenu* de ces lois (qui déterminent comment les mouvements font varier les sensations). Lenay (2006) définit alors un dispositif de substitution sensorielle comme

perceive whether the cherry is ripe or the meat is rotten, not whether the light reflected off the cherry or the meat is red or green – since the reflected light can be quite different depending on what light is illuminating cherry or meat" (O'Regan, 2011, p.128)

²⁷ Pour autant, l'expérience reçue par les appareils de substitution sensorielle n'est pas une expérience visuelle : "Seeing with the skin probably involves laws that are not exactly the same as seeing with the eyes, just as seeing colors in the dark is not quite the same as in the light. The experience associated with the TVSS will thus also be somewhat different from normal visual experience." (O'Regan & Noë, 2001, p.958)

« un dispositif de couplage qui modifie le corps propre en définissant les répertoires d'actions et de sensations accessibles au sujet » (p.30) (cf. Figure 13).

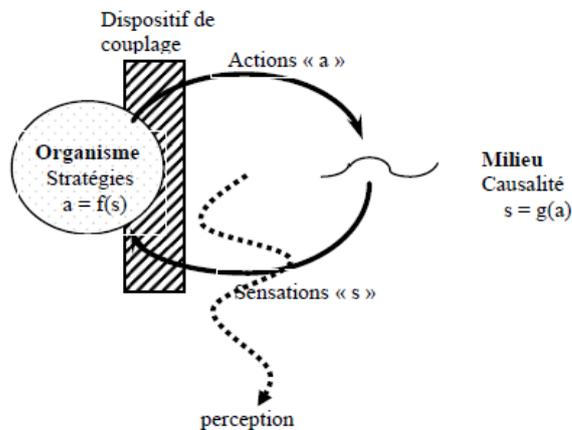


Figure 5 : schéma du couplage sensorimoteur. Le système de perception prothésisée est un « dispositif de couplage » qui modifie le corps propre en définissant les répertoires d'actions et de sensations accessibles au sujet. Via le milieu, les actions « a » causent les sensations « s » : $s = g(a)$; et l'organisme définit la stratégie qui détermine ses actions en fonction des sensations reçues : $a = f(s)$.

Figure 13 : Schéma de Lenay (2006) du dispositif de couplage sensorimoteur

Dans toute substitution sensorielle, l'acquisition de la perception suit un apprentissage où le sujet produit un mouvement, qui a pour effet des sensations (tactiles, auditives, etc.) : c'est la répétition de cette association entre mouvements et sensations conséquentes qui soutient l'attribution distale et l'émergence de la perception distale. Le terme « sensorimoteur » semble donc particulièrement bien convenir pour qualifier ce lien.

Il a été noté à ce propos que l'appellation de « substitution sensorielle » est inadéquate, dans la mesure où elle focalise le fonctionnement des appareils sur la sensation. Lenay et al. (1997) proposent le terme d'« appareils de couplage sensorimoteur » afin de rendre compte de cette primauté de l'action – le terme de « substitution *sensorielle* » ne mettant l'accent que sur les sensations.

The fact that the subject needs to perform an action upon the sensory captors in order to build a perception makes the term "sensory substitution systems" inadequate. It appears indeed that what the technical device must provide is not only access to new sensory data, but also the power to act upon the receptor system. It is therefore more appropriate to refer to these systems as "sensorimotor coupling devices". [...] it is by his/her action that the subject seeks and builds rules about constant relations between action and sensation. [...] The richness of the perception must therefore depend as

much upon the characteristics of the action (mobility, speed, zooming, etc.) as upon those of the sensation (width of the spectrum, number of sensors, etc.). (Lenay et al., 1997, p.45)

Lenay (2006) critique également l'emploi du terme de « substitution », dans la mesure où l'expérience reçue des dispositifs ne s'apparente pas à la vision. Il propose le terme de « suppléance perceptive » pour mieux rendre compte du fonctionnement technique des dispositifs.

La perception d'un objet stable devant soi est bien distincte de la succession des stimuli sensoriels très variables que reçoit le sujet alors qu'il déplace constamment sa caméra. Nous préférons donc parler de dispositifs de suppléance perceptive puisque l'usage de ce type de système est fondamentalement sensorimoteur (et non pas seulement sensoriel) et qu'il offre une expérience vécue spécifique assez différente de celle de la vision (ce n'est pas une substitution). (Lenay, 2006, p.28)

Bien qu'en accord avec ce recadrage, nous continuerons d'utiliser l'appellation de « substitution sensorielle » pour des raisons de cohérence langagière – le terme de substitution sensorielle étant davantage employé dans le champ.

1.2. Préciser le processus sensorimoteur dans la substitution sensorielle : les hypothèses dans la littérature

On veut maintenant s'intéresser plus précisément au lien « sensorimoteur » entre mouvements et sensations dans la substitution sensorielle. Nous avons établi que ce lien est un facteur nécessaire pour l'attribution distale. Nous avons établi qu'il est défini comme la mise en lien des sensations proximales avec des mouvements auto-générés. Cependant cela n'est encore pas suffisant pour expliquer le passage d'un monde proximal à un monde distal. Comment s'organise le lien sensorimoteur dans la substitution sensorielle pour qu'une perception distale émerge des relations entre mouvements et sensations ?

1.2.1. La loi de triangulation

Lenay (Lenay et al., 1997, Lenay, 2006) cherche à préciser les lois sensorimotrices déterminant le contenu perceptif dans la substitution sensorielle. Il veut découvrir les conditions minimales nécessaires à l'acquisition d'une perception distale. Comme nous l'avons vu, son dispositif minimaliste permet d'affirmer que l'action est bien nécessaire à cette acquisition, car même sans retours sensoriels spatialisés le sujet acquiert une perception de la distance. Mais Lenay va plus loin : il veut comprendre quelles sont les caractéristiques spécifiques du mouvement qui rendent possible la perception distale. Autrement dit, il cherche à spécifier le mécanisme définissant le mouvement qui permet l'attribution distale dans la substitution sensorielle. Il appelle ce mécanisme « loi de triangulation ».

1.2.1.1. La loi de triangulation : une loi de contingence sensorimotrice

Une loi qui se qualifie de scientifique doit par définition établir la relation universelle et nécessaire unissant des phénomènes. La loi de contingence sensorimotrice de la substitution sensorielle doit donc pouvoir expliquer une relation générale unissant les actions aux sensations. Comment alors dépasser la pluralité des types d'actions et de sensations existant pour parvenir à une définition unitaire de la loi les unissant ? Lenay (2006) répond à ce problème en définissant la loi de contingence sensorimotrice appliquée à la substitution sensorielle comme une loi de pointage.

Chaque position de la cible correspond seulement à un invariant sensorimoteur, c'est-à-dire une loi liant les actions aux sensations qui reste stable relativement aux variations de ces actions et sensations. La perception doit donc être ici l'accès à une loi de pointage liant les actions effectuées à leurs conséquences sensorielles. C'est une bonne illustration de ce que Kevin O'Regan appelle loi de contingence sensorimotrice ». (Lenay, 2006, p.29)

Grâce à son dispositif simplifié, Lenay peut préciser cette loi mathématiquement. La loi de pointage est une « loi de triangulation » définissant la relation géométrique des angles formés par (1) la projection du bras plus ou moins tendu par rapport au sujet qui pointe vers la cible et (2) la rotation du poignet par rapport au bras projeté vers la cible. (cf. Figure 14)

La cible est localisée dans un espace égo-centré dans la mesure où sa position se définit par les vitesses relatives de variation des angles articulaires du sujet lorsqu'il pointe dans sa direction. Si on simplifie les actions aux rotations du bras autour de l'épaule (β) et aux rotations de la main autour du poignet (α), la distance de la cible est obtenue par triangulation. (*Ibid.*)

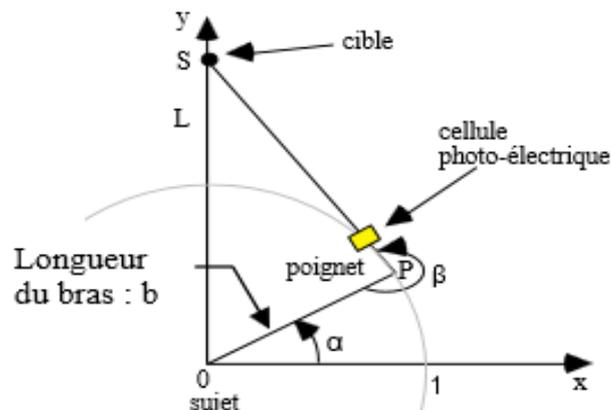


Figure 4a : relations géométriques entre les angles de rotation du bras α et de la main β lors du pointage vers une cible à une distance L :

$$\beta = 2\pi - \alpha + \text{Atan} \left(\frac{b \sin\alpha - L}{b \cos\alpha} \right)$$

Figure 14 : schéma de la loi de triangulation appliquée au dispositif minimaliste (Lenay, 2006)

1.2.1.2. Expérience perceptive ou inférence cognitive ?

La loi de triangulation ainsi formulée reste néanmoins ouverte à plusieurs interprétations. Siegle et Warren (2010) remarquent en effet que la perception distale peut, selon la loi de triangulation, être une expérience perceptive ou une inférence cognitive – stratégie perceptive ou stratégie cognitive. La perception distale, si elle est acquise par une stratégie cognitive, serait une inférence cognitive indirecte. L'utilisateur ne percevrait directement que ses sensations proximales et la loi de triangulation lui permettrait d'*inférer* la présence d'un objet dans l'environnement distal par des processus cognitifs de haut niveau. Dans ce cas, les utilisateurs ne feraient pas directement l'expérience de l'objet dans l'environnement. Au contraire, selon la stratégie perceptive les utilisateurs percevraient directement l'objet distal lui-même, sans avoir à porter leur attention sur les stimuli proximaux.

We distinguish between 2 fundamentally different strategies for using a sensory substitution device: cognitive and perceptual. In a cognitive strategy, one is only directly aware of the proximal stimulation, and the presence of the distal object is derived from high-level cognitive inferences and associations based solely on perceived patterns in the proximal stimulation. This may allow the user to infer that a distal object is present, without experiencing it as such. In a perceptual strategy, on the other hand, one is aware of the distal object itself, without explicitly attending to the proximal stimulation. In this situation, distal attribution takes place, and an object in the environment is perceived. (Siegle & Warren, 2010, p.209)

D'après la stratégie cognitive, la loi de triangulation formulée par Lenay serait une projection explicite de la distance à partir des ressentis proximaux – une inférence cognitive du même type que celle consistant à déduire la taille d'une personne à partir d'une comparaison (avec une autre personne, ou un élément de l'environnement connu).

A cognitive strategy would be predicated on an awareness of the proximal variables of felt arm configuration and tactile vibration, followed by an explicit triangulation estimate to infer the target distance. (ibid.)

La stratégie perceptive serait pour sa part une manifestation directe et inconsciente de la loi de triangulation, de même que la loi mathématique organisant la disparité binoculaire n'est jamais consciemment « calculée » par le système cognitif et permet une perception directe.

With a perceptual strategy, awareness of a distal object would derive from the family of pointing directions producing tactile vibration, which converge on a constant location in space. The participant would not need to attend to the arm configurations or make an explicit triangulation estimate, just as we do not need to attend to cues such as vergence or disparity when making visual depth judgments. Instead, distal attribution would result from the perceptual system abstracting the relation among proprioceptively specified pointing directions and tactile vibration that specifies a constant spatial location. (Siegle & Warren, 2010, p.210)²⁸

²⁸ Notons ici que contrairement à ce qui est suggéré, une perception directe et inconsciente n'est pas nécessairement une perception abstraite. Nous nous attacherons précisément à montrer que si nous sommes en accord avec l'idée que la perception distale acquise dans la substitution sensorielle est bien directe et inconsciente, elle n'est pas pour autant abstraite.

Les deux types de stratégies ainsi formulées, les rapports subjectifs des utilisateurs sembleraient plutôt attester d'une stratégie perceptive dans la mesure où comme nous l'avons vu, ils parviennent à distinguer les stimuli proximaux de l'objet perçu et où ils « ressentent » véritablement des objets dans l'espace – la perception serait bien « directe ». Mais comme le notent Siegle et Warren, ce rapport subjectif est insuffisant pour établir avec certitude cette primauté de la stratégie perceptive. D'après les auteurs, la stratégie perceptive est tenue pour acquise sans qu'aucune étude n'envisage une stratégie cognitive²⁹.

It is not easy to dismiss the skeptical claim that reports of distal attribution in SS could actually be based on a cognitive strategy. In the case of visual-to-tactile sensory substitution, for example, participants may be doing nothing more than feeling tactile vibrations and learning to use them to make explicit inferences about distal objects. Consider the case of the TVSS. It is possible that the abilities gained by subjects after many hours of training with feedback were based on cognitive inferences and learned associations. In principle, the presence, location, and identity of environmental objects might be inferred from tactile stimulation without experiencing distal objects in space. As far as we can tell, no controls were included to rule out this scenario. Even if some participants did have a compelling experience of distal objects, there was no attempt to distinguish them experimentally from those who did not. (Siegle & Warren, 2010, p.209)

Autrement dit, la loi de triangulation pourrait relever d'une stratégie cognitive dans la mesure où cette loi pourrait être *inférée* par les utilisateurs à partir des sensations proximales tactiles. Dans ce cas, la distalité rapportée de l'objet ne relèverait pas d'une perception mais ne serait qu'une inférence cognitive indirecte. Siegle et Warren (2010) utilisent le dispositif minimaliste de Lenay dans une expérience ayant pour but de lever cette ambiguïté entre stratégie cognitive et stratégie perceptive. La tâche des sujets est d'estimer la distance d'un objet par rapport à soi et de noter leur expérience perceptive subjective. Le but est de déterminer si l'une des deux stratégies précédemment énoncées mène à des estimations – concernant la distance – plus justes et au vécu subjectif de la perception distale. Deux conditions sont comparées. Dans un premier groupe, le « groupe de l'attention proximale » (stratégie cognitive), les participants ont pour consigne de focaliser leur attention sur leur bras

²⁹ A l'exception de l'étude d'Auvray, Hanneton, Lenay, et O'Regan. (2005), mais celle-ci se base uniquement sur les rapports subjectifs des utilisateurs pour affirmer la légitimité d'une perception distale. (Cf. Siegle & Warren, 2010, pp.209-210)

lorsque la vibration s'active et de « trianguler » consciemment la position de la cible en imaginant leur doigt s'étendre dans l'espace. Les participants du « groupe de l'attention distale » (stratégie perceptive) ont pour consigne explicite de ne pas porter attention à leur bras durant l'expérience, mais de parvenir à une estimation intuitive de la position de la cible pour reporter à quelle distance ils la ressentent. Les résultats obtenus sur les vingt premier essais sont comparés aux résultats obtenus sur les vingt derniers essais afin de rendre compte d'un éventuel effet d'apprentissage. On demande également aux participants de quantifier leur expérience subjective d'un objet à distance après chaque session expérimentale : ils doivent indiquer sur une échelle numérique, (1) la quantité d'attention portée à leur bras, (2) à quel point la cible était ressentie comme un objet solide et (3) leur confiance dans leur jugement de distance.

Les résultats montrent l'avantage de la condition distale (stratégie perceptive) sur la condition proximale (stratégie cognitive) seulement sur les vingt derniers essais, ce qui suggère un effet de l'apprentissage sur la stratégie perceptive (cf. Figure 15).

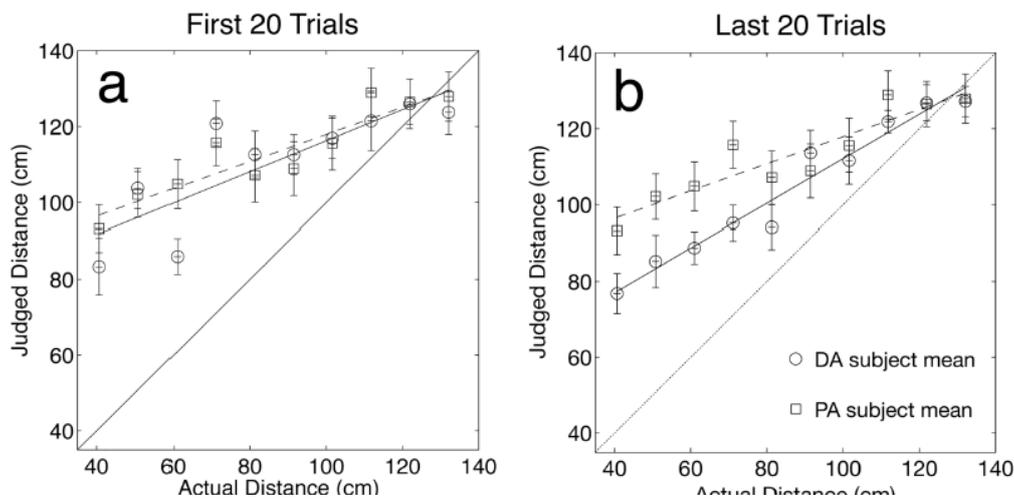


Figure 15 : Résultats obtenus par Siegle et Warren (2010) : moyenne des distances perçues en fonction des distances réelles pour la condition distale (stratégie perceptive : DA dans le schéma, représentée par les cercles) et pour la condition proximale (stratégie cognitive : PA sur le schéma, représentée par des carrés) pour les vingt premiers (schéma A) et les vingt derniers (schéma B) essais.

De plus, l'amélioration des estimations de distance de la cible est corrélée avec une meilleure perception d'un objet comme solide, et inversement proportionnel à la quantité de l'attention portée aux bras.

Siegle et Warren (2010) interprètent ces résultats comme une indication de l'utilisation d'une stratégie perceptive dans l'acquisition d'une perception distale. Autrement dit, pour ces auteurs, « improved distance judgments reflect a distal perceptual awareness rather than an explicit cognitive strategy » (p.218). Cependant les résultats révèlent en fait un assez faible avantage de la stratégie perceptive sur la stratégie cognitive (la différence est non significative, avec $p = 0.0779$). L'effet vraiment intéressant est l'effet d'interaction ($p = 0.0325$) entre la stratégie utilisée (perceptive ou cognitive) et l'apprentissage (20 premiers ou 20 derniers essais). Autrement dit, la stratégie perceptive permet de s'améliorer plus efficacement dans le jugement des distances et le ressenti subjectif de la perception distale que la stratégie cognitive. Aussi, cet *avantage* de la stratégie perceptive sur la stratégie d'inférence cognitive pour l'apprentissage – tant au niveau du jugement objectif des distances que du ressenti subjectif de la perception distale – suggère que le processus sous-jacent à l'attribution distale est *avantagé* (mais non déterminé) par la concentration répétée sur le monde extérieur et le détachement du sujet de ses ressentis proximaux. Une manière d'interpréter ces résultats est de dire que se concentrer sur les buts d'une action (ici, le but de l'action étant d'estimer une distance³⁰) est plus pertinent écologiquement que de se concentrer sur l'action elle-même – soit sur les ressentis proximaux. Cette interprétation est d'ailleurs suggérée par Siegle et Warren. En effet, l'idée avancée est que l'action est organisée davantage selon des buts que selon une structure anatomique spécifique. Autrement dit, la manière dont le sujet se situe dans son environnement impacte la manière dont il perçoit.

1.2.1.3. Une calibration de l'action organisée fonctionnellement : une invalidation de la loi de triangulation ?

Siegle et Warren (2010) s'intéressent dans un second temps à la base de l'information nécessaire à l'attribution distale (« *informational basis for distal attribution* »). Quels sont les pré-requis pour la perception des objets dans l'espace du monde extérieur ? La réponse classique à cette question dans le cadre d'une perception visuelle « normale » serait que la perception d'un objet dans l'espace requiert l'activation de substrats neuraux impliqués dans le traitement des indices visuels de la profondeur (« *perceiving an object in depth requires activation of neural substrates involved in processing visual depth cues* », Siegle & Warren, 2010, p.29). D'après les auteurs, l'attribution distale qui émerge de la substitution sensorielle invite à considérer « une base plus générale ou abstraite pour l'attribution distale qui n'est pas

³⁰ Dans la substitution sensorielle, on peut dire que le but de l'action est de percevoir le monde extérieur.

rattachée à une modalité sensorielle particulière » (« *a more general or abstract basis for distal attribution that is not tied to a particular sensory modality* », *ibid.* p.30). La question est de savoir si le processus de l'attribution distale est incarné, concret (implanté anatomiquement au niveau des articulations) ou abstrait (un invariant spatial abstrait).

La loi de triangulation de Lenay établit que l'attribution distale s'appuie sur l'apprentissage d'une collection de lois sensorimotrices. Lenay (2006) définit de fait la loi de triangulation comme un exemple de théorie sensorimotrice. Cette loi est précisée mathématiquement par Lenay, Gapenne et Stewart (2001) : la distance de l'objet par rapport à l'utilisateur est fonction de l'ensemble des angles formés par l'épaule et le coude.

$$\beta = \arctan \frac{D + c \cdot \sin \gamma - a \cdot \sin (\alpha - \gamma)}{c \cdot \cos \gamma - a \cdot \cos (\alpha - \gamma)} - \alpha - \gamma + \pi$$

Y représente la distance donnée sur un axe égocentrique, β les angles du coude, a la longueur du bras supérieur (distance entre l'épaule et le coude) et c la moitié de la largeur de l'épaule. Il s'ensuit de ces contingences sensorimotrices que si le bras est déplacé en une configuration particulière, alors une vibration tactile résulte du mouvement. Cette formulation de la loi de triangulation est qualifiée par O'Regan et Noë (2001) de « joint-specific sensorimotor manifold » (contingences sensorimotrices spécifiques aux articulations). Ainsi formulé, le mécanisme sensorimoteur liant les sensations aux mouvements par la loi de triangulation serait un mécanisme défini par la relation géométrique spécifique qui lie la position des membres à un moment donné à la position des objets. D'après Siegle et Warren, cette définition de l'attribution distale prédirait que si la relation entre la distance de la cible et la configuration des bras est modifiée (par exemple, si l'on pivote par rapport à la cible de 90°), alors un nouvel ensemble de contingences sensorimotrices – toujours propres aux articulations – devrait être mis en place, perturbant temporairement le jugement des distances.

On this account, distal attribution derives from learning a joint-specific sensorimotor manifold. Thus, it predicts that changing the relationship between target distance and arm configuration would require that a new sensorimotor manifold be learned, temporarily disrupting distance judgments. For example, rotating the trunk by 90° with respect to the target axis would require learning the top manifold ($\gamma = 0^\circ$) in place of the bottom manifold ($\gamma = 90^\circ$). (Siegle & Warren, 2010, p.211)

Or, il a été rapporté que dans la substitution sensorielle, changer l'effecteur responsable du déplacement d'un transducteur artificiel (Bach-y-Rita, 1984) ou changer l'espace du récepteur tactile (du dos à la langue par exemple) (Auvray & Arnold, 2014) n'ont pas d'effet sur les capacités des participants à utiliser les appareils de substitution sensorielle. Suivant la même logique, Siegle et Warren s'opposent à l'interprétation d'une triangulation incarnée, matériellement implantée, *via* une phase de transfert dans leur expérience. Dans cette phase, les participants du groupe de l'attribution distale ont une troisième session à réaliser³¹ ; celle-ci est identique aux deux premières à une exception près. Le groupe est séparé en deux : les participants de la condition du transfert du bras (« arm transfer condition ») changent la photodiode de leur main dominante à leur main non dominante, tandis que les participants de la condition du transfert rotatif (« rotation transfer condition ») font pivoter leur chaise de 90° par rapport à la cible, en direction de leur main dominante. Les résultats montrent que l'amélioration des estimations de distances observée entre les deux premières sessions est transférée durant la troisième phase dans les deux conditions (cf. Figure 16).

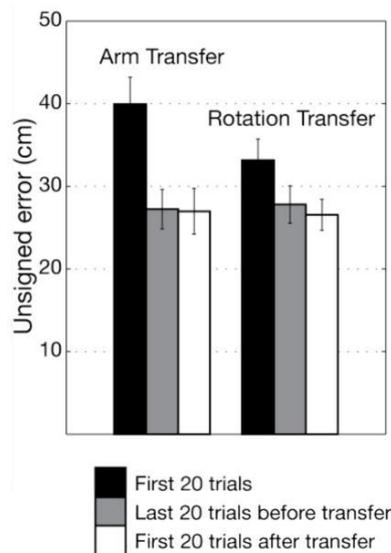


Figure 16 : Résultats pour la phase de transfert (Siegle et Warren, 2010)

Pour les auteurs, l'analyse des données indique que la base informationnelle pour l'attribution distale est « la détection active d'invariants spatiaux abstraits », puisque « les données discréditent une version de l'hypothèse sensorimotrice spécifique aux muscles ou aux articulations, et de fait toute autre hypothèse définie au niveau de la configuration des membres ».

³¹ Les deux premières sessions étaient (1) les vingt premiers essais et (2) les vingt derniers essais.

These data undermine a muscle- or joint-specific version of the sensorimotor hypothesis, and indeed any other hypothesis defined at the level of limb configurations.
(Siegle & Warren, 2010, p.219)

Cette interprétation de la loi de triangulation comme invariant sensorimoteur abstrait pose problème. Définir la perception distale comme un mécanisme abstrait implique de renoncer à une explication incarnée et située du passage d'un monde extérieur physique et concret à un monde intérieur abstrait. Si la loi de triangulation est un mécanisme défini à un niveau abstrait alors la question demeure : comment passe-t-on des sensations proximales physiques reçues par le dispositif et des mouvements effectués dans l'espace avec la caméra, à une abstraction du lien unissant ces sensations et ces mouvements pour faire émerger une perception distale des objets dans un monde matériel ? Pour cette raison, nous souhaitons plutôt considérer la loi de triangulation comme un mécanisme sensorimoteur véritablement incarné dans le corps. Cette approche est rejetée par Siegle et Warren par l'argument d'un possible transfert de la perception distale même lorsque l'espace de l'appareil ou du sujet sont changés. Nous soutenons que cet argument est insuffisant. Le fait que l'invariant sensorimoteur à la base de l'attribution distale s'applique à toutes les configurations d'actions et de sensations et soit transférable ne veut pas nécessairement dire que cet invariant soit abstrait. Nous défendrons dans la suite de ce cadre théorique la position contraire selon laquelle un invariant sensorimoteur ne peut être défini qu'à un niveau concret.

L'argument de Siegle et Warren est en fait de même ordre que celui du dualisme platonicien pour le monde des formes (ou monde des idées). Selon Platon, il existe un monde matériel – celui dans lequel on vit, le monde du corps – et un monde idéal, monde des concepts – celui d'où l'âme provient. Cette séparation entre monde physique et monde abstrait est justifié par deux arguments. Tout d'abord, l'argument du Un et du multiple (Platon, La République V, édition 1794) réfère au célèbre paradoxe qui oppose une expérience particulière d'éléments multiples (je vois un paysage, un cheval, un beau tableau) à des idées générales des concepts qui s'y rattachent : comment à partir de l'expérience de plusieurs chevaux est-il possible de parvenir au concept de Cheval ? Platon répond à cette question en affirmant la nécessité d'un monde des Formes et des Idées où l'âme aurait séjourné et où résiderait l'Idée du Cheval, du Paysage, du Beau. Grâce aux Idées, le monde physique du corps devient intelligible. Un autre argument avancé par Platon est celui de la possibilité de la connaissance. Il défend l'idée que la connaissance possible ne peut porter que

sur des choses qui ne changent pas, à savoir les Formes ou les Idées. Cet argument s'oppose à l'intuition selon laquelle les connaissances viendraient des sensations : une telle connaissance est impossible puisque les sensations ne révèlent que des choses changeantes et variables. Le fait que l'homme soit capable de discerner que quelque chose change effectivement implique nécessairement qu'il y ait « quelque chose » de stable dans le changement – ce quelque chose étant les Idées.

On ne peut même pas dire qu'il y ait Connaissance si tout change et si rien ne demeure fixe. Car, si la Connaissance elle-même ne cesse pas d'être Connaissance, alors la Connaissance peut toujours subsister et peut toujours être Connaissance. Mais si la Forme même de la Connaissance vient à changer, elle se change alors en une autre Forme que la Connaissance et, du coup, il n'y a plus de Connaissance. Et si la Forme change toujours, il n'y aura jamais Connaissance, de sorte qu'il n'y aurait jamais quelqu'un qui connaisse ni chose à connaître. Si au contraire ce qui connaît et ce qui est connu existent toujours, si le Beau, si le Bien, si tout le reste de qui est réel, existent, je ne vois pas comment les conditions dont nous parlons aient une ressemblance avec le flux et le mouvement. (Cratyle, Platon édition 2008)

L'argument de Siegle et Warren est organisé selon la même logique : la loi de triangulation doit nécessairement être basée sur des invariants sensorimoteurs abstraits, car sinon comment expliquer que quelque chose de général (la perception distale acquise avec n'importe quel appareil et n'importe quelle sensation) puisse émerger de l'expérience particulière d'un type de sensation et d'un type d'appareil, et soit transférable d'une expérience particulière à une autre ?

A l'argument platonicien que le monde des Idées est le seul permettant d'expliquer ce qui ne change pas – le monde stable – Aristote (La Métaphysique, édition 1953) répond que le monde des Idées ne permet pas d'expliquer ce qui change. Or le monde tel qu'il est perçu est toujours en mouvement. Un autre argument est qu'il est impossible de dire pour quelles « choses » il y a des Idées. Pour tout ce qu'il est possible de savoir ? Y'a-t-il une Idée des négations, des termes relatifs (les conjonctions de coordination par exemple) ? Y'a-t-il une Idée de l'Idée et une Idée de l'Idée d'Idée ? En effet, s'il faut poser l'existence d'une Idée séparée toutes les fois qu'est conçu un rapport de similitude (une synthèse) entre plusieurs choses alors il faut encore poser la médiation d'un nombre infini de réalités intermédiaires. Ce sophisme du « troisième homme » n'est pas sans rappeler la fameuse hypothèse de

l'homoncule avancée pour critiquer une approche cognitiviste de la vision. Dans un paradigme où le système visuel est considéré comme une caméra qui donnerait le monde aux individus, le cerveau reçoit et analyse ce monde obtenu. La question est alors de savoir quoi ou qui voit, reçoit et analyse ce que le cerveau voit. C'est un problème de régression à l'infini où le phénomène dont on veut rendre compte est expliqué en termes du phénomène lui-même. L'abstraction des invariants sensorimoteurs pour expliquer la loi de triangulation fait face à la même critique dans la mesure où on peut se demander ce qui explique l'abstraction des invariants sensorimoteurs.

Les théories sensorimotrices ont pour intérêt de mettre l'emphase sur l'importance de l'action pour l'attribution distale en redéfinissant la perception comme le résultat de « contingences sensorimotrices ». L'action serait nécessaire à l'attribution distale car elle serait constitutive et analogique à la sensation ; c'est pourquoi tenter de comprendre la sensation en extrayant l'action (comme lorsqu'on demande au sujet d'utiliser un appareil de substitution sensorielle en étant passif, sans accès au mouvement) n'a pas de sens. La loi de triangulation permet de préciser le fonctionnement des contingences sensorimotrices propres à la substitution sensorielle. Néanmoins, elle n'explique pas comment le sujet extrait de cette loi une perception distale : elle caractérise simplement les trajectoires des mouvements des sujets nécessaires à cette acquisition (soit la manière dont le sujet lie ses actions à ses sensations). Il faut maintenant expliquer en quoi ces trajectoires sont liées aux ressentis proximaux des sujets et comment, à partir d'elles (ou en les incluant), est construite la perception distale. La proposition de Siegle et Warren d'invariants sensorimoteurs abstraits ne donne pas de réponse satisfaisante à notre question du passage des sensations proximales à une perception distale. Nous défendons l'idée que les mouvements sont liés aux sensations dans la substitution sensorielle de manière véritablement incarnée : la construction de la perception distale à partir de la loi de triangulation est le résultat d'un processus cognitif incarné où le sujet, impliqué dans son environnement, lie ses actions à leurs conséquences selon des lois sensorimotrices propres à ses caractéristiques corporelles et au contexte.

1.2.2. Différence entre contingences sensorimotrices liées à l'appareil et contingences sensorimotrices liées à l'objet

Bermejo, Di Paolo, Hüg, et Arias (2015) présentent une autre manière de s'intéresser aux contingences sensorimotrices dans la substitution sensorielle. Si l'on considère que les

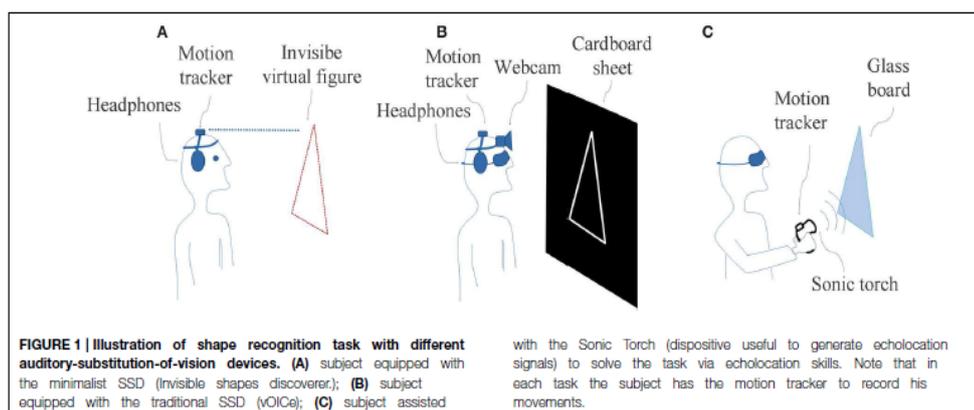
contingences sensorimotrices sont les règles gouvernant les changements sensoriels produits par les actions motrices, alors ces règles sont liées non seulement au type d'exploration effectuée (visuel, auditif, etc.) mais également aux propriétés de l'environnement en jeu dans ces changements : dans la perception, il s'agirait de ce que l'on perçoit. Dans la substitution sensorielle, les contingences sensorimotrices dépendent à la fois de l'appareil utilisé (le mode d'exploration) et de l'objet à percevoir (la chose à explorer). Bermejo et al. (2015) distinguent ainsi les « contingences sensorimotrices liées à l'appareil » (« apparatus-related SMCs ») et les « contingences sensorimotrices liées à l'objet » (« object-relation SMCs »).

Apparatus-related SMCs relate to the dynamical and morphological properties of the sensorimotor apparatus that enables certain types of movements and sensory information, and object-related SMC arise from the structure of the objects of perception and are associated with the categorization of objects and events in the environment. (Bermejo et al., 2015, p.2)

Notons que les contingences sensorimotrices liées à l'objet réfèrent à la perception distale, tandis que les contingences sensorimotrices liées à l'appareil seraient davantage dépendantes des ressentis proximaux.

Comme Bermejo et al. le reconnaissent eux-mêmes, « réaliser des tâches complexes, comme la reconnaissance d'un objet, implique toujours les deux types de contingences sensorimotrices dans une relation dynamique complexe. » (“*performing complex tasks, such as recognizing an object, always involves both types of SMCs in a complex dynamic relationship.*”, p.2) Aussi, cela n'a peut-être pas de sens de les distinguer. Par exemple, appliquées à la loi de triangulation, les contingences sensorimotrices liées à l'appareil seraient la spécificité du dispositif minimaliste impliquant que les mouvements du sujet soient effectués par le bras (α et β) et que l'information sensorielle soit une vibration en tout ou rien. Les contingences sensorimotrices liées à l'objet seraient le calcul de la distance de la cible (S), en fonction de sa position par rapport à l'individu. Afin de tester plus en avant l'hypothèse que les contingences sensorimotrices en jeu dans la substitution sensorielle dépendent effectivement de l'appareil ou de l'objet et de comprendre la genèse de ces contingences au vue de cette distinction, Bermejo et al. présentent trois expériences.

Pour tester l'influence des contingences sensorimotrice liées à l'appareil, trois dispositifs sont utilisés. Pour l'expérience 1, il s'agit d'un dispositif minimaliste composé d'un détecteur de mouvement attaché sur un bandeau en plastique portée par les sujets sur la tête (cf. Figure 17), émettant un son dans des écouteurs dès que le détecteur de mouvement rentre en contact avec la surface d'une forme (la forme est simulée). Les participants doivent bouger leur tête pour générer un stimulus sonore en tout ou rien (« on-off »). Pour l'expérience 2, c'est l'appareil visuo-auditif The vOICe – que nous avons déjà décrit – qui est utilisé. Les participants doivent bouger leur tête afin de générer une structure sonore complexe encodée par l'appareil. Pour l'expérience 3, un appareil portable appelé « the Sonic Torch » est utilisé pour signaler l'écholocalisation. Les participants doivent bouger leur main pour engendrer une information échoïque générée par la présence ou l'absence des réflexions du son. (Cf.



).

Pour chaque appareil, les auteurs analysent les taux de réussites à une tâche de reconnaissance de formes géométriques, ainsi que la stratégie sensorimotrice utilisée (types de mouvements effectués et ressentis subjectifs des participants). Concernant les taux de réussite, les résultats sont équivalents pour les trois appareils utilisés.

The response of the participants in all experiments showed functionally equivalent results regardless of SSD used: the hit scores obtained were similar and a learning effect was evident in each test. These results provide evidence that participants are able

Figure 17 : Appareils de substitution utilisés par Bermejo et al. (2015)

to progressively acquire sensorimotor skills to recognize simple geometric shapes with similar sensorimotor strategies regardless of the device concerned (Bermejo et al., 2015, p.14).

On peut conclure de ce premier résultat que des contingences sensorimotrices liées à l'objet (ici, la forme géométrique à reconnaître) sont effectives dans la substitution sensorielle : peu important les stimuli proximaux ressentis, les informations sensorielles sont intégrées par l'apprentissage grâce à l'action.

Concernant les stratégies sensorimotrices utilisées, les structures des mouvements se révèlent similaires pour les expériences 1 et 3 (où le sujet reçoit des stimuli « on-off »). Que ce soit avec la tête (pour l'expérience 1) ou avec la main (pour l'expérience 3), les sujets effectuent des trajectoires plus ou moins larges sous forme de balayage – par lesquelles les sujets « entrent et sortent » de l'aire de la figure. Avec The vOICe les mouvements sont plus saccadés, d'amplitude moins large, commençant et finissant par des périodes plus immobiles (comme une période de fixation). Pour Bermejo et al., ces différences sont probablement dues aux propriétés exhibées par les appareils.

These differences are very likely due to how each device works. With the minimalist device, the user is continuously sensing information: every time she or he comes in contact with the object area a stimulus is heard. Similarly, in the echolocation test the participant, assisted with the Sonic Torch, emits an echolocation signal continuously and reflections are heard whenever the signal contacts the object area. In contrast, The vOICe device works by capturing and scanning optical images that are transformed in a sound pattern that lasts 1s. If the user moves the head during the reproduction of a sound pattern he/she loses the spatial reference of what he/she is hearing (Bermejo et al., 2015, p.15).

De plus, les auteurs remarquent que la fréquence des mouvements varie selon leur type (mouvements généraux de balayage ou mouvements d'exploration de formes, de petites ou grandes amplitudes) et selon les formes géométriques à détecter.

Ces résultats sont interprétés comme l'indice que « l'expérience de la perception » est d'abord dominée par les contingences sensorimotrices liées à l'appareil avant d'être progressivement remplacée par les contingences sensorimotrices liées à l'objet.

Our results allow us to speculate that perceptual experience may be dominated by apparatus-related SMCs at first and progressively by object-related SMCs, as the user increasingly incorporates the SSD. This can account for the divergence of reports across different studies concerning the first-personal description of the perceptual modality involved. (Bermejo et al., 2015, p.18)

Ces résultats soulignent encore une fois le processus d'attribution distale par lequel le sujet passe des ressentis proximaux à la perception distale. Subjectivement, il se concentre d'abord sur ses sensations (les contingences sensorimotrices liées à l'appareil : il intègre la manière donc ses actions sont liées à ses sensations selon des codes données par le dispositif) avant de s'en détacher pour percevoir l'objet (les contingences sensorimotrices liées à l'objet : il se met à utiliser l'appareil différemment selon ce qu'il y a à percevoir).

La loi de triangulation permet de préciser le sens de la théorie sensorimotrice pour la substitution sensorielle. Elle précise le lien entre ressentis proximaux et action d'un point de vue fonctionnel, c'est-à-dire la manière dont l'action s'organise pour donner sens aux ressentis proximaux et vice-versa. La distinction entre contingences sensorimotrices liées à l'appareil et contingences sensorimotrices liées à l'objet permet pour sa part de spécifier l'évolution – en termes d'apprentissage – du lien entre ressentis proximaux et action à la fois au niveau attentionnel (concentration sur l'appareil et puis sur l'objet) et au niveau structurel (l'évolution de l'action en corrélation avec la maîtrise du dispositif).

2. Préciser les contingences sensorimotrices en jeu dans l'attribution distale : le rôle charnière de la proprioception

Comment expliquer alors le passage des contingences sensorimotrices à la perception distale ? On peut trouver une première piste de réponse grâce à la théorie de Poincaré (1905, 1907). Certains auteurs s'intéressant au rôle de l'action dans la substitution sensorielle réfèrent d'ailleurs à cette théorie pour expliquer la construction de l'espace chez l'individu (Pacherie, 1997 ; Auvray, 2004 ; Lenay, 2006 ; Gapenne, 2014). Plus particulièrement, ils réfèrent à la règle de la réversibilité.

2.1. La règle de réversibilité de Poincaré

La règle de réversibilité est la solution de Poincaré pour combler le fossé entre espace géométrique et espace représentatif. L'espace géométrique est l'espace que l'on prend pour référence d'un espace « réel », « extérieur » (peu importe la question métaphysique du statut effectivement réel de cet espace) : il a pour caractéristique d'être continu, infini, tridimensionnel, homogène et isotrope (Poincaré 1905, 1907)³². L'espace représentationnel – qui est en fait l'espace de perception – est quant à lui l'espace vécu par le sujet, que Poincaré définit comme une approximation sensible de l'espace géométrique³³. La construction de l'espace représentationnel à partir de l'espace géométrique inclut alors nos espaces sensoriels, l'espace visuel, l'espace tactile et l'espace moteur. Or, ces espaces n'ont aucun rapport anatomique ou biologique avec l'espace géométrique.

L'espace visuel pur est bidimensionnel, il est limité, il n'est pas homogène. La troisième dimension a sa source dans des sensations musculaires – les sensations de convergence et d'accommodation – très différentes de sensations visuelles. L'espace visuel complet, tridimensionnel, n'est donc pas non plus isotrope. Les espaces tactiles et moteurs s'éloignent encore plus de l'espace géométrique, l'espace moteur ayant d'une certaine manière autant de dimensions qu'il y a de muscles. (Pacherie, 1997, p.279)

Autrement dit, il faut alors expliquer comment, à partir de ses sensations et de ses mouvements, l'individu parvient à une perception spatiale d'un environnement en trois dimensions.

Poincaré résout ce problème en s'intéressant aux lois suivant lesquelles les sensations se succèdent : la construction de l'espace résulte de la manière dont changent (ou ne changent pas) nos impressions en fonction de nos mouvements.

Le passage d'un ensemble d'impressions A à un ensemble d'impressions B correspond à un changement de position de l'objet qui cause ces impressions, s'il est possible de restaurer l'ensemble d'impressions A en faisant des mouvements qui nous replacent vis-à-vis de l'objet dans la situation relative initiale. Il y a donc changement de position

³² Un espace est homogène si tous ses points sont identiques entre eux ; il est isotrope si toutes les droites qui passent par un même point sont identiques entre elles.

³³ Cette distinction entre espace géométrique et espace « réel » est un parfait écho à la distinction de Reid entre apparence visible et « réalité » des objets.

lorsqu'il est possible de corriger une modification qui s'est produite et de rétablir l'état initial par une modification inverse. Il y a changement d'état lorsqu'une telle correction n'est pas possible. Par essais et erreurs, nous apprenons quels mouvements volontaires sont susceptibles de compenser quels changements. (Pacherie, 1997, p.280)

Par exemple, prenons l'impression que produit une table sur les sens. On la voit (et éventuellement la touche) selon un certain angle, une certaine hauteur, etc. : ce que Poincaré qualifie « ensemble d'impressions A ». Dans l'hypothèse où la table serait déplacée, il sera toujours possible de bouger afin de retrouver le même angle et la même hauteur par rapport à la table : ce sera l'« ensemble d'impressions B ». Entre ces deux ensembles d'impressions (A et B), la table aura simplement changé de position. A l'inverse, si nous supposons maintenant que la table n'a pas été déplacée mais repeinte ou rabotée au niveau des pieds, alors dans ce cas on aura beau faire n'importe quel mouvement, il sera impossible de retrouver l'ensemble d'impressions initiales A que donnait la table : la table aura changé d'état. En se plaçant du point de vue de l'objet perçu et des impressions reçues par lui, Poincaré explique la perception tridimensionnelle comme une construction *via* les mouvements du sujet. La possibilité de revenir à l'ensemble d'impressions A (à moins qu'il y ait eu changement d'état) par le mouvement définit la règle de la réversibilité.

L'espace de la perception serait construit par le sujet à partir de sa reconnaissance de la différence entre les changements qu'il peut compenser par ses mouvements et les changements d'état qu'il ne peut compenser. C'est donc la réversibilité, la possibilité de revenir à une même position qui rend possible la construction d'un espace de perception. (Lenay, 2006, p.37)

Il y a réversibilité lorsqu'à un même mouvement correspond une même sensation et que cette correspondance s'institue comme régularité. La réversibilité suppose donc une répétition. Elle suppose la connaissance qu'avec tel mouvement, on (re)trouvera telle impression. De cette connaissance émerge la perception d'un environnement spatialement structuré. Comme l'indiquent Lenay et al (1997), différentes caractéristiques spatiales seront construites par différents types de mouvements.

Whatever the spatial dimension, it emerges from the power of capturing a reversibility, which requires the possibility to go away and come back, i.e. to leave one's present position and to risk going out into the unknown by taking a real action. Width and

height also result from a commitment of the subject which is necessary to capture a reversibility. They are, however, dependent on the degree of this commitment. A linear movement (as in the third experiment), which implies a movement of the hand into the perceived space, gives access to a linear type of measurement; on the contrary, an angular movement implying no other movement of the point of view but for the changes in its orientation gives access exclusively to angular measurements. (Lenay et al., 1997, p.50)

Lenay qualifie l'explication de la construction de l'espace par Poincaré de « monisme de l'espace ». Selon cette explication, il n'y a en effet qu'un seul espace pour les objets et leur perception, pour le corps et ses actions. La distinction entre sensations visuelles et sensations motrices (par exemple) n'est qu'une contingence biologique n'ayant aucun sens dans le processus de construction de l'espace. Ce qui importe, c'est la loi de réversibilité où sont couplés le sujet et son environnement.

A perception is not located inside a space of representation that is internal to the knowing subject, separate from a supposedly "external" space. It is built from the sensorimotor invariants of a coupling relation which implies the body as much as the medium in which the body is active. The space inside which perceptions are given is, at the same time, the space in which the subject moves. The subject lives inside the world which he perceives. Thus, space expresses our finiteness. It transcends the subject which inhabits it and is always a potential carrier of real risks, since the changes which take place in it can affect the subject who perceives it. We therefore understand that action is not a neutral movement that takes place outside of the knowing subject. It is always a relocation of the subject's capacity to act and to perceive which requires a real commitment from him. (Lenay et al., 1997, p.51)

Les contingences sensorimotrices à l'œuvre dans l'attribution distale ne sont pas seulement des lois liant les ressentis proximaux du sujet à ses actions, mais des lois prenant également en compte l'environnement dans lequel ces ressentis et ces actions se placent. Or l'environnement n'est pas seulement un « extérieur » imperméable où le sujet et ses actions sont posés. L'environnement fait au contraire partie du sujet et de ses actions, il les définit tout comme il se laisse définir par eux. Les actions du sujet se placent et ont des conséquences dans l'environnement. L'action, dans ce sens, est donc à redéfinir comme couplage entre le sujet et son environnement.

2.2. Le rôle de la proprioception dans la séparation entre soi et le monde

2.2.1. Proprioception et construction de l'espace

L'acquisition de la perception distale nécessite l'action du sujet, action définie comme un couplage entre le sujet et son environnement. Le sujet doit se sentir compris et impliqué dans l'espace pour donner un sens à son action afin de faire émerger l'attribution distale. Mais alors définir l'action comme un synonyme du mouvement – ce que fait en général la substitution sensorielle (ainsi que la cognition incarnée et située) – ne peut plus suffire : il faut comprendre comment ce mouvement (ou l'action) se distingue de l'espace. En effet, si on définit l'action comme le mouvement et le mouvement comme changement de position dans l'espace, alors dire que l'action construit l'espace est une diallèle, c'est-à-dire un raisonnement fallacieux dans lequel on donne pour définition d'une proposition (l'action construit l'espace) une seconde proposition (l'action est le mouvement et le mouvement est un changement de position dans l'espace) que l'on définit elle-même par la première.

Si l'on admet que la perception est active, et que c'est par ses actions que le sujet constitue un espace de percepts, comment donc caractériser ces actions ? Pour éviter le cercle vicieux qui consisterait à se donner d'abord l'espace pour définir les actions comme des mouvements, Poincaré suppose que le sujet n'accède d'abord qu'à des données proprioceptives internes. (Lenay, 2006, p.37)

Pour éviter cet écueil, Poincaré distingue les deux termes d'action et de mouvement. Le mouvement est défini en termes de proprioception – le terme n'est pas utilisé par Poincaré mais il correspond à la définition qu'il donne du mouvement comme un ensemble de « sensations musculaires ».

Quand je dis que nous nous représentons ces mouvements, je veux dire seulement que nous nous représentons les sensations musculaires qui les accompagnent et qui n'ont aucun caractère géométrique, qui par conséquent n'impliquent nullement la préexistence de la notion d'espace. (Poincaré, 1907, p.82)

La proprioception en tant que système perceptif relié aux muscles n'est pas intrinsèquement spatialisée ; elle le devient à condition de faire varier ses positions dans l'espace. Lenay (2006), s'inspirant de Poincaré, définit ainsi la proprioception comme « un type de sensation spécifique tel que pour chaque action articulaire différente possible, il y a une sensation proprioceptive différente » (p.37). D'un point de vue ontogénétique la proprioception se distingue de l'action dans la mesure où une même action peut avoir pour conséquence des sensations proprioceptives différentes selon la position du corps. L'espace se construit alors par le croisement entre les informations proprioceptives et des informations extéroceptives.

Appliqué à la substitution sensorielle, cela signifie que les sensations proximales reçues par le dispositif sont mises en lien avec les sensations proprioceptives reçues par les mouvements du sujet afin de faire émerger l'espace distal.

Les séquences de sensations extéroceptives tactiles seraient comparées aux sensations proprioceptives des mouvements du bras pour construire un espace tridimensionnel de pointage vers des objets lumineux. (Lenay, 2006, p.37)

La règle de réversibilité – le changement d'impressions d'une position (d'un objet) A à une position B – construit la perception d'un espace tridimensionnel grâce à la proprioception : les invariances des impressions extéroceptives doivent être couplées à des variations proprioceptives pour engendrer la construction de l'espace. Autrement dit, le fait qu'un même mouvement puisse être accompagné de sensations (proprioceptives) différentes est à la base de la perception d'un espace tridimensionnel.

Gapenne (2014) précise ce rôle de la proprioception ; plus exactement, il précise comment le couplage entre l'action et la proprioception permet la distinction entre soi et le monde – distinction à la base de la construction de la perception spatiale. Gapenne note l'ambiguïté qui entoure la définition de la proprioception. Tout d'abord, celle-ci ne doit pas être confondue avec la perception par l'individu de son propre corps – fonction qui implique d'autres systèmes sensoriels.

Only too often, and wrongly, "proprioception" is misleadingly over-represented as the perception of self as an embodied, acting agent. But it is obvious [...] that this sort of

perception of bodily activity and the self involves many (and indeed, a priori, all) perceptual systems. (Gapenne, 2014, p.4)

La proprioception est un système sensoriel particulier impliqué dans l'expérience (et la régulation) du mouvement, de la posture et de l'équilibre. Gapenne relève deux spécificités essentielles de la proprioception, essentielles pour expliquer son rôle dans la distinction entre soi et le monde. La première est que le système proprioceptif est activé par et seulement par les déformations du corps. C'est le seul système perceptif à fonctionner ainsi. Pour les autres sens il y a toujours ambiguïté sur la source de stimulation qui peut être externe ou interne. Par exemple, les propriétés d'un son peuvent être modulées par le mouvement de l'individu (le son devient plus intense s'il s'en rapproche) ou par l'environnement (la source du son est fluctuante). La proprioception n'est quant à elle sensible qu'aux changements de positions de l'individu.

The specificity of proprioception derives from the fact that all the other sensory organs respond to variations essentially linked to mechanical, chemical, optical, or other flows which come from the environment. [...] The crucial point here is thus that variation in the stimulation of all the sensory organs, with the sole exception of proprioception, is linked to bodily engagement but is always liable to be compounded with the effects of events external to the agent. In other words, variation in the activity of the sensory organs, which is itself linked to variation of their source, is always potentially composite and ambiguous quite simply because the source of this variation is potentially dual (and, in the event, almost always is dual since there is a mix of variation due to the agent itself and variation due to external events). (Ibid.)

Cette caractéristique permet de qualifier la proprioception de « système moto-sensoriel » qui sert de filtre et de calibrage pour les signaux reçus de l'extérieur.

By having at its disposal a moto-sensory system strictly associated with its own activity, the agent possesses a powerful tool for filtering and calibrating signals for which it does not control the determinism. (Ibid.)

Gapenne préfère le terme de « moto-sensoriel » à celui de sensorimoteur pour qualifier le système proprioceptif dans la mesure où le mouvement est à la fois l'élément le plus important du couplage et également celui qui prime ontogénétiquement.

La seconde spécificité de la proprioception est qu'elle peut moduler directement les autres systèmes sensoriels (elle peut agir sur les récepteurs), tandis que les autres systèmes sensoriels ne peuvent directement la moduler.

The activity of proprioceptive receptors does not seem to be modulated by anything other than the activity of the effectors to which they are linked. [...] This anatomical particularity has functional consequences. The activation of afferent proprioceptive fibers can modulate the behavior of the receptors of other sensory systems via their action at the level of central nuclei from which efferent fibers leave toward the other sensory receptors. Conversely, the other sensory systems are not able to carry out such a modulation, other than indirectly via the modulation of the tension of the muscular fibers. (Gapenne, 2014, p.5)

2.2.2. Proprioception et construction de l'espace dans la substitution sensorielle

Quel est le rôle de la proprioception dans la substitution sensorielle pour l'acquisition de la perception distale? Gapenne rappelle la nécessité du couplage entre actions et sensations. Il définit la substitution sensorielle – au niveau matériel de l'appareil – comme l'introduction d'une double transduction dans le système perceptif. La transduction désigne tout mécanisme par lequel un signal est converti en un signal « équivalent » (ou comparable) d'une autre sorte. Ce mécanisme est accompli par tous les organes sensoriels. La substitution sensorielle, par définition, met en jeu une transduction artificielle (les signaux de la caméra transcrits en impulsions tactiles ou en sons) et une transduction naturelle (ces impulsions tactiles ou ces sons sont transcrits en « images » par l'individu).

Technically, sensory substitution requires the insertion of an activator or stimulator (or a whole set of activators or stimulators) as an intermediary between two sensory systems, one artificial and the other natural. In other words, the “substitution” involves a doubling of the stimulation and thus a doubling of the transduction: an artificial transduction (via a sensory device = transduction 1), and a natural transduction (via a functional sensory system = transduction 2). (Gapenne, 2014, p.2)

Mais cette définition technique n'est pas suffisante. En effet, le rôle de l'action rappelle que le fonctionnement réussi de la substitution sensorielle ne peut se limiter à une simple

transduction d'un input (le signal sensoriel fourni par l'appareil) en un signal nerveux. En effet, deux conditions supplémentaires sont nécessaires : (1) les signaux sensoriel transmis « en entrée » doivent varier et (2) cette variation doit être interprétée *par l'utilisateur* comme le résultat de ses actions selon des lois de transformation (e.g : une vibration ressentie en haut du dos correspond à un objet situé en hauteur).

The substitution is not limited to this double transduction in the sense of a two-stage transfer of input signals to the nervous system. Firstly, it is imperative that the signals that are transmitted should be subject to variation. Secondly, and this is the really essential point, the “substitution” only becomes effective if this variation is amenable to interpretation; and the key condition for this is that the variation in question should be determined by the user³⁴. [...] This variation must be an active variation, i.e., the variation must be produced and controlled by the agent. (Ibid.)

L'action du sujet dans la substitution sensorielle est donc une action du corps s'adaptant à l'instrument ou se l'appropriant (ce que Bermejo et al. appellent les contingences sensorimotrices liées à l'appareil), et une action du corps déplaçant l'instrument selon l'environnement (les contingences sensorimotrices liées à l'objet).

The “substitution,” as a process which is equipped, must include the tool of an inverse double transduction corresponding to the action produced by the body with respect to the instrument, an action producing a movement of the instrument with respect to the environment. (Ibid.)

Ainsi les mouvements du sujet provoquent des variations sensorielles à la fois dues à l'appareil et à la fois dues aux mouvements eux-mêmes. La question est donc maintenant de savoir comment les utilisateurs parviennent à distinguer ces deux types de variations en tant que référents d'un monde extérieur. L'hypothèse de Gapenne est que le flux tactile ou sonore reçu en conséquent de l'appareil est un flux contingent – il dépend de ce qu'il y a à percevoir – tandis que le flux proprioceptif est pour sa part absolu – pour une même position, le flux ne change pas. Chaque mouvement aurait donc une conséquence à la fois tactile ou sonore et proprioceptive.

³⁴ As shown by Diaz et al.'s (2012) experiments: the subject has to be the active source of the flow of sensations.

The deployment of each movement is always associated with a double reafferent flow (here, a tactile flow and a proprioceptive flow). One of these reafferent flows (the tactile flow) would be contingent, and the other one (the proprioceptive flow) would be absolute – at least to a first approximation. The hypothesis would then be that the proprioceptive system contributes to a filtering, since it provides the agent with a non-ambiguous indication as to whether he/she is active or not. (Ibid., p.4)

La proprioception aurait alors pour rôle d'offrir à l'individu une indication sur ses mouvements. Elle indiquerait à l'utilisateur qu'il est bien actif et qu'ainsi les variations de ses ressentis proximaux sont bien provoquées par lui, en relation avec l'environnement extérieur. La proprioception a un rôle dans l'attribution distale en ce qu'elle est le socle anatomique de la distinction de l'individu entre lui-même et le monde. Ce rôle est effectif grâce à l'action – puisque c'est le couplage de la proprioception et de l'action qui fait sens pour l'individu.

3. Des contingences sensorimotrices à la perception distale : la construction de l'espace pour l'individu

Jusqu'ici, on s'est intéressé à la perception par le sujet des objets situés à distance (l'attribution distale des objets). Nous voudrions maintenant aborder le cadre plus général de la perception spatiale tridimensionnelle. Comment le sujet construit-il une perception de l'espace en trois dimensions et comment se place-t-il lui-même dans cet espace ?

3.1. Au-delà du sensorimoteur : le but de l'action et le couplage sujet-environnement

On a déjà évoqué, avec l'expérience de Siegle et Warren (2010), l'avantage d'une stratégie perceptive sur une stratégie cognitive, ainsi que la nécessité du sujet de s'impliquer dans le monde – autrement dit la nécessité pour toute perception d'avoir un « but perceptif » (on perçoit *pour*...). Lenay et al. (1997) considèrent d'une certaine manière cette nécessité de l'investissement du sujet dans le monde. En effet, dans des variantes de leur expérience avec

le dispositif minimaliste, les auteurs cherchent à explorer les limites de la loi de triangulation en contraignant les mouvements des sujets. Dans une première variante, l'« exploration par rotation », il est demandé aux participants de limiter leurs mouvements à un geste de balayage avec les bras tendus – autrement dit, seule la main effectue le geste, le bras restant immobile (cf. Figure 18).

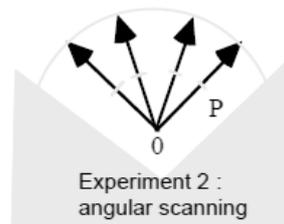


Figure 18 : exploration par rotation (Lenay et al. 1997)

La tâche du sujet est toujours d'estimer la distance d'une cible. Les résultats montrent que les participants sont capables d'indiquer la direction d'une cible et d'évaluer grossièrement un angle large, mais qu'ils ne peuvent estimer la distance de la cible. De plus, ils déclarent n'avoir eu perceptivement accès qu'à deux dimensions spatiales (largeur et hauteur) – ils n'ont acquis aucune profondeur. Malgré cela, les sensations reçues sont toujours associées à un objet extérieur dans cet espace bidimensionnel.

La différence essentielle relevée par les auteurs entre l'expérience principale et cette variante se trouve dans la manière selon laquelle le sujet se situe lui-même en relation à l'espace qu'il perçoit : à l'intérieur de cet espace (expérience 1) ou à l'extérieur (expérience 2 : le sujet se pense en dehors de l'espace qu'il perçoit, de même que lorsqu'on visionne un écran en deux dimensions).

In the first experiment, the subject perceived himself inside the space of the perception which he was building. From the moment when the object was perceived, the hand was simultaneously, at every moment, located in relation to that object (on the side to the right, or in front and above, etc.). [...] By contrast, in the second experiment, the subject does not think of himself as located in the two-dimensional space in which he perceives the target: he feels as if placed in front of the space which he perceives (even if this space can be perceived as being in contact with him). (Lenay et al., 1997, p.49)

Dans le cas où le sujet acquiert une perception de la profondeur – l'expérience 1 – le sujet se situe dans cette profondeur, il agit à l'intérieur de l'espace perçu. L'intégration de l'action dans l'espace semble donc être un élément essentiel à l'attribution distale : lier sensations et action ne suffit pas, il faut en plus que l'action soit *intégrée* aux sensations.

The decisive condition giving rise to depth would therefore seem to be that the action which makes it possible is a movement in the perceived space. Depth is the result of a form of commitment by the subject, of a relocation of the point of view of perception, i.e. of the spatial position from which the sensations are captured. The hand must move forward in the perceived space. Depth can, therefore, in no case be understood as a simple rule linking together different sensations; it requires that actions be integrated. (Ibid.)

Jusqu'ici nous avons considéré les liens entre les ressentis proximaux et les actions du sujet, mais nous n'avons pas encore fait allusion à l'environnement. Or, une théorie incarnée et située de l'individu doit, pour être complète, considérer l'environnement. Elle doit comprendre la cognition comme « intégrée », c'est-à-dire comme une relation ternaire entre le cerveau, le corps et l'environnement extra-corporel³⁵. Or, on observe à travers l'expérience précédemment mentionnée que la perception des objets comme situés à distance dans l'espace n'est pas nécessairement corrélée à la perception d'un espace en trois dimensions : le sujet a besoin en plus (notamment) d'être investi dans son environnement, *via* son action. Autrement dit l'action doit se situer et être intégrée dans l'ensemble des dimensions de l'espace perçu. Lenay cite Merleau-Ponty pour souligner l'importance du but pour cette intégration. Celui-ci redéfinit le corps comme un système d'actions potentielles, qui se réalise en fonction de ce que l'environnement offre et ce qu'il y a à faire.

Ce qui importe pour l'orientation du spectacle, ce n'est pas mon corps tel qu'il est en fait, comme chose dans l'espace objectif, mais mon corps comme système d'actions possibles, un corps virtuel dont le « lieu » phénoménal est défini par sa tâche et par sa situation. Mon corps est là où il a quelque chose à faire. (Merleau-Ponty, 1945, p.289)

La théorie sensorimotrice d'O'Regan et Noë (2001) considère également cette idée d'une implication de l'action du sujet dans le monde pour construire la perception. Les

³⁵ Clark (2008) signale ainsi une tension entre une cognition « embodied » (incarnée) ne considérant que le corps de l'individu et une cognition « embedded » (étendue) incluant l'environnement.

auteurs considèrent la vision comme possédant trois aspects : qualité visuelle, appareil visuel, conscience visuelle. La « nature qualitative » de la vision est caractérisée par les deux premiers aspects.

The distinctively visual qualities that are determined by the character of the sensorimotor contingencies set up by the visual apparatus; and the aspect which corresponds to the encounter with visual attributes, that is, those features which allow objects to be distinguished visually from one another. (O'Regan & Noë, 2001, p.943)

La « conscience visuelle » est pour sa part l'application de cette « nature qualitative » à un environnement, par des buts structurant cet environnement.

To possess visual awareness, what is required is that, in addition to exercising the mastery of the relevant sensorimotor contingencies, it must make use of this exercise for the purposes of thought and planning. When you not only visually track an environmental feature by exercising your knowledge of the relevant sensorimotor contingencies, but in addition integrate this exercise of mastery of sensorimotor contingencies with capacities for thought and action-guidance, then you are visually aware of the relevant feature. Then, we say, you see it. (Ibid., p.944)

Le passage de la nature qualitative de la vision à une « conscience visuelle » peut encore une fois faire référence à l'attribution distale et à sa finalité : la perception distale. Or O'Regan et Noë précisent bien que la conscience visuelle nécessite *quelque chose en plus* des contingences sensorimotrices (« *in addition to exercising the mastery of the relevant sensorimotor contingencies* »), quelque chose permettant d'intégrer les lois sensorimotrices pour les utiliser : « voir » implique un but (« *for the purposes of thought and planning* »).

Les contingences sensorimotrices (qu'elles soient conformes à l'approche écologique de Gibson ou à celle d'O'Regan et Noë) permettent d'interpréter le rôle de l'action dans la substitution sensorielle en tant que génératrice de ressentis proximaux – ressentis ensuite « interprétables » en terme de perception. Cependant, elles ne disent pas tout sur le processus de l'attribution distale, sur le passage de la maîtrise de ces contingences à une perception du monde. Les contingences sensorimotrices portent sur les qualités visuelles et l'appareil visuel ; mais l'attribution distale inclut la conscience visuelle qui pour sa part excède l'utilisation de ces contingences.

3.2. Ambiguïtés et limites de l'approche sensorimotrice

Les théories sensorimotrices permettent de constater le rôle nécessaire du mouvement pour l'attribution distale. Ce rôle semble s'inscrire dans la relation plus globale que représentent les contingences sensorimotrices. Autrement dit, le mouvement serait nécessaire en tant qu'élément constitutif d'une loi le liant aux sensations. Les théories sensorimotrices soulignent également le rôle central de la proprioception dans l'attribution distale. Néanmoins, il faut noter que ces contingences sont l'objet d'ambiguïtés pas totalement résolues. Sont-elles définies par une loi de triangulation inférée à un niveau cognitif ou implantée à un niveau physique ? Est-ce un processus abstrait ou incarné ? Quel est le rôle de l'objet et celui de l'appareil dans ces contingences ?

Nous pouvons schématiser la mise en place du mécanisme sensorimoteur dans la substitution sensorielle telle que nous l'avons analysée dans ce chapitre de la manière suivante. Tout d'abord, l'utilisateur effectue des mouvements exploratoires et reçoit des variations sensorielles en retour, à partir desquelles il infère certaines caractéristiques de l'objet en fonction des lois de transformation dont il a été informé. La Figure 19 précise cette étape. Dans un premier temps (1), le sujet commence par effectuer des mouvements exploratoires. Ces mouvements ont des conséquences sur le dispositif (qui bouge) et sur le système proprioceptif. Le système proprioceptif répond par des variations sensorielles particulières. Ensuite (2), le dispositif enregistre la scène et analyse l'image reçue selon ses lois de transformations particulières. Puis (3) il délivre au sujet un pattern sensoriel particulier en fonction de ces lois. Ces patterns sensoriels ont également des effets proprioceptifs (4) qui pourront servir au sujet d'indices sur les mouvements à effectuer une fois le dispositif mieux maîtrisé (flèche rouge en pointillés dans la figure). Tant que l'attribution distale n'a pas eu lieu, le sujet infère (4) des caractéristiques spécifiques de l'objet en fonction des seules variations sensorielles reçues par le dispositif.

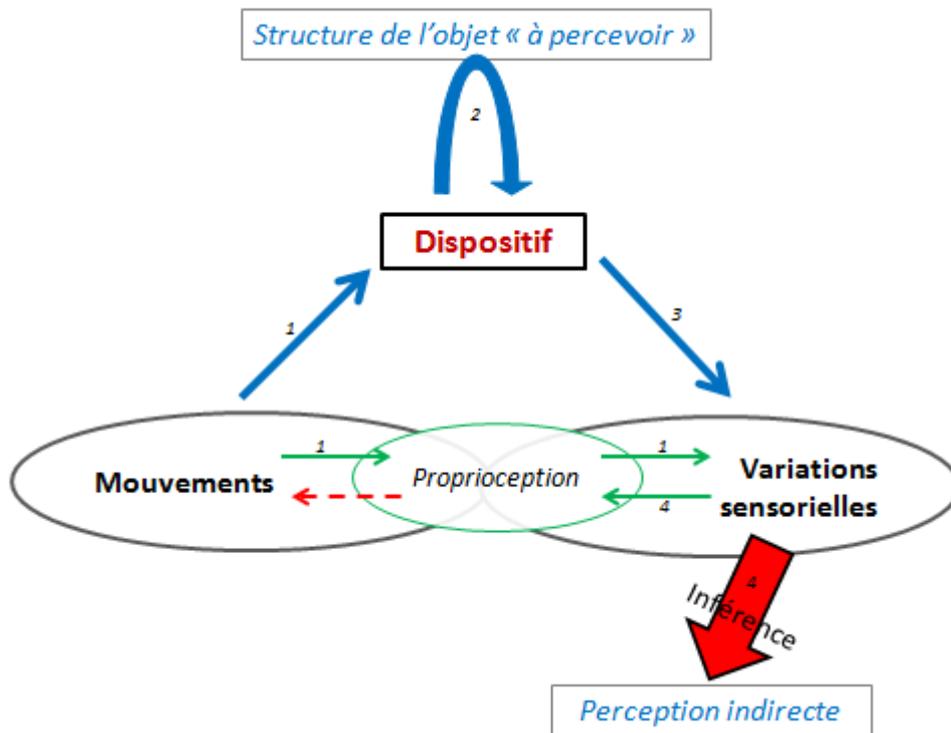


Figure 19 : Etape 1 : mise en contact avec le dispositif

Les variations sensorielles consistent donc à la fois en des retours proprioceptifs et en des retours de l'appareil. A force de répétition, des contingences sensorimotrices sont mises en place et le sujet « oublie » alors le dispositif pour percevoir directement les objets à distance dans le monde. La Figure 20 schématise cette perception directe et distale mise en place par le processus de substitution sensorielle.

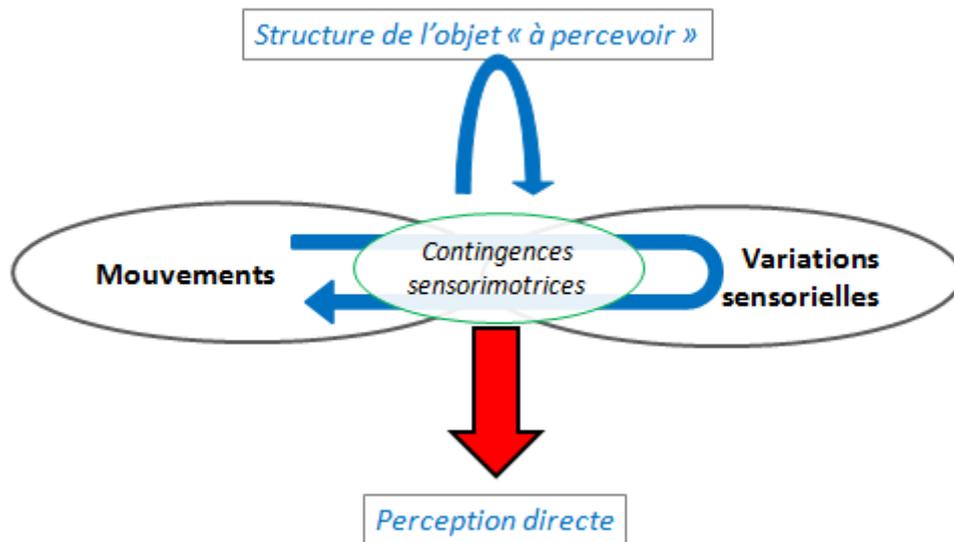


Figure 20 : Etape 2 : perception distale *via* des contingences sensorimotrices

Mais comment expliquer qu'une perception *distale* émerge de ces contingences sensorimotrices ? Le chapitre suivant s'intéresse aux théories idéomotrices en ce qu'elles s'intéressent précisément aux liens qui unissent mouvements et variations sensorielles.

CHAPITRE 1.4

EXPLIQUER L'ATTRIBUTION DISTALE PAR UN
MECANISME IDEOMOTEUR

Les tentatives des partisans d'une théorie sensorimotrice pour investiguer les processus en jeu dans la substitution sensorielle ne peuvent pas se limiter aux contingences sensorimotrices pour expliquer l'attribution distale. Qu'il s'agisse de l'ambiguïté de la loi de triangulation, à la fois interprétable en tant que telle comme inférence cognitive ou comme processus perceptif et comme un processus plus ou moins abstrait – comme souligné par Siegle et Warren (2010), ou qu'il s'agisse de la « conscience visuelle » d'O'Regan et Noë (2001) qui par définition excède la fonctionnalité des contingences sensorimotrices, les travaux autour des théories sensorimotrices se sont avant tout attachés à démontrer l'*existence* et la *nécessité* des contingences sensorimotrices dans l'acquisition d'une perception distale par des dispositifs de substitution sensorielle. En revanche, peu se sont intéressés à la manière donc la perception distale est causalement liée aux contingences sensorimotrices : peu expliquent comment les utilisateurs acquièrent une perception distale à partir de ces contingences. Les rares travaux s'étant intéressés à cette question (e.g. Pacherie, 1997 ; Auvray, 2004 ; Lenay, 2006 ; Gapenne, 2014) ont pour point commun la référence à la théorie de Poincaré. La raison de cet intérêt commun est que la théorie de Poincaré permet de dépasser la simple allégation des théories sensorimotrices selon laquelle sensations et mouvements sont liés et nécessaires pour l'établissement de la perception. Comme nous l'avons vu (cf. pp.93-95), Poincaré explique en effet que les sensations et les mouvements sont liés selon la règle de la réversibilité qui veut qu'une régularité s'installe entre mêmes mouvements et mêmes sensations. La perception spatiale nécessite (1) la répétition de sensations en conséquent de mêmes mouvements, (2) l'intégration de cette répétition jusqu'à ce que la connaissance (implicite) de cette correspondance mouvements-sensations s'institue comme régularité et (3) le fait qu'un même mouvement puisse être accompagné de sensations proprioceptives différentes.

Cette idée d'une connaissance intégrée et réversible des régularités instituées entre les mouvements et leurs conséquences sensorielles n'est pas sans rappeler un autre champ théorique : les théories idéomotrices (pour une vue d'ensemble, voir Shin, Proctor, & Capaldi, 2010 ; Badets & Rensonnet, 2015 ; pour un bref historique voir Stock & Stock, 2004). C'est maintenant à elles que nous allons nous intéresser afin de proposer de combler le fossé pouvant exister entre contingences sensorimotrices et perception distale.

1. Du mécanisme idéomoteur dans l'attribution distale

Historiquement et encore de nos jours les théories idéomotrices ne font pas état des résultats obtenus par la substitution sensorielle et ne tentent pas non plus d'expliquer l'attribution distale. Elles posent l'idée que l'effet de l'action est considéré comme une entité distale et se sont principalement focalisées autour du thème du contrôle de l'action. Leur hypothèse centrale est que l'action est contrôlée par l'image anticipatoire de ses effets – et non en fonction d'un stimulus comme le suggèrent les théories plus classiques. Pour que l'action soit contrôlée par l'anticipation de ses effets il est nécessaire qu'un processus bidirectionnel entre la réalisation d'un mouvement et ses conséquences sensorielles ait pu préalablement être mis en place pour le sujet. C'est précisément ce processus bidirectionnel idéomoteur qui nous intéresse pour rendre compte de la perception distale et de son corolaire : le processus d'attribution distale.

Durant la période d'apprentissage d'un dispositif de substitution sensorielle, les sujets associent des mouvements (lorsqu'ils bougent la caméra) à des conséquences sensorielles (impulsions tactiles, sons, etc.). Ces conséquences consistent lors des premières utilisations en des sensations proximales. Mais à force de répétition, ces sensations proximales deviennent « intégrées » à la perception des stimuli extérieurs, jusqu'à ce que le sujet ne les distingue plus. Autrement dit, après maîtrise du dispositif les sensations proximales sont tellement « significatives » des objets externes qu'elles finissent par ne plus être perçues pour elles-mêmes.

1.1. Définition du mécanisme idéomoteur

1.1.1. Principe général : historique et définition

1.1.1.1. Historique : du réflexe cérébral au mécanisme général de l'idéomoteur

Le terme idéomoteur vient du grec « *idea* », idée, et du latin « *motare* », mouvement. « L'idée du mouvement » fait référence au lien entre les images mentales associées au monde

extérieur (« idées ») et l'action : ce lien est tel que les images mentales et le système moteur s'influencent réciproquement, donnant aux individus la possibilité de provoquer une action par l'anticipation de ses conséquences.

Stock et Stock (2004) présentent deux origines à la théorie idéomotrice, qui peuvent aider à en comprendre le fonctionnement : une origine anglaise et une origine allemande. L'approche anglaise, initiée par Laycock (1845) puis développée par Carpenter (1852), est élaborée à partir de l'observation et de l'expérimentation faite sur des patients hydrophobes. Laycock remarque que la seule idée de l'eau suffit à entraîner l'apparition d'un mouvement réflexe de peur chez ces patients : une simple image mentale peut provoquer des mouvements de manière non volontaire. Laycock définit physiologiquement cette réaction comme un « réflexe cérébral ». Carpenter fait pour sa part le lien entre ces observations et le concept d'idéomotricité, dont il est l'auteur. Les « réflexes idéomoteurs »³⁶ désignent le déclenchement d'actions par des idées. Les premiers théoriciens allemands de l'idéomoteur (Herbart, 1816, 1825 ; Lotze, 1852 ; Harless, 1861) se distinguent de ce niveau physiologique et expérimental. Leur motivation est philosophique, elle consiste à trouver une solution au problème corps-esprit mentionné en introduction de cette thèse : comment l'esprit parvient-il à engager des actions du corps sans avoir conscience de son fonctionnement ? De plus les théoriciens allemands s'intéressent à l'aspect développemental du processus idéomoteur. Herbart distingue deux étapes dans la mise en place du processus. (1) Tout d'abord, lors de tout processus d'apprentissage – notamment durant le développement – l'individu apprend quels effets sensoriels sont la conséquence de quelles actions. Nous avons précédemment développé cette idée d'apprentissage dans la substitution sensorielle, où l'utilisateur apprend précisément quels sensations proximales délivrées par le dispositif correspondent à quelles actions faites avec la caméra. Pour l'approche idéomotrice, la répétition de ce lien action-conséquences sensorielles permet l'intégration de l'effet à l'action. (2) Une fois ce lien bilatéral mis en place, l'initiation d'une action se fait par anticipation des conséquences sensorielles de cette action.

Right after the birth of a human being or an animal, certain movements in the joints develop, for merely organic reasons and independently of the soul; and each of these movements elicits a certain feeling in the soul. In the same instance, the outside senses

³⁶ En opposition avec les réflexes « excitomoteurs » – comme la respiration ou la déglutition – et les réflexes « sensorimoteurs » – comme les réactions de surprise suivant un son fort inattendu ou la réaction de retrait au contact d'une surface brûlante.

perceive what change has come about. [...] At a later time, a desire for the change observed before arises. Thus, the feeling associated with the observation reproduces itself. This feeling is a self-preservation (Selbsterhaltung) of the soul, which corresponds to all the inner and outer states in nerves and muscles through which the intended change in the sphere of sensual perception can be brought about. Hence, what has been desired actually happens; and the success is perceived. Through this, the association is reinforced: the action, once performed, makes the following one easier and so on. (Herbart, 1825, p. 464)

La théorie idéomotrice expliquerait tous les mouvements volontaires et serait un moyen de préserver son corps par anticipation des conséquences de l'action que l'on va accomplir. James (1890) popularise le principe idéomoteur et surtout le généralise : toute action est selon lui idéomotrice – puisque toute action a des conséquences sensorielles uniques. Toute action est générée et contrôlée par l'anticipation des conséquences sensorielles qu'elle engendre.

A la suite de James, la critique virulente adressée par Thorndike (1913) aux théories idéomotrices les plongent dans l'oubli jusqu'aux années soixante-dix. Thorndike objecte d'une part à ces théories le fait que toute idée n'engage pas nécessairement une action. D'autre part, il avance l'argument béhavioriste que les situations exhibées par les partisans de l'idéomoteur peuvent en fait être expliquées par la connexion établie entre une situation déjà expérimentée et un comportement (comportement qui sera répété s'il est perçu comme positif – comme une récompense de l'action – ou annulé s'il est perçu comme négatif – associé à une punition). L'idée du comportement n'a pour Thorndike aucun impact sur l'action. Son alternative à la théorie idéomotrice pour expliquer l'action est « la loi de l'effet » (Thorndike, 1911). L'effet d'un comportement est associé au comportement qui l'a provoqué ; si cet effet est positif le comportement est renforcé et sa probabilité de se manifester augmente, tandis que s'il est négatif le comportement est inhibé et sa probabilité de se manifester baisse (Cf. Figure 21 pour un schéma de cette loi).

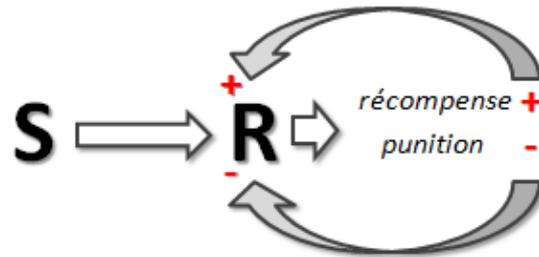


Figure 21 : Schéma de la loi de l'effet de Thorndike : S représente un stimulus, qui a pour conséquence une réponse (R). Cette réponse peut être renforcée (+) par une récompense ou inhibée (-) par une punition.

Dû à la prévalence du béhaviorisme, il faut attendre les années soixante-dix pour que les théories idéomotrices refassent surface. Il est notamment reproché à l'approche de Thorndike d'être incomplète en ce qu'elle ne prend pas en compte les conséquences de l'action – ou les réduit du moins au conditionnement, c'est-à-dire aux récompenses et aux punitions. De plus, alors que le béhaviorisme rejette toute investigation des processus cognitifs (il ne s'intéresse qu'aux stimuli et aux comportements) les théories idéomotrices renouent avec une approche moins segmentaire qui inclut la cognition.

1.1.1.2. Les deux phases de la mise en place du mécanisme idéomoteur

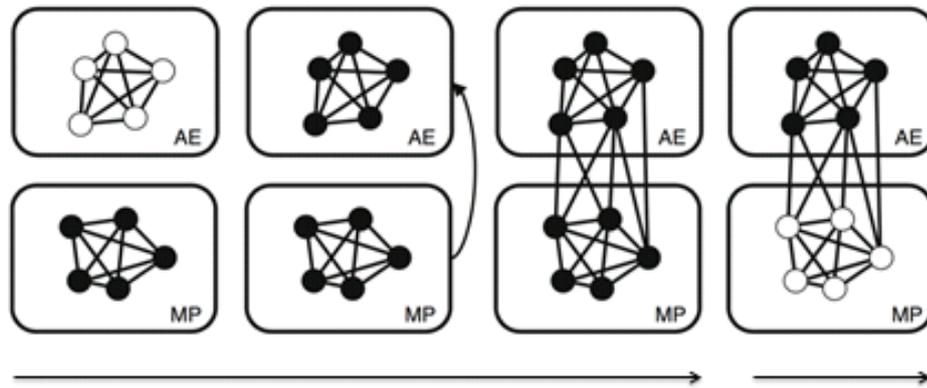
Le cœur du principe des théories idéomotrices est que le contrôle de l'action s'effectue par l'activation de l'image anticipatoire des effets de cette action. Au niveau développemental et de l'apprentissage, ce mécanisme s'organise en deux phases. La première étape du mécanisme, présentée par Lotze (1852) et Harless (1861), est une phase de comportement aléatoire, exploratoire. Dès les premières phases de développement du fœtus (semaines 9 à 16)³⁷, alors que les muscles et le cerveau commencent à se former, on observe des mouvements incontrôlés et des contractions musculaires (Prechtl, 2001). Ces premiers mouvements, ainsi que ceux qui suivront – jusqu'après la naissance – ne sont pas encore coordonnés, ils sont provoqués par des stimuli externes qui occasionnent des réflexes ou des états internes (c'est-à-dire des mouvements des récepteurs sensoriels). Le processus d'apprentissage de familiarisation avec le monde commence avec des mouvements tâtonnants, exploratoires. Quel que soit le pattern moteur effectué, celui-ci est suivi de conséquences sensorielles. L'individu enregistre alors les associations entre patterns moteurs et patterns

³⁷ Le passage du stade de l'embryon au stade du fœtus a lieu une fois que les principaux organes et tissus sont formés.

sensoriels correspondants. Les conséquences sensorielles qui résultent des mouvements deviennent automatiquement (consciemment ou non) discriminées comme des conséquences spécifiques des mouvements. Cette association est renforcée si elle est répétée et stable dans le temps. Par exemple, le nourrisson qui frappe une surface avec sa main droite entend un son d'une plus forte intensité dans son oreille droite que dans son oreille gauche. Du point de vue neuronal, James (1890) prend l'exemple d'un neurone (M) dont l'action provoque le déplacement d'un muscle, qui provoque alors un retour kinesthésique en activant un autre neurone (K). Si l'activation de M mène à l'activation de K assez régulièrement, une association entre M et K se forme selon la règle de Hebb qui veut que « les neurones qui s'activent en même temps se connectent » (“neurons that fire together, wire together”). (Lowel & Singer, 1992, p.211). Notons ici que l'emploi du terme de « kinesthésique » par James renvoie au concept de proprioception, en tant que perception de la position du mouvement³⁸.

La seconde étape est celle de l'intégration : lorsque l'activation du même effet suit le même mouvement assez régulièrement, les mouvements et leurs effets deviennent « intégrés ». Une fois acquise, cette association entre mouvements et effets est bidirectionnelle : elle peut être exécutée dans la direction inverse. K est devenu un indice de récupération pour M ; recréer ou anticiper l'expérience sensorielle codée par K devient un moyen d'activer M. Le mouvement peut être enclenché par l'activation préalable de l'effet. La sélection ou la programmation des mouvements se fait donc par anticipation de ses effets (Cf. Figure 22).

³⁸ Le terme de kinesthésie est aujourd'hui employé pour désigner le système comprenant la proprioception et le système vestibulaire.



Hommel (2001; 2015)

Figure 22 : Représentation des deux phases du mécanisme idéomoteur au niveau neuronal. AE signifie « Action Effect » et MP « Motor Pattern ».

Ce mécanisme idéomoteur n'est pas exclusif au développement fœtal et post-natal. Tout phénomène d'apprentissage reposerait sur ce mécanisme. Par exemple, lors de l'apprentissage d'un instrument de musique, ou d'un sport, ou d'un appareil électronique jusqu'alors inconnu, le processus d'apprentissage commence par des mouvements tâtonnants et exploratoires ; les individus sont « maladroits » et ne maîtrisent pas l'activité. Nous avons parlé de « processus d'attribution distale » pour décrire le passage de cet état à celui de la maîtrise de l'appareil sur le monde, où les sujets n'ont plus à se concentrer sur leurs mouvements. Nous pouvons maintenant avancer l'idée que ce processus d'attribution distale est en fait un processus idéomoteur où ce que les individus apprennent est le lien systématique entre des mouvements (précédemment « inconnus ») et leurs effets.

D'un point de vue expérimental, trois procédures servent aujourd'hui de référence aux théories idéomotrices et permettent d'illustrer le mécanisme idéomoteur : celle de compatibilité Réponse-Stimuli de Greenwald (1970), celle d'acquisition Réponse-Effet d'Elsner et Hommel (2001) et celle de compatibilité Réponse-Effet de Kunde (2001).

1.1.2. Paradigmes expérimentaux

1.1.2.1. Première démonstration expérimentale du mécanisme idéomoteur : Greenwald (1970)

Greenwald (1970) reprend le principe idéomoteur dans la continuité du travail de James. Il est le premier à chercher à valider la théorie idéomotrice grâce à une démonstration

empirique. Greenwald considère que les actions d'un individu sont représentées sous forme d'images mentales en fonction des données immédiates de nos sens. De plus, il affirme que les représentations sensorielles jouent un rôle dans le contrôle des performances d'un individu – elles aideraient l'individu à réaliser des actions. Greenwald considère alors que si un retour sensoriel sous forme d'image mentale affecte la réponse volontaire, cela devrait pouvoir être démontrable par une procédure expérimentale *via* des temps de réaction. Il émet l'hypothèse que le temps de réaction est meilleur lorsque l'image évoquée et le sens stimulé sont en accord : une image visuelle sera plus rapidement évoquée par la vue et une image auditive par l'ouïe. Pour démontrer cela, il considère la perception de stimuli visuels et auditifs séparés respectivement entre les systèmes visuels et auditifs. Au cours de l'expérience, les individus sont soumis à des stimuli écrits ou oraux et doivent réagir de manière concordante par les mêmes moyens (écrit ou oral). En accord avec son hypothèse, Greenwald observe de meilleurs temps de réaction lorsque la nature du stimulus et le type de réponse demandée sont compatibles. Les sujets sont ainsi plus rapides lorsqu'ils doivent répéter oralement un stimulus auditif ou lorsqu'ils doivent écrire un stimulus visuel que lorsqu'ils doivent écrire un stimulus auditif ou énoncer un stimulus visuel. Ceci est pour Greenwald l'indice d'un couplage entre la modalité du stimulus et celle de la réponse. L'interprétation idéomotrice des résultats invite à concevoir l'existence d'une « image » des effets des actions (ou une image du feedback sensoriel de l'action) médiatrice du contrôle des actions volontaires.

The essence of the ideomotor interpretation of the interaction result [between incompatible and compatible couplings] is the hypothesis of an image that (a) mediates voluntary response performance, and (2) occurs in the form of the response's sensory feedback. (Greenwald, 1970, p.23)

Greenwald introduit expérimentalement l'idée d'un lien entre une réponse motrice et l'anticipation de ses effets sensoriels, lien qui impacte le contrôle de l'action. Nous sommes plus particulièrement intéressés par la mise en place de ce lien.

1.1.2.2. Les deux phases du mécanisme : Elsner et Hommel (2001)

Elsner et Hommel s'intéressent à la mise en place du mécanisme idéomoteur. Les expériences de Greenwald reposent sur des associations réponse-effets préalablement acquises par l'expérience. Elsner et Hommel font l'hypothèse que si l'association réponse-effet est dépendante de l'apprentissage, alors une phase d'apprentissage peut établir n'importe quelle

association entre ces deux éléments. Leur paradigme expérimental a pour intérêt de mettre en lumière les deux phases du mécanisme idéomoteur. Leur expérience se déroule en deux étapes – qui correspondent aux deux phases du modèle. Dans la première phase dite d'« acquisition », on demande aux participants d'appuyer aléatoirement sur des touches de réponse à leur droite avec leur main droite ou à leur gauche avec leur main gauche. Ces touches ont pour conséquence des sons aigus ou graves, chaque côté étant associé à un type de son. Elsner et Hommel schématisent cette phase ainsi : $R_1 \Rightarrow E_1$, $R_2 \Rightarrow E_2$, où R est la réponse et E l'effet. L'hypothèse ici en jeu est que cette association, à force de répétitions, forme une association bidirectionnelle entre les réponses (touches droite ou gauche) et les effets (son aigu ou grave) : $r_1 \Leftrightarrow e_1$, $r_2 \Leftrightarrow e_2$. La seconde phase, la phase « test », a pour but de valider cette hypothèse. Si l'association bidirectionnelle a effectivement été mise en place, alors chaque effet sonore devrait activer la réponse qui lui a été associée au préalable. La seconde phase compare ainsi un groupe dans une condition compatible (« nonreversal group ») à un groupe dans une condition incompatible (« reversal group »). Les deux groupes ont pour tâche d'appuyer sur une touche de réponse à droite ou à gauche lorsqu'ils entendent un son particulier, aigu ou grave. Pour le groupe compatible, le côté de la touche de réponse devant être pressée après un certain son correspond au côté de la touche suivant ce même son dans la phase d'acquisition : $E_1 \Rightarrow R_1$, $E_2 \Rightarrow R_2$. Pour le groupe incompatible, la correspondance est inversée : $E_1 \Rightarrow R_2$, $E_2 \Rightarrow R_1$. L'analyse des résultats révèle une meilleure performance pour le groupe dans la condition compatible que pour le groupe dans la condition incompatible : les temps de réponse sont plus rapides lorsque le son entendu en amorce correspond à la réponse congruente. Dans la condition incompatible de la phase test, les auteurs présument que le mouvement du participant est ralenti à cause de l'anticipation de l'effet incompatible, contrairement à la condition compatible où l'anticipation de l'effet avantage le mouvement. Les auteurs concluent qu'une association action-effet automatique a été mis en place durant la phase d'acquisition (« automatic acquisition of action-effect knowledge »). Les résultats obtenus en phase test soulignent l'impact de cette association sur le contrôle de l'action (qui est impacté par l'anticipation de l'effet).

On remarque ici qu'un parallèle peut être établi entre l'établissement automatique de l'association bidirectionnelle entre les mouvements et leurs effets (le couplage sensorimoteur) et le phénomène observé lors du processus d'attribution distale dans la substitution sensorielle : les utilisateurs apprennent à « voir » le monde avec l'appareil en intégrant tout d'abord le lien entre leurs mouvements et leurs effets sensoriels – comme nous l'avons vu

avec les théories sensorimotrices. Le résultat de ce couplage (la seconde phase du modèle) peut être compris comme l'émergence d'une perception distale.

1.1.2.3. Distinguer l'effet du stimulus : Kunde (2001)

Kunde (2001, p.387) remarque qu'ainsi formulée et testée, l'association bidirectionnelle idéomotrice n'est pas suffisante pour affirmer que l'action est contrôlée par l'image anticipatoire de ses effets. En effet, l'expérience d'Elsner et Hommel (2001) ne prouve pas que la réponse dans la seconde phase est sélectionnée plus rapidement dans la condition compatible que dans la condition incompatible par anticipation de ses effets sensoriels, dans la mesure où la réponse dans la phase test est toujours sélectionnée en réponse à un stimulus. Autrement dit, puisque l'effet est utilisé comme stimulus, l'action est possiblement avantageée par la simple association préalablement acquise et non par anticipation d'un effet sensoriel particulier. Kunde propose donc un paradigme permettant de montrer que l'action est sélectionnée par la simulation mentale de l'effet espéré, indépendamment de sa présentation en termes de stimulus : la procédure de « compatibilité réponse-effet ». Dans son expérience (Kunde, 2001, expérience 1) Kunde compare un groupe pour lequel la correspondance réponse-effet est compatible à un groupe pour lequel elle ne correspond pas. Les sujets ont pour tâche d'appuyer sur quatre touches de réponse horizontalement alignées en réponse à des stimuli de couleurs – une touche par couleur. Chaque touche appuyée a pour effet d'allumer l'une des quatre lampes horizontalement alignées sur l'écran en face du sujet. Dans la condition compatible, la localisation de la réponse du sujet correspond à la localisation de son effet visuel : par exemple, si la touche pressée est celle à l'extrême gauche, la lampe s'allume à l'extrême gauche sur l'écran. Pour la condition incompatible, les localisations ne correspondent pas (Cf. Figure 23).

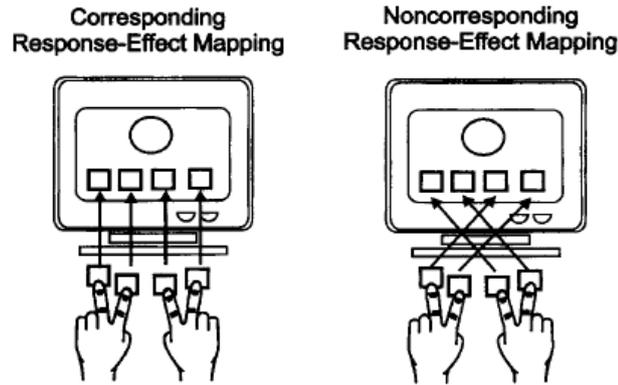


Figure 23 : Correspondance compatible vs incompatible de l'expérience 1 de Kunde (2001).

Bien que l'effet n'apparaisse qu'après la réponse, l'analyse des résultats montre que les sujets effectuent leurs actions plus rapidement et plus précisément en condition compatible qu'en condition incompatible, et ce seulement après quelques essais. En conséquent, l'expérience de Kunde permet de conclure qu'une action peut véritablement être sélectionnée par l'anticipation de ses effets sensoriels. Notons que dans cette expérience, Kunde s'appuie en fait sur des associations idéomotrices déjà existantes. La première phase d'acquisition des correspondances R-E, expérimentalement établie dans le cas d'Elsner et Hommel, a déjà été mise en place par le développement ontogénétique de l'individu dans le cas de Kunde : l'individu a déjà intégré l'expérience qu'une action située à gauche est plus probablement encline à provoquer des effets visibles à gauche.

Pour résumer et reprendre les propos de Badets (2015, p.591), selon la théorie idéomotrice une action est principalement représentée par les conséquences perceptives qu'elle est encline d'engendrer dans l'environnement. Par exemple, la volonté de couper une tomate induit la représentation de l'action à effectuer basée sur la tomate coupée (le résultat de l'action) plutôt que sur le mouvement de coupe (l'action elle-même).

1.1.3. La théorie du codage des évènements (Theory of Event Coding : TEC) : version moderne des théories idéomotrices

La version dominante des théories idéomotrices est aujourd'hui la théorie du « codage des évènements », TEC (Theory of Event Coding)³⁹. Elle est introduite par Hommel, Müsseler, Aschersleben, et Prinz en 2001 dans un article qui, de manière intéressante, précède

³⁹ Nous reprenons ici la traduction de Badets (2015, p.597)

directement dans la même revue scientifique celui d'O'Regan et Noë (2001) présentant la théorie sensorimotrice. TEC est basée sur la notion centrale que la perception, l'attention, l'intention et l'action partagent ou opèrent à partir d'un domaine représentationnel commun : *“TEC is based on the central notion that perception, attention, intention, and action share, or operate on, a common representational domain.”* (Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001, p.859). L'intérêt de la TEC pour l'application des théories idéomotrices à la substitution sensorielle est qu'elle mentionne la perception. En effet, le but avoué de TEC est de proposer « un nouveau cadre pour la perception et la planification de l'action » (*“a new framework for perception and action planning”*, Hommel et al., 2001, p.849) investiguant de quelle manière perception et action interagissent. La théorie du codage des événements adopte le mécanisme idéomoteur de Greenwald (1970), James (1890) et Lotze (1852) selon lequel le contrôle de l'action est anticipatoire, c'est-à-dire contrôlé par les représentations des effets de l'action attendus. Elle intègre en plus la perspective générale de Dewey (1896) et Gibson (1979) selon laquelle la perception et l'action sont liées fonctionnellement et seule leur coordination permet un comportement adaptatif ; ainsi que les études d'Allport (1987) et Singer (1994) suggérant que les représentations des contenus perceptifs et des plans d'action sont stockées de manière distribuée selon des codes particuliers (Hommel et al., 2001, p.849).

L'idée phare de la théorie du codage des événements est que les représentations des stimuli propres à la perception et les représentations des actions propres à la planification des mouvements partagent un code commun abstrait. Chaque code concerne un événement (« event code ») qui consiste en différents codes représentant les caractéristiques de l'évènement (« feature codes »). Il est important de noter le fait que ces codes sont définis comme abstraits. Ils représentent certes des caractéristiques d'évènements incarnés et concrets au niveau cognitif, mais pour TEC cela signifie qu'ils réfèrent au contenu distal plutôt que proximal : le système de codage de TEC ne concerne pas les ressentis proximaux mais traite la perception comme déjà-distale. Par exemple, l'évènement perceptif consistant en l'objet « cerise » provoque entre autres l'activation des codes abstraits « rouge », « round », « petit », ainsi que les codes abstraits correspondant aux actions d'attraper la cerise, de la manipuler, de la mâcher, etc. Ces codes sont structurés de manière hiérarchique afin de faciliter leur récupération. Par exemple, pour l'objet cerise le code « lancer » sera structurellement moins important que le code « attraper » ou « mâcher ». Enfin, un mécanisme d'intégration lie les codes entre eux pour former la perception de l'objet et l'action à mener sur ou avec lui (Cf. Figure 24). La mise en place de ce mécanisme d'intégration est semblable à celui présenté par

Elsner et Hommel (2001) : une phase d'acquisition où un même mouvement est associé aux mêmes effets sensoriels jusqu'à intégration et création de codes communs, et une seconde phase où tout déclenchement du mouvement ou de l'effet entraîne l'activation des codes communs – qui activent alors le mouvement *et* ses effets.

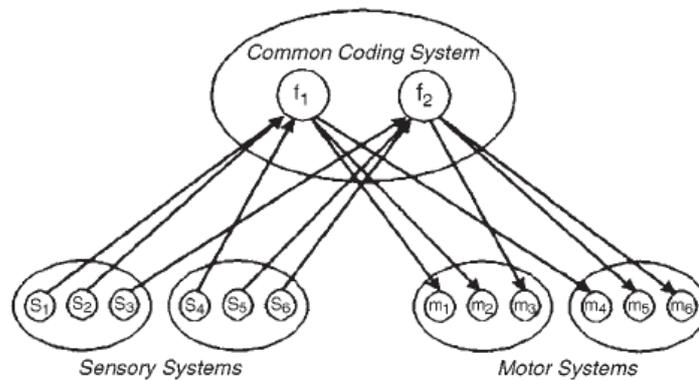


Figure 1. Feature coding according to TEC. In the example, sensory information coming from two different sensory systems (s_1, s_2, s_3 , and s_4, s_5, s_6 , respectively) converges onto two abstract feature codes (f_1 and f_2) in a common-coding system, which again spread their activation to codes belonging to two different motor systems (m_1, m_2, m_3 , and m_4, m_5, m_6 , respectively). Sensory and motor codes refer to proximal information, feature codes in the common-coding system refer to distal information.

Figure 24 : schéma de la TEC par Hommel (2001, p.862)

La planification de la perception et la planification de l'action sont ainsi définies comme fonctionnellement équivalentes, dans la mesure où elles sont simplement des manières alternatives de faire la même chose : représenter des événements externes de façon interne.

Perceiving and action planning are functionally equivalent, inasmuch as they are merely alternative ways of doing the same thing: internally representing external events (Hommel et al., 2001, p.860)

Selon Shin et al.(2010) les hypothèses phares de TEC sont :

- (a) *Perceived and to-be-produced events are represented in a common domain;*
- (b) *Actions are represented in a similar distributed fashion as perception;*
- (c) *The codes referring to the event are part of an abstract and contents-driven distal description rather than a proximal reference of the events;*
- (d) *Event codes are integrated and activated by two-stage procedures; and*

(e) *Event codes are structured with several hierarchical levels.* (Schin et al., 2010, p.946)

TEC se définit comme un cadre théorique large faisant partie des théories de la cognition incarnée et située en ce qu'elle s'inspire du postulat de Gibson voulant que perception et action soient en interaction. Nous émettons des réserves quant à ce rapprochement. La fonctionnalité interactive entre perception et action et l'idée de code commun exclut de fait une possible équivalence entre perception et action sur un plan structurel ; il s'agirait donc au mieux d'une version non radicale de la cognition incarnée et située. Cependant, même au niveau fonctionnel l'interaction n'est définie qu'indirectement, *via* les codes communs. Hommel et al. (2001) définissent à ce propos la portée de la théorie du code commun comme limitée dans son étendue dans les domaines de la perception et de l'action. Son champ d'étude porte selon lui sur les « produits cognitifs finis » des processus perceptifs (« *late cognitive products* ») en opposition aux processus sensoriels initiaux (« *early sensory processes* »). Autrement dit, la TEC s'intéresse aux objets de la perception déjà construits et non aux processus sensoriels qui les ont initiés : elle s'intéresse à la perception distale et non aux sensations proximales. Quant à l'action, la TEC focalise son intérêt sur les processus cognitifs antécédents initiaux (« *early cognitive antecedents of action* ») qui concernent la motivation, la planification et la programmation de l'action, en opposition aux processus en jeu dans la réalisation de ces actions – comme le contrôle et la coordination des mouvements.

Though TEC is meant to provide a new framework for perception and action planning, its scope is limited in the following sense: As regards perception, its focus is on “late” cognitive products of perceptual processing that stand for, or represent, certain features of actual events in the environment. TEC does not consider the complex machinery of the “early” sensory processes that lead to them. Conversely, as regards action, the focus is on “early” cognitive antecedents of action that stand for, or represent, certain features of events that are to be generated in the environment (= actions). TEC does not consider the complex machinery of the “late” motor processes that subserve their realization (i.e., the control and coordination of movements). Thus, TEC is meant to provide a framework for understanding linkages between (late) perception and (early) action, or action planning. (Hommel et al., 2001, p.899)

Cette segmentation hiérarchique des processus perceptifs et moteurs, où perception et action ne sont « reliées » que par des codes communs abstraits, est incompatible avec une approche de la cognition incarnée et située : même dans ses versions les moins radicales, celle-ci postule une interaction *directe* entre perception et action.

Il sera donc important de distinguer le versant de TEC du versant des théories idéomotrices en accord avec l'approche intégrée de James. La principale différence que nous relevons ici concerne le statut de l'association bidirectionnelle mouvements-effets : dans la version TEC, cette association est définie par des codes communs abstraits, tandis que pour l'approche jamesienne cette association est profondément incarnée dans le corps, se définissant donc à un niveau physiologique. Pour cette raison, seule cette dernière approche est en accord avec les théories sensorimotrices.

1.2. Un mécanisme d'attribution distale ? Les deux phases du mécanisme idéomoteur dans la substitution sensorielle

Comment le mécanisme idéomoteur s'applique-t-il à la substitution sensorielle ? Un parallèle évident peut être établi entre la première phase de mise en place du mécanisme idéomoteur, où des mouvements aléatoires sont associés à des effets, et l'apprentissage des appareils de substitution sensorielle. Comme nous l'avons mentionné, le mécanisme idéomoteur concerne tout apprentissage et Elsner et Hommel (2001) citent notamment la familiarisation avec un appareil électronique – qui correspond parfaitement à la substitution sensorielle. Autrement dit, le mécanisme idéomoteur concerne toute expérience impliquant des mouvements non habituels, réalisés pour les premières fois. Lors des premières heures de familiarisation avec l'appareil l'utilisateur bouge la caméra aléatoirement, de manière non assuré. Il découvre un nouvel environnement en tâtonnant, en explorant. Tous les mouvements sont suivis d'effets sensoriels, qui consistent en des retours proprioceptifs et en des retours sensoriels délivrés par l'appareil et propres au sens servant de substitution. Par exemple, l'utilisateur de The vOICe entend des structures sonores particulières en fonction des mouvements qu'il produit avec la caméra, celui du TVSS reçoit des patterns de stimulation tactile particuliers. Or, pour un même objet, les mêmes mouvements provoquent les mêmes effets. Plus précisément, pour un même point détecté par la caméra correspondant

à un objet dans l'espace, un même mouvement a les mêmes effets. On peut donc supposer qu'au cours du temps d'apprentissage nécessaire au sujet pour maîtriser l'appareil, les effets s'associent aux mouvements qui les ont provoqués. Les théories idéomotrices nous apprennent que ce lien finit par former une association bidirectionnelle.

La différence entre un apprentissage reposant sur une perception « normale » et celui reposant sur la substitution sensorielle est simplement que dans le cas des appareils de substitution sensorielle, la régularité du lien entre mouvements et effets est médiatisé par l'appareil tandis que dans le cas d'une perception « normale » cette régularité est directement établie par les systèmes sensoriels. Nous avons vu que du point de vue phénoménal et subjectif, cette médiation semble avoir un impact sur l'appréciation des appareils par les sujets non-voyants, qui refusent d'utiliser ces appareils. En revanche, leur succès technique révèle qu'en ce qui concerne l'établissement d'un lien bidirectionnel mouvements-effets, la médiation ne semble pas faire de différence. Les effets des mouvements sont reçus par les appareils de substitution sensorielle et délivrés aux systèmes sensoriels de la même manière que les rayons lumineux de l'environnement sont reçus par des lunettes avant d'être délivrés à la rétine.

La question qui se pose alors concerne la seconde phase du mécanisme idéomoteur. Les théories idéomotrices définissent cette phase du point de vue de l'action : toute action exécutée a posteriori de la mise en place du mécanisme idéomoteur est programmée par anticipation de ses effets sensoriels. Le focus étant sur le contrôle de l'action, sont laissés de côté les conséquences potentielles du mécanisme idéomoteur sur la perception du stimulus et des effets⁴⁰. Qu'en est-il alors de l'influence de ce mécanisme sur la perception de ces éléments ? Suivant le focus sur l'action, on peut supposer que les mouvements effectués avec l'appareil de substitution sensorielle, une fois sa maîtrise acquise, sont contrôlés et planifiés par anticipation des effets sensoriels reçus : les mouvements sont dirigés vers l'environnement en fonction des effets sensoriels attendus. Or, dans la substitution sensorielle les effets reçus des mouvements correspondent exactement aux stimuli externes à percevoir – c'est ce que révèlent les rapports des sujets lorsqu'ils racontent « oublier » l'appareil et les sensations qu'il délivre pour « percevoir » des objets dans l'espace. Il s'agit de la caractéristique particulière de la perception distale acquise avec ces appareils lorsqu'ils fonctionnent. Ce phénomène nous amène à considérer la seconde phase du mécanisme idéomoteur sous un autre angle. En

⁴⁰ A l'exception de quelques études s'intéressant à l'impact du mécanisme idéomoteur sur la perception des stimuli qui initient l'action, qui seront mentionnées plus loin.

effet, les théories idéomotrices étant principalement focalisées sur l'impact de l'association bidirectionnelle sur le contrôle de l'action, elles ne s'intéressent que trop peu à son impact sur la perception. Or, la substitution sensorielle révèle que dans son cas, un impact de l'association bidirectionnelle est la spatialisation de la perception. Ceci nous invite alors à tourner notre intérêt sur un aspect de l'association bidirectionnelle peu considérée par les théories idéomotrices : la perception des effets des actions par l'individu.

1.3. Le statut de l'effet et de sa perception : espace et événements distaux

Nous allons maintenant nous intéresser au contenu et à la perception des effets de l'action dans les théories idéomotrices. Etant principalement focalisées sur le contrôle de l'action, celles-ci donnent peu d'indices concernant ces phénomènes. En effet, du point de vue de l'action, ce qui compte est que n'importe quel effet puisse être associé aux mouvements et influencer l'action ; l'effet n'est source d'intérêt qu'en ce que ses propriétés se retrouvent intégrées à l'action. Ceci ne permet qu'une définition vague de ce qu'est véritablement un effet et laisse complètement de côté la question de la perception de cet effet. D'après Stock et Stock (2004) cette question fait partie des défis à relever par les théories idéomotrices : *“Further question concerns the contents of the ideas that instigate the motor activity. [...] Basically all representatives of the ideo-motor hypothesis expressed themselves rather unspecifically on the contents of the idea of a movement.”* (Stock et Stock, 2004, p.186)

Quant à la perception des stimuli, si Stock et Stock ne mentionnent pas la question directement ils soulignent que les théories idéomotrices, de par leur insistance quasi-exclusive sur le lien réponse-effet, omettent le rôle des « conditions situationnelles » – soit des stimuli perçus dans l'environnement. Ainsi, de même qu'il avait été reproché aux behavioristes de ne pas considérer les conséquences de l'action, les théories idéomotrices ont pour défaut de ne pas considérer ce qui sert d'enclenchement au mouvement.

It should be discussed that all of the representatives of the ideo-motor hypothesis mentioned here disregarded the role of situational conditions in human actions. On the one hand, behaviorism was justly blamed for ascribing – in the triad of stimulus, response, and effect – too much importance to the relationship between stimulus and

response. On the other hand, and with the same authority, the representatives of ideomotor action could be justly blamed for focusing too much on the connection between response and effect. (Stock et Stock, 2004, p.187)

De fait, seule TEC permet d'apporter des éléments de réponse à cette question. Le concept clé de code commun à l'action et à la perception implique en effet d'investiguer précisément ce qui est commun et donc de s'intéresser de plus près au contenu des deux entités.

1.3.1. *Avantage des évènements distaux sur les évènements proximaux*

Les théories idéomotrices présument que les actions sont codées en termes de leurs effets perçus. Mais hors du contexte expérimental de laboratoire, chaque action a de nombreux effets, laissant ouverte la question de savoir lesquels se retrouvent associés à l'action et comment. Notamment, les effets des actions comprennent les retours proprioceptifs du mouvement ainsi que les retours que donnerait l'environnement *via* les systèmes sensoriels.

TEC fait la distinction entre évènements distaux et évènements proximaux. Reprenant la terminologie de Heider (1926 ; 1930) et Brunswik (1944), Hommel (2009) fait référence à quatre niveaux de traitement perceptifs. Le niveau de traitement distal (D) renvoie aux objets, aux individus et aux évènements dans notre environnement qui sont pertinents pour l'existence. Le niveau proximal (V) réfère à l'information physique concernant ces choses qui frappe nos organes sensoriels. Ces deux niveaux concernent donc les représentations externes du monde, puisque dans les deux cas le monde extérieur est la source de perception. Les deux niveaux suivants réfèrent aux représentations internes qui correspondent à ces représentations externes. D' est l'expérience vécue de la chose externe et V' le corrélât physiologique direct de V – tels que les patterns neuraux reliés aux organes sensoriels évoqués. Le problème est alors de comprendre la relation entre D et V sachant que celle-ci n'est pas invariante (comme le montre la substitution sensorielle). « V n'est pas une copie valide et complète de D mais fournit seulement des indices concernant les choses définies par D » (*"V is not a valid and complete copy of D but only provides cues about the things defined at D"* Hommel, 2009, p.515). Ceci renvoie une fois de plus à notre question initiale concernant le passage d'un monde intérieur inconnu à un monde extérieur connu. TEC remarque que dans la perception, un évènement extérieur distal peut être représenté par plusieurs sens, rendant de fait D plus

complexe que V. Comme dans la substitution sensorielle, « les limitations propres à une modalité sensorielle peuvent être compensées en considérant les informations fournies par une autre modalité, et les caractéristiques des codes (*feature codes*) qui intègrent cette information ». (*“Limitations of one modality can be compensated by considering information from another modality, and it is feature codes that integrate this information”*, Hommel et al., 2001, p.861)

TEC fait l’hypothèse que l’interaction entre la perception et l’action a lieu au niveau des représentations distales des événements perçus et générés – l’interaction se joue entre les représentations des caractéristiques du stimulus et des caractéristiques de l’action telles qu’elles apparaissent dans le monde extérieur. Pour cette raison, TEC se focalise uniquement sur les représentations distales.

Proximal internal representations of perceived and produced events (early sensory and motor patterns that is, irrespective of modality and content) are not closely related to their central representations and to each other, so that it is difficult to believe that feature-based interactions between perception and action occur on these levels. More plausible is the assumption that such interactions take place between the distal representations of perceived and produced events, that is, between the representations of stimulus and action features as they appear in the external world. This is why TEC focuses on distal but not proximal internal representations. (Ibid.)

Il semblerait alors que TEC ne puisse pas expliquer la transition entre représentations proximales et distales : *“Given the distal focus of TEC the theory does not address, and cannot explain, how the transition is made between proximal and distal representations”* (Ibid.). La conséquence de cette distinction entre différents niveaux de traitement de la perception pour TEC est qu’elle définit son concept central de « code événementiel » (event code) comme « des codes qui représentent les caractéristiques distales d’un événement » (*“codes that represent the distal features of an event”*, Hommel et al. 2001, p.561).

D’un point de vue expérimental, TEC étaye cette distinction entre événements distaux et proximaux en comparant l’impact d’informations distales à celui d’informations proximales – montrant que seules les premières ont un impact sur la perception et l’action. Ces expériences mettent en jeu plusieurs codes d’actions (puisque ceux-ci doivent pouvoir distinguer entre informations distales et proximales). Elles reposent sur des tâches de compatibilité spatiale

Stimulus-Réponse classiques, où sont distingués effets proximaux et distaux (voir Hommel, 2001). A l'origine, ces tâches ne s'inscrivent pas dans les théories idéomotrices. Elles visent à démontrer qu'un « mapping » compatible de l'espace de réponse avec l'espace du stimulus entraîne de meilleures performances qu'un « mapping » incompatible. Le fameux « effet Simon » (Simon & Wolf, 1963) montre ainsi que des stimuli présentés à gauche de l'écran entraînent des réponses plus rapides avec une touche à gauche du clavier qu'à droite, tandis que des stimuli à droite facilitent les réponses exécutées avec le bouton de droite – cela même si les positions des stimuli ne sont pas pertinentes pour la tâche à accomplir. La question pour TEC est alors de déterminer si ce phénomène est dû à des aspects proximaux ou distaux : est-ce la compatibilité des retours proprioceptifs de la main de réponse avec la position du stimulus (aspect proximal) ou bien la compatibilité de retours visuels et auditifs du côté de la touche de réponse avec la position du stimulus (aspect distal) qui établit la compatibilité ? Dans les tâches de Simon et al. (1970) et de Wallace (1971 ; 1972), par exemple, la variable de mapping (compatible ou incompatible) est couplée avec une variable de position des mains : les sujets doivent réaliser la tâche avec leurs mains croisées sur les touches de réponse. Or, cette variation ne change pas les résultats : le fait de faire varier la position des mains n'a pas d'impact sur la variable de mapping ; la condition compatible a toujours l'avantage sur la condition incompatible, sans variation de la taille de l'effet. Hommel et al. (2001) concluent que « les actions consistant à appuyer sur les touches de réponses n'étaient pas codées en termes de l'effecteur opérationnel, mais au regard de la localisation où elles agissaient. » (*“the keypressing actions in these studies were obviously not coded in terms of the operative effector, but with regard to the location where it performed”*, p.868). Pfister et Kunde (2013) montrent également une absence d'effet des mains croisées similaire dans le cadre d'un paradigme de compatibilité réponse-effet (Kunde, 2001), soutenant la prévalence des caractéristiques de localisation spatiale sur les caractéristiques anatomiques. Dans d'autres expériences, Guiard (1983) et Michaels et Stins (1997) demandent à des sujets de faire tourner un volant vers la gauche ou vers la droite en fonction de la fréquence (aiguë ou grave) de stimuli sonores. Ces stimuli sonores pouvaient être présentés à gauche ou à droite des participants. En accord avec une tâche de compatibilité spatiale classique, les auteurs observent des temps de réponses plus rapides lorsque le son annonçant le sens dans lequel le volant doit être tourné est du même côté de la réponse à accomplir que quand les localisations ne correspondent pas. Or, ces résultats sont indépendants de la position des mains sur le volant et de la direction dans laquelle elles devaient être déplacées pour faire tourner ce volant. Selon Hommel et al. (2001, p.869), « c'était la correspondance entre le stimulus et

l'intention de rotation du volant qui déterminait la direction de l'effet, ce qui fournit un support additionnel à l'hypothèse selon laquelle les actions sont codées en termes de leurs caractéristiques distales » (*“Obviously, it was the correspondence between stimulus and intended wheel rotation that determined the effect's direction, which provides additional support for the assumption that actions are coded in terms of their distal features”*, Hommel et al., 2001, p.869).

Cette discrimination des codes communs à la perception et à l'action à un niveau distal implique également que ce code commun soit abstrait.

Distance, size, and location of stimulus and response only match with regard to a distal description of the environmental layout, but not in terms of the particular neural codes or activation patterns by which it is represented. In fact, there is no way in which the sensory code representing a particular spatial distance would be similar to the muscular innervation pattern driving the hand over the same distance, suggesting that a match or mismatch between stimulus- and action-related codes can only be assumed on a more abstract distal-coding level, and it is this level our approach is referring to. (Hommel et al., 2001, p.861)

1.3.2. Événements distaux et proximaux dans la substitution sensorielle

Comment cette distinction entre événements distaux et proximaux s'applique-t-elle à la substitution sensorielle ? Les différents niveaux perceptifs précédemment mentionnés peuvent être assimilés à la substitution sensorielle de la manière suivante : Le niveau de traitement distal D correspondrait à la perception de l'événement du monde extérieur (la perception distale, acquise au terme de l'attribution distale), le niveau proximal V aux stimulations reçues *via* l'appareil (sons, impulsions tactiles), D' désignerait l'expérience de la perception distale vécue avec l'appareil⁴¹ et V' les processus de traitement des informations reçues par les organes sensoriels *via* l'appareil. Dire que perception et action partagent des codes communs distaux et abstraits suggère la prévalence pour l'émergence de la perception distale des informations faisant référence à l'environnement. Par exemple, pour The vOICE, ce qui importe dans le pattern d'effets que reçoit l'utilisateur en conséquence de ses mouvements seraient les indications spatiales contenues dans le son. Ceci minimiserait alors

⁴¹ Ce niveau pourrait correspondre à la « conscience visuelle » d'O'Regan et Noë précédemment évoquée.

l'importance des retours proprioceptifs – ce qui est en contradiction avec les conclusions des théories sensorimotrices.

Cette prévalence des effets distaux a été étudiée par Sutter, Sülzenbrück, Rieger, et Müsseler (2013) dans le contexte de l'utilisation d'objets techniques qui scindent l'exécution des mouvements de leur observation. Par exemple, les mouvements effectués avec une souris d'ordinateur ont des effets sensoriels proximaux – proprioceptifs et tactiles – différents des effets visuels distaux observés sur l'écran de l'ordinateur. Cette dichotomie s'applique également à la substitution sensorielle où les effets proximaux des mouvements (sensations auditives ou tactiles) sont distingués des objets à percevoir dans l'espace. Selon les auteurs, tous les mouvements effectués avec ce type d'objets sont traités par deux boucles de rétroaction qui représentent ces deux types d'effets. Les effets proximaux seraient délivrés par le corps tandis que les effets distaux viendraient de l'outil (cf. Figure 25).

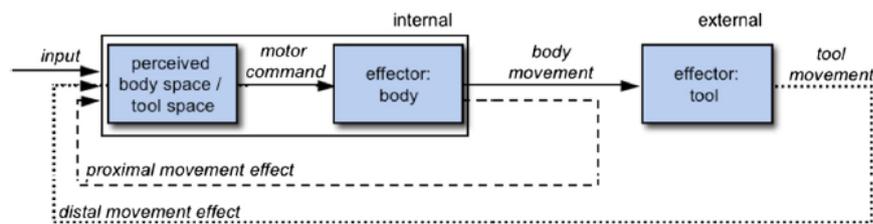


Fig. 1. Tool use requires coordination between proximal movement effects (proprioceptive/tactile feedback from the moving hand) and distal movement effects (visually display movements of the cursor or the tip of the tool).

Figure 25 : Représentation des deux boucles de rétroaction (Sutter et al., 2013)

Selon Sutter et al., la discordance entre ces deux boucles dans le cas de l'utilisation d'outils serait source constante d'interférences pour le contrôle des actions si elles étaient traitées de manière égale. C'est pourquoi les auteurs font l'hypothèse que le système de traitement d'informations de l'individu « favorise l'information d'une des deux boucles de rétroaction et atténue ou ignore les informations provenant de l'autre ».

If information from the proximal and distal feedback loops were equally important for controlling actions, any discrepancy between them would be a constant source of interference. The human information processing system solves this problem by favoring information from one feedback loop while attenuating or ignoring information from the other. (Sutter et al, 2013, p.249)

La boucle avantagée serait pour eux celle de l'information distale. Les auteurs testent leur hypothèse en faisant varier l'amplitude du déplacement du curseur sur un écran par rapport aux mouvements effectués sur une tablette numérique – qui sont occultés. La tâche des sujets est de déplacer un curseur visible sur l'écran d'une boîte à une autre sur un axe horizontal, par leurs mouvements sur la tablette numérique (cf. Figure 26). L'amplitude des mouvements de la main sur la tablette est constante, mais l'amplitude du curseur apparaissant à l'écran varie, de deux à quatre fois plus longue que celle de la main. Cette situation est comparée à une condition contrôle où les amplitudes restent les mêmes.

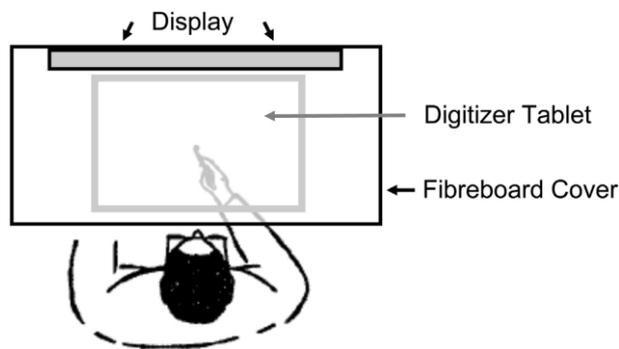


Figure 26 : Installation expérimentale (Sutter et al. 2013)

Les résultats montrent que l'augmentation de l'amplitude du curseur implique une augmentation du temps de mouvement – alors que les participants effectuent les mêmes mouvements de la main tout au long de l'expérience. De plus, l'évaluation a posteriori des participants de leurs mouvements de main (dans une tâche d'ajustement visuel) révèle que les sujets donnent des estimations précises de l'amplitude de leur main lorsque la main et le curseur avaient la même amplitude, mais que ces estimations deviennent biaisées dès que ces deux amplitudes ne correspondent plus. Dans ce dernier cas, les estimations des sujets de l'amplitude de leur main augmentent et correspondent au retour visuel de l'amplitude du curseur. Seule lorsque la différence d'amplitude est très élevée (l'amplitude du curseur dépassant de quatre fois la longueur de celle de la main) les sujets prennent conscience de la différence. Dans ce cas, les estimations ne correspondent ni à l'amplitude de la main ni à celle du curseur mais se fixent entre les deux. Les auteurs concluent que les effets distaux de l'action sont prédominants dans la détermination du comportement moteur lorsqu'il s'agit d'utiliser des objets. De plus, ils inscrivent leurs observations en correspondance avec le principe idéomoteur dans la mesure où l'action semble être contrôlée par ses conséquences attendues (le déplacement du curseur à l'écran).

Comment faire le parallèle entre ces résultats et ce qui est observé dans la substitution sensorielle ? Que signifie l'avantage d'évènements « distaux » pour l'attribution distale ? A première vue, il semblerait que les résultats obtenus avec des médiations d'appareil technique sur la réalisation de l'action sont en contradiction avec ce que suggèrent les théories sensorimotrices et Poincaré. L'avantage des effets distaux signifierait en effet (1) l'aspect non incarné mais abstrait de l'information nécessaire à l'attribution distale, puisque l'impact de l'association bidirectionnelle action-effets ne mettrait la perception et l'action en relation que *via* des codes communs distaux et abstraits. Cela suggère alors que l'attribution distale repose *in fine* sur les lois de transformation qui lient les images enregistrées par la caméra et les effets sonores ou tactiles. La distalité de la perception émergerait dans ce cas de la distalité des objets de l'environnement ; en effet elle ne peut émerger des effets sensoriels eux-mêmes comme l'a montré Lenay avec son dispositif minimaliste. Mais dans ce cas, on peut se demander quel est le « code commun » partagé entre les mouvements effectués avec la caméra et les effets « distaux » reçus (puisque ceux-ci ne sont pas spatialisés dans les dispositifs minimalistes et permettent néanmoins une perception distale). (2) La prévalence des évènements distaux sur les évènements proximaux a pour conséquence de reléguer les retours proprioceptifs au simple rang d'épiphénomène, sans fonction dans la construction de l'espace. Ceci est en directe contradiction avec la théorie de Poincaré évoquée par les approches sensorimotrices, qui alloue à la proprioception un rôle central dans la construction de l'espace perceptif.

Comment concilier les théories sensorimotrices avec les théories idéomotrices ? D'un côté, il semble manquer aux théories sensorimotrices le lien entre contingences sensorimotrices et perception distale. D'un autre côté, les théories idéomotrices se sont focalisées sur le rôle de l'action et ne fournissent pas une approche intégrée et complète du contenu des effets des mouvements et de la perception. Seule la TEC fournit des éléments de réponse, mais ceux-ci ne permettent pas de compléter le fossé entre les sensations proximales reçues par les dispositifs *via* les mouvements et la perception distale.

2. Représenter les théories idéomotrices

Si la perception distale semble bien relever d'un mécanisme idéomoteur, celui-ci reste à préciser. Comme nous l'avons constaté, les théories idéomotrices focalisent leur objet d'étude sur le contrôle de l'action : les effets des actions sont notamment considérés quasi exclusivement en termes d'images anticipatoires. L'introduction d'Hommel (1998) révèle bien ce focus (les références à l'action sont en italique) :

The present contribution deals with the relationship between perception and action or, more precisely, with *how the perception of action affects action control*. Action effects [...] represent the ultimate *reason for why we carry out actions* at all. This means that *some anticipation of action effects must be available to, and used by, an actor in the course of selecting, initiating, and performing an action*. In other words, representations or codes of action effects should play a crucial role *in the control of action*. (Hommel, 1998, p.143)

Afin de combler le fossé entre le mécanisme idéomoteur en jeu dans la substitution sensorielle et la perception distale, nous proposons de tourner notre intérêt vers les conséquences de l'association bidirectionnelle idéomotrice mouvement-effet sur la perception, ainsi que sur le contenu des effets des mouvements. A ce propos, nous distinguons la vision hiérarchique et cognitiviste de TEC des approches idéomotrices plus anciennes inscrites dans la théorie de James.

2.1. Distinguer sensation et perception dans le mécanisme idéomoteur

Nous émettons des réserves quant à la distinction entre effets proximaux et distaux défendue par la TEC. Tout d'abord, la définition d'évènements communs à la perception et à l'action en termes d'évènements distaux abstraits rappelle l'interprétation par Siegle et Warren (2010) de la loi de triangulation en tant qu'invariant sensorimoteur abstrait. Comme nous l'avons précédemment développé, l'invocation d'un niveau abstrait n'est pas satisfaisante pour répondre à la question de l'attribution distale. Suivant le même argument, la

restriction voulue par TEC de la perception aux processus cognitifs « tardifs » et de l'action aux processus « primitifs » a pour conséquence une partition des processus traitant de l'information en étapes fonctionnellement séparées – TEC s'intéresserait uniquement à des étapes spécifiques du processus. Cette focalisation sur la sélection de la réponse, le choix de la réponse, ou le passage du stimulus à la réponse fait de TEC un modèle sandwich tel que défini par Hurley, incompatible comme nous l'avons précédemment souligné avec une approche incarnée et située de la cognition. En effet, la segmentation des événements distaux et proximaux et la qualification des événements distaux comme abstraits est en accord avec un modèle classique cognitiviste de la vision et ne nous satisfait pas. Elle ne permet pas une approche intégrée de la perception et de l'action.

We see little difference in the distinction between early perception, late-perception/early action, and late action and the classical distinction between “perception, translating perception into action, and the controlling of action” (Welford 1976, p.3). Thus, Hommel et al. are no less guilty than anyone else of partitioning human information processing into functionally separable stages and restricting their investigations to a specific stage. (Proctor & Kim-Phuong, 2001.)

A perplexing issue concerns Hommel et al.'s addressing perception-action interdependence only in a sphere they term late perception and early action. Indeed, one wonders what “early” perception and “late” action are, not to mention what the “middle” constitutes. If perception and action are so tightly entwined, then why attempt to build a theory to consolidate this notion by parsing the circularity about which this coupling is formed? (Richardson & Spivey, 2001)

Cette séparation révèle en fait, selon nous, une confusion majeure des théories idéomotrices : elles ne font pas la distinction entre sensations et perception. En effet, pour les théories idéomotrices le contrôle de l'action est déterminé par la perception des effets de l'action, et cette perception fait référence à des informations distales. Le problème est que cette information « distale » – délivrée par l'environnement, les objets ou les outils – est aussi identifiée comme *sensations* visuelles et auditives, pour la raison que les informations visuelles et auditives feraient référence à des informations « spatialement éloignées » (puisque l'on voit et entend des caractéristiques distales de l'environnement) tandis que les informations tactiles ou proprioceptives feraient pour leur part référence à des informations « internes » (des informations sur la surface de la peau, ou dans les muscles). Dans leur étude,

Pfister, Janczyk, Gressmann, Fournier et Kunde (2014) se basent sur cette distinction et remarquent que les recherches qui s'intéressent au contrôle de l'action par un processus idéomoteur se basent surtout sur des effets visuels ou auditifs de l'action. Ces effets sont qualifiés comme porteurs d'informations distales dans la mesure où ils sont issus de l'environnement, des objets ou des outils (cf. Badets, 2015). D'après eux, peu d'études se sont intéressées aux conséquences proximales de l'action – définies comme des retours proprioceptifs et tactiles. Or, Pfister et al. (2014) montrent que l'anticipation d'actions qui causent des vibrations incompatibles retarde l'exécution du mouvement. Cette conclusion a récemment été confirmée et étendue par Thébault, Michallan, Derozier, Chabrier et Brouillet (2018). En somme, les informations « proximales » s'intègrent aussi à l'association idéomotrice bidirectionnelle et joue un rôle non marginal dans la sélection de l'action.

Ces données ne sont pas surprenantes lorsque l'on réalise que cette distinction entre informations proximales et distales délivrées par les systèmes sensoriels n'a pas de sens : toutes les sensations sont par définition proximales. Elles désignent la réaction des récepteurs sensoriels en réponse à une stimulation externe ou interne. Les sensations visuelles sont ainsi définies comme la stimulation des récepteurs visuels par des rayons lumineux et les sensations auditives comme la stimulation des récepteurs auditifs par des ondes sonores. Elles ont respectivement lieu dans les yeux et dans les oreilles. Par contraste, la perception désigne l'identification des objets et des caractéristiques présentes dans l'environnement, et par extension ce qui est « fait » (physiquement et cognitivement) avec ces objets. Nous l'avons largement développé en première partie de cette thèse : aucune information « distale » concernant l'environnement n'est contenue dans les sensations. L'information distale est délivrée par la perception. En conséquent, la véritable distinction qui se pose dans le cadre de la substitution sensorielle est celle entre les *conséquences sensorielles* de l'action et les *effets perceptifs* de l'action. C'est bien l'apport principal de la substitution sensorielle aux théories idéomotrices : les conséquences sensorielles proximales de l'action (les sensations) diffèrent de la perception distale des effets. Ainsi, l'information distale n'est pas portée par un canal sensoriel particulier (peu importe la provenance du signal) mais par la loi de contingence qu'il existe entre un mouvement et ses conséquences sensorielles.

Dans la substitution sensorielle, quand les utilisateurs parviennent après un temps d'apprentissage à « percevoir » le monde extérieur, ils s'appuient sur l'appareil délivrant des informations sensorielles. Ces informations sensorielles sont couplées avec les actions de

l'utilisateur et en viennent à être « oubliées » au profit de la perception distale. Autrement dit, l'identification d'objets et de leurs caractéristiques présents dans l'environnement (i.e. la perception de l'environnement) *est* en fait la perception des effets de l'action délivrés par l'appareil. Nous pouvons en conséquent faire une analogie entre la perception de l'environnement et la perception des effets de l'action. La conclusion que nous pouvons alors dresser à partir des théories idéomotrices au regard de la substitution sensorielle est que les mouvements et les conséquences sensorielles qui les accompagnent forment une association bidirectionnelle à partir de laquelle émerge une perception distale, qui correspond à la perception des effets.

Les données présentées dans la section précédente, illustrant une prédominance des conséquences sensorielles visuelles ou tactiles sur les conséquences proprioceptives, ne sont aucunement la preuve de la supériorité d'effets « distaux » sur des effets « proximaux ». Tout d'abord, les conséquences sensorielles visuelles et tactiles sont tout autant proximales que les conséquences proprioceptives liées au placement des mains. Secondement, les conséquences proprioceptives propres à un mouvement effectué avec les bras croisés ne sont pas exclusivement latéralisées du côté correspondant à la main. Par exemple, appuyer sur une touche située à gauche avec la main droite a bien des conséquences proprioceptives situées dans la main droite, mais ces conséquences se manifestent tout de même à gauche de l'espace du corps. Ainsi, si l'on considère l'ensemble des conséquences (tous proximales) qui s'ensuit de l'action consistant à appuyer sur une touche de réponse à gauche, même dans le cas où cette action est effectuée avec la main droite cet ensemble se manifeste bien à gauche du corps.

Pour finir, précisons que l'abandon de la distinction entre effets proximaux et distaux au profit de la distinction entre sensations et perception réconcilie TEC avec ses origines idéomotrices ancrées dans l'approche de James, qui veut que le mécanisme idéomoteur soit incarné à un niveau physiologique et non abstrait.

2.2. L'impact du mécanisme idéomoteur sur la perception

Shin et al. (2010) mentionnent que si le principe idéomoteur se base sur une association bidirectionnelle entre perception et action, alors les propriétés de l'action devraient aussi influencer la perception. Un modèle complet des théories idéomotrices doit également prendre en compte cette influence.

The ideomotor principle has given more attention to the phenomena for influence of perception on concurrent action planning or execution. [...] If the ideomotor principle assumes common representation of action and perception as well as a bidirectional influence between them, the model should also take into account how the properties of action impact perception. (Shin et al., 2010, p.965)

Un nombre restreint d'études dans le champ des théories idéomotrices se sont intéressées à cet impact de l'association bidirectionnelle sur la perception. Dans tous les cas, la perception y est définie comme perception des stimuli précédant et ayant provoqué l'action (voir Craighero, Fadiga, Rizzolatti, & Umiltà, 1999; Deubel & Schneider, 1996; Fagioli, Hommel, & Schubotz, 2007; Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; Humphreys & Riddoch, 2001; Müsseler & Hommel, 1997; Rizzolatti, Riggio, & Sheliga, 1994 ; Wykowska, Schubö, & Hommel, 2009 ; Kirsh & Kunde, 2014). Par exemple, Müsseler et Hommel (1997) ont montré que des participants soumis à un stimulus (S1) représentant une flèche indiquant le côté de la touche de réponse à presser (R1) sont rendus aveugles (R2) à un stimulus (S2) représentant une flèche indiquant le côté opposé si celle-ci est exposée durant la phase de préparation du mouvement associé à R1 (cf. Figure 27).

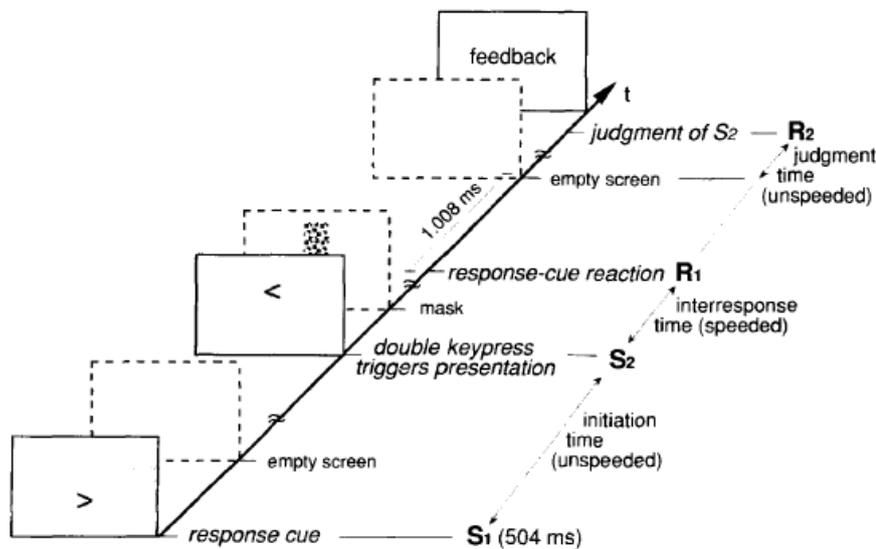


Figure 1. The series of events in the experiments: Subjects press both keys simultaneously before performing response R_1 cued by S_1 (here, the right key). While doing this, a masked stimulus S_2 is presented (an arrow or blank for an individually adjusted presentation time). The trial is completed with an unspeeded identification (Experiment 1) or a detection response (Experiments 2 and 3; R_2).

Figure 27 : schématisation de la série d'évènements d'un essai dans l'expérience de Müsseler et Hommel (1997, p.126)

De même, dans l'expérience de Kirsh et Kunde (2014) les participants recevaient un indice les informant de la direction d'un mouvement à effectuer. Ce mouvement consistait à déplacer une cible sur un écran d'un certain côté (droit ou gauche) selon un certain angle (15° ou 45°). Avant d'effectuer le mouvement, les participants avaient à juger de la position qu'aurait la cible après le mouvement (cf

Figure 28). Les auteurs montrent que la direction du mouvement planifié module la direction du stimulus perçu. Ainsi, les stimuli sont localisés comme plus à droite dans l'espace lorsqu'ils sont couplés à des mouvements vers la gauche que des mouvements vers la droite.

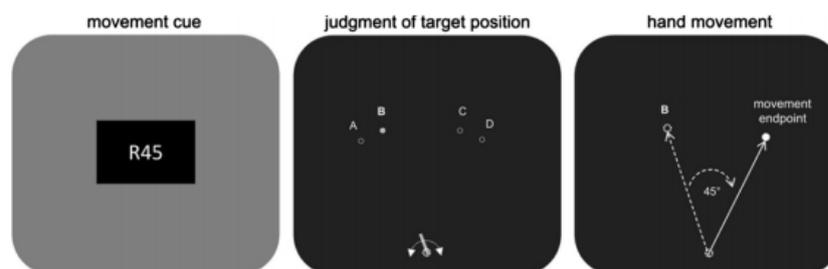


Fig. 1 Schematic illustration of the trial procedure. Note, *unfilled circles* shown in the *middle* are potential target positions, which were not visible in this example. During the hand movement only the virtual position of the stylus was presented in the form of a green point. The movement cue requires participants to prepare a movement that should deviate from a given target (B) to the right by 45°

Figure 28 : illustration schématique des essais dans Kirsh et Kunde (2014, p.708)

Ces deux expériences montrent qu'une relation R-E (précédemment acquise par l'expérience : un mouvement à gauche a des conséquences sensorielles à gauche de l'espace) a une influence sur la perception de stimuli S provoquant ou étant associé à R.

De manière générale, ces études montrent qu'une association entre un stimulus, une réponse et un effet influence la perception du stimulus en fonction de l'association R-E. Néanmoins, elles ne mentionnent pas ce qu'il en est de l'influence de R-E sur la perception de l'effet en tant qu'entité perceptive. Ce manque d'intérêt illustre bien la prévalence des théories idéomotrices pour les processus de sélection de l'action et non pour ceux de la perception – même dans ces études s'intéressant pourtant à la perception des stimuli. De plus, en s'intéressant aux stimuli du point de vue de la sélection de l'action, ces études laissent de côté la première phase du mécanisme idéomoteur. Cette phase est identifiée comme la mise en relation de « mouvements exploratoires » et de leurs conséquences sensorielles, dont le produit est l'association R-E. Ces mouvements exploratoires se retrouvent au commencement de tout apprentissage, y compris celui de la substitution sensorielle (voir Lenay, Canu, et Villon, 1997). Les études s'inscrivant dans la théorie idéomotrice ne s'intéressent à cette phase que, une fois de plus, du point de vue de la sélection de l'action. En effet, soit les expériences comparent comment des temps de réponses (donc R) varient en fonction de l'association R-E (Kunde, 2001), soit comment cette première phase impacte le contrôle de l'action une fois que la relation R-E est établie (Elsner & Hommel, 2001). Dans tous les cas E est toujours considéré comme un ensemble de *conséquences sensorielles* auquel s'associe R, mais n'est jamais compris comme un *construit perceptif* qui acquière ses propriétés spatiales à travers la relation créée entre des sensations et un mouvement durant la phase où se forme l'association bidirectionnelle R-E.

Ainsi, en faisant une distinction radicale entre *conséquences sensorielles* et *effets perceptifs* nous pensons que nous pouvons rendre compte de l'attribution distale dans le cadre des théories idéomotrices et que nous pouvons en cela établir un rapprochement théorique entre théories sensorimotrices de la perception et théories idéomotrices du contrôle de l'action.

3. Problématique et hypothèse

Fort de l'ensemble des considérations théoriques exposées jusqu'à présent nous proposons dans cette thèse d'investiguer comment l'association bidirectionnelle idéomotrice entre des mouvements et leurs conséquences sensorielles peuvent contribuer à une meilleure compréhension de l'attribution distale (passage des sensations proximales à une perception distale). Autrement dit, nous explorons en quoi la perception distale pourrait être un phénomène résultant du lien bidirectionnel qui unit les mouvements à leurs conséquences sensorielles.

Comme nous l'avons exposé plus haut les conséquences sensorielles des mouvements (sensations) ne sont pas spatialisées en soi dans l'environnement extérieur du sujet. Nous pensons que le mouvement et ses propriétés spatiales peuvent expliquer l'acquisition d'une perception distale, comme le proposent les théories sensorimotrices de la perception. Ces théories soutiennent l'hypothèse que la régularité systématique entre le caractère spatial des mouvements auto-générés et les sensations reçues en conséquence est nécessaire et suffisante pour constituer des « lois de régularité sensorimotrices » par lesquelles émerge la perception distale. En ayant précisé le statut *perceptif et distal* de l'effet en opposition à son contenu *sensoriel et proximal* nous pouvons alors nous risquer à rendre compte du processus d'attribution distale au sein des théories idéomotrices. Nous pensons que ce travail de caractérisation du processus d'attribution distale permettra plus généralement d'unifier les théories sensorimotrices et les théories idéomotrices. Pour cela, nous nous intéressons à la première étape du mécanisme idéomoteur, c'est-à-dire à la phase où l'effet n'est pas encore intégré par le sujet comme un produit perceptif. A ce stade, il n'a pas de caractère distal ; il n'est qu'un flux de sensations indifférenciées qui ne sont « spatialisées » que dans la mesure où elles sont reçues sur un certain point de l'espace du corps. Or c'est bien par cette première étape du mécanisme idéomoteur que l'association bidirectionnelle permet l'intégration de la réponse et de l'effet, résultant en la spatialisation de l'effet dans l'espace extérieur. Ainsi, tout nous invite à penser que dès cette première phase, le mouvement participe à l'attribution de dimensions spatiales (dans un autre espace que le corps) et distale aux sensations reçues.

Nous faisons ainsi l'hypothèse que les propriétés spatiales du mouvement modifient le flux des événements sensoriels et que ces modifications participent à l'attribution de propriétés spatiales et distales aux sensations reçues. Autrement dit, le statut *perceptif* de l'effet comme objet distal est le résultat de l'association bidirectionnelle entre les propriétés spatiales du mouvement et ses conséquences sensorielles. Pour compléter cette hypothèse

générale, nous avançons également l'idée que la perception tridimensionnelle est structurée par l'espace dans lequel les mouvements prennent place. Nous percevons l'espace en trois dimensions car nos mouvements modifient le flux de sensations selon ces trois dimensions. Autrement dit, les mouvements exploratoires de la première étape du mécanisme idéomoteur constituent *un espace de perception* corrélatif et consubstantiel (i.e., superposable) à l'espace dans lequel le mouvement peut se déployer.

De façon plus opérationnelle, nous prédisons que toute variation des propriétés spatiales du mouvement sur un plan et un axe donnés, associée à des conséquences sensorielles proximales, conduit à une modification de la perception distale de l'effet auquel correspondent ces conséquences sensorielles. Dans les expériences menées et présentées dans ce document, les effets manipulés correspondent à des sensations auditives proximales que nous avons au préalable couplées à une représentation visuelle distale (des points sur un écran d'ordinateur) par une simple association S-S à mémoriser.

Par ailleurs et pour détailler un peu plus notre prédiction, nous nous attendons également à montrer que la modification de la perception distale de l'effet sera corrélative au plan et à l'axe sur lequel les variations des propriétés spatiales du mouvement ont lieu. Par exemple, dans le cadre de nos expériences nous utiliserons une procédure idéomotrice classique d'acquisition R-E dans laquelle des mouvements orientés vers la gauche sur l'axe horizontal du sujet produisent une conséquence auditive proximale correspondante : un son entendu dans l'oreille gauche via un casque audio. Comme dit plus haut, ce son a été couplé au préalable à une localisation spatiale et distale particulière par une simple association S-S à mémoriser. Dès lors, au regard de notre hypothèse nous pouvons nous attendre à ce que la perception spatiale et distale de ce son soit altérée par les propriétés du mouvement produit lors de la phase d'acquisition R-E et que cette altération soit corrélative à l'axe et à l'orientation du mouvement. Plus concrètement, le son devrait être localisé comme « plus à gauche sur l'axe horizontal du sujet » si celui-ci avait été associé à des mouvements vers la gauche sur l'axe horizontal plutôt qu'à des mouvements vers la droite ou à aucun mouvement durant la phase d'acquisition. Cette altération démontrerait que la perception spatiale et distale de l'effet est en partie déterminée par l'association bidirectionnelle mise en place lors de la phase d'acquisition entre les propriétés spatiales du mouvement et ses conséquences sensorielles proximales.

Ce protocole a été conçu pour faire écho au protocole de Lenay, Canu et Villon (1997) mettant en jeu des dispositifs minimalistes de suppléance perceptive. Dans nos expériences, la conséquence auditive proximale représente le retour tactile en tout ou rien consécutif au mouvement d'exploration du sujet des expériences de Lenay et al. La modification majeure dans nos protocoles est que la conséquence sensorielle proximale *est* l'objet perceptif à localiser : il n'y a pas d'objet extérieur visé par les mouvements d'exploration. Autrement dit, Lenay et al. mettent davantage l'accent sur le phénomène résultant du processus de l'attribution distale (la perception distale), tandis que nous mettons davantage l'accent sur le processus lui-même. Nous voulons montrer que les propriétés du mouvement modifient notre compréhension des effets sensoriels comme référent à un objet distal et que l'attribution distale se joue à ce niveau – c'est-à-dire au niveau du lien bidirectionnel entre mouvement et effet sensoriel.

Avant de présenter nos expériences, nous souhaitons nous arrêter sur un point de vocabulaire afin de rendre clair le lien entre les études présentées et les deux théories (sensorimotrice et idéomotrice) évoquées dans la partie précédente. Comme nous l'avons mentionné, les sensations sont nécessairement *proximales*. Elles ont bien un caractère spatial, mais celui-ci est limité à l'espace du corps. Les perceptions sont quant à elle nécessairement *distales*⁴². Leur caractère spatial fait donc référence à l'espace extérieur au sujet. S'intéresser à la perception des sensations, comme nous le faisons, implique de se confronter à ce double aspect. Ainsi, lorsque nous évoquons les sons utilisés dans nos expériences, ceux-ci peuvent référer (1) aux conséquences sensorielles reçues des mouvements lors de la phase d'acquisition R-E : en ce sens les sons sont proximaux et spatialisés sur l'espace du corps (ils sont entendu dans l'oreille droite ou dans l'oreille gauche du sujet). (2) La perception de ce son (en tant qu'effet perceptif des mouvements) est en revanche distale et spatialisée dans l'espace extérieur au sujet : le son est en effet localisé *en tant que perception* sur une feuille de réponse placée dans l'espace en trois dimensions du sujet.

La première étude présentée ici expose un ensemble d'expériences visant à 1/ répliquer des résultats classiques de procédures idéomotrices de type compatibilité R-E afin de s'assurer que les procédures expérimentales que nous utiliserons mettent en jeu un processus d'association bidirectionnelle ; 2/ tester les conditions limites dans lesquelles les effets que nous attendons sont susceptibles de se produire et 3/ tester notre hypothèse principale en

⁴² Nous employons ces qualificatifs comme moyen de mettre l'accent sur ces caractéristiques lorsque nous parlons de sensation et de perception.

fonction de l'orientation du mouvement sur le plan transversal et selon deux axes ; horizontal versus antéro-postérieur. La seconde étude s'intéresse à répliquer les observations du premier article selon les deux axes précédemment considérés et à généraliser les observations faites à une autre propriété du mouvement : l'amplitude.

2. Partie expérimentale

2.1. Présentation de l'article soumis le 8 mars 2018 : Lestage, Camus, Dru, et Brouillet (submitted). How movements shape the spatial representation of their effects: about the dynamic character of the ideomotor bidirectional association, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.

Dans ce papier en cours d'expertise, la partie théorique et la problématique que nous posons ne sont pas entièrement celles que nous présentons dans ce document de thèse. Les contraintes de publications nous ont conduits à ne nous focaliser que sur les théories idéomotrices et sur le contenu représentationnel de l'effet. Les références à la substitution sensorielle sont absentes ainsi que notre volonté de caractériser le processus d'attribution distale comme résultat de l'association bidirectionnelle R-E. Toutefois, nous nous situons toujours dans notre problématique de thèse puisque notre intérêt se porte sur l'influence de l'association bidirectionnelle R-E sur le contenu perceptif de la représentation de l'effet. Il est à noter le changement de vocabulaire puisque nous employons pour la première fois le terme de représentation que nous avons préféré jusqu'alors à celui de perception. En effet, « perception » est un terme adapté à la substitution sensorielle et aux théories sensorimotrices ; il est largement employé dans ces champs. En revanche, les théories idéomotrices emploient le terme d'« image anticipatoire de l'effet » pour référer aux conséquences sensorielles des mouvements. Ce terme d'« image » réfère bien à un niveau cognitif de représentation où est reflétée la réalité. De plus, cette image anticipatoire est définie par la version moderne des théories idéomotrices (TEC) comme référent à des codes abstraits cognitifs. Le terme de représentation est donc plus adapté dans ce contexte.

Dans les expériences présentées nous testons l'impact d'une phase d'acquisition R-E sur une tâche de localisation spatiale. Plus précisément, nous voulons montrer que les propriétés spatiales du mouvement associées à une conséquence sensorielle altèrent de façon corrélative le contenu spatial de la représentation de l'effet.

Avant de commencer nos investigations, nous menons une pré-expérience afin de contrôler que les différentes procédures que nous sommes amenées à utiliser au cours de nos différentes expériences impliquent véritablement un mécanisme idéomoteur d'association bidirectionnelle entre une réponse et ses conséquences sensorielles. Cette pré-expérience

repose sur la procédure de Kunde (2001) visant à démontrer l'influence du mécanisme idéomoteur sur le contrôle de l'action ; elle repose également sur la procédure de Koch et Hoffmann (2000) qui ont montré que l'acquisition d'une association R-E est particulièrement efficace lorsque l'on a recours à des séquences R-E prédictibles. Conformément à la tâche utilisée par Koch et Hoffmann et au paradigme de Kunde, nous présentons une séquence de quatre associations entre des réponses distales (spatialisées dans l'espace extérieur : réponse à droite ou à gauche) et des effets sensoriels proximaux (spatialisés sur l'espace du corps : entendus dans l'oreille droite ou gauche). Nous avons comparé un groupe de participants soumis à une situation où toutes les associations R-E sont agencées de manière congruente : la localisation des réponses (R) correspond à la localisation spatiale de l'effet (E) ; à un groupe où toutes les associations R-E sont agencés de manière non congruente : la localisation des réponses (R) ne correspond pas à la localisation spatiale de l'effet (association R-E correspondante versus association R-E non-correspondants).

Chaque séquence est organisée comme suit : pour l'association R-E correspondante, un premier mouvement vers la gauche produit un son grave entendu dans l'oreille gauche, un deuxième mouvement vers la gauche produit un son aigu entendu dans l'oreille gauche, un troisième mouvement vers la droite produit un son aigu entendu dans l'oreille droite et un quatrième mouvement produit un son grave entendu dans l'oreille droite. Pour l'association R-E non-correspondante la séquence des mouvements est similaire, mais cette fois-ci les effets sonores pour les réponses effectuées vers la droite sont entendus dans l'oreille gauche et les effets sonores pour les réponses effectuées vers la gauche sont entendus dans l'oreille droite.

Conformément aux résultats observés par Koff et Hoffmann (2000) et à ceux observés par Kunde (2001), les réponses des participants sont plus rapides pour l'association R-E correspondante que pour l'association R-E non-correspondante. Ce résultat met en évidence que dans notre procédure l'association R-E permet d'observer des effets idéomoteurs et qu'ainsi notre condition d'association R-E correspondante est bien adaptée pour tester notre hypothèse concernant l'influence des propriétés du mouvement sur la perception spatiale de l'effet. Nous utilisons cette procédure dans toutes nos expériences comme phase d'acquisition R-E.

Pour chaque expérience et condition, nous utilisons un plan expérimental pré-test-post-test, divisé en quatre phases : mémorisation visuo-auditive, pré-test, acquisition R-E et post-

test. Lors de la phase de mémorisation, nous demandons aux participants de retenir une séquence de quatre couplages visuo-auditifs entre la position de stimuli visuels (cercles affichés sur un écran) et des sons. Lors de la phase suivante (pré-test) les participants entendent successivement les mêmes quatre sons et doivent, pour chacun, reporter leur position en apposant une croix sur une feuille de réponse selon les couplages visuo-auditifs préalablement retenus. La phase d'acquisition suit en tout point la procédure d'association R-E correspondante de la pré-expérience : les sujets doivent effectuer des mouvements (R) suivis par l'un des sons précédemment entendus (E). Cette phase varie selon les différentes expériences et conditions en fonction des propriétés des mouvements et de leurs conséquences auditives. Enfin, la phase de post-test est la même que la phase pré-test : les participants doivent de nouveau reporter la position des sons entendus sur les feuilles de réponse. Chaque expérience a pour but d'observer l'impact de la phase d'acquisition sur la localisation des croix – plus précisément, sur la différence entre la position des croix du pré-test et celles du post-test.

Le but de la première expérience est d'investiguer à quel point une association bidirectionnelle peut impacter la représentation spatiale (et distale) des effets des mouvements. Dans la première expérience de cet article nous comparons les localisations spatiales de E dans trois conditions : après une phase d'acquisition idéomotrice où E est associé à des mouvements spatialisés (« condition avec mouvements et effets sonores », équivalente à la pré-expérience), après une phase d'acquisition idéomotrice où aucun mouvement spatialisé n'est effectué (E est provoqué par simple pression de touches de réponse : « condition sans mouvements avec effets sonores ») et après une phase d'acquisition non idéomotrice où E n'est pas présent (les mouvements sont effectués sans provoquer E : « condition avec mouvements sans effets sonores »). Nous nous attendons à observer que le report par les sujets de la localisation spatiale de E varie en fonction de l'association mise en place, et que seule la condition avec mouvements spatialisés et avec effets sonores provoque un changement significatif dans la localisation de E. Nous pourrions ainsi affirmer que l'association bidirectionnelle mouvement-effet sensoriel est constitutive du caractère distal la perception de l'effet : le mécanisme idéomoteur influence la représentation spatiale de E.

Dans une seconde expérience, nous testons notre hypothèse principale selon laquelle l'attribution de dimensions spatiale et distale aux conséquences sensorielles est corrélative au plan et à l'axe sur lequel les variations des propriétés spatiales du mouvement ont lieu.

Pour cela, nous manipulons les caractéristiques physiques des mouvements effectués lors de la phase d'acquisition, afin de montrer que celles-ci prédisent les différences observées sur la localisation spatiale de E par les participants. Nous comparons une condition où les mouvements associés à E lors de la phase d'acquisition sont effectués vers l'extérieur sur l'axe horizontal du plan transversal des sujets (vers la droite et vers la gauche) à une condition où les mouvements sont effectués sur l'axe antéropostérieur du plan transversal (vers l'avant et vers l'arrière). Nous nous attendons à observer que les variations dans la localisation de E soient similaires aux variations des mouvements effectués : le report de la position des effets sonores lors de la phase de post-test devrait être davantage marqué vers la droite et vers la gauche de la feuille de réponse pour la condition où les mouvements sont effectués sur l'axe horizontal, et davantage marqué vers le haut et vers le bas de la feuille de réponse pour la condition où les mouvements sont effectués sur l'axe antéropostérieur. Autrement dit, la représentation spatiale des effets sonores devrait être impactée en fonction des caractéristiques des mouvements effectués lors de la phase d'acquisition. Nous pourrions ainsi affirmer que l'influence du mécanisme idéomoteur sur la représentation spatiale de E repose sur les caractéristiques physiques spatiales des mouvements, définissant ainsi l'attribution distale au niveau de l'association bidirectionnelle.

How movements shape the spatial representation of their effects: about the dynamic character of the ideomotor bidirectional association

Hélène Lestage¹, Thomas Camus², Vincent Dru¹ & Thibaut Brouillet¹

¹CeRSM laboratory (EA2931), Paris Nanterre University, 200 Avenue de la République, 92000 Nanterre, France. helene.lestage@gmail.com, +1 (778) 300-7902

²EPSYLON laboratory (EA 4556), Paul Valéry University, Route de Mende, 34090 Montpellier, France

Abstract: In this article we propose evidence that the spatial representation of an individual's action effects is dynamically linked to the motor properties of said actions. In the two experiments presented here participants explicitly memorized four tone-locations to begin with. Later, in an acquisition phase based on a Response-Effect ideomotor procedure, they associated spatialized movements to the aforementioned tones. To test how movement direction changed the spatial representation of the tones, subjects were asked to report on a sheet the previously memorized tone-location before and after the acquisition phase. Results reveal a shift in the spatial representation of the tones correlative to the movement properties. For example, a tone heard in the right ear was localized as more “to the right” after being associated with a right horizontal outward movement. Different types of association (experiment 1) and movements (experiment 2) were tested. Our study shows that 1/ the ideomotor mechanism dynamically influences the representational content of sensory movement effects and 2/ movement direction shapes how we represent the action effects in space.

Keywords: ideomotor mechanism, action effect, bidirectional association, movement, spatial representation

Introduction

Within the History of scientific psychology, one of the first problems having to be addressed was how the mind is able to use the body without any knowledge about its own functioning. James' answer (1890, II, p. 522) is that "the movements of the body follow the notion of the movements consequences in the mind unhesitatingly and immediately". James' assumption is that human actions are initiated by an idea – representation - of their expected consequences. This conjecture forms the basis of ideomotor theories (see Stock & Stock, 2004 for a summary). One of the core concepts of ideomotor theories is the bidirectional association between a movement and its sensory effect settled through their co-occurrence during all life span. This bidirectional association is the core of our investigation. Is it just a *passive* association between movements and effects representations, where the activation of one automatically triggers the activation of the other? Or is it something more *dynamic* where movements actively influence the representational content of their sensory effects? In our study we defend the dynamic version of the bilateral association. We expect variations in a movement direction to result in correlative variations in the spatial representation of the action effect.

Conditions under which a bidirectional association between a movement and its effect occurs: the two stages model.

According to ideomotor theories, the establishment of a bidirectional association happens in two stages (Elsner & Hommel, 2001). The *first stage* of this mechanism is featured as a phase of random, exploratory movements. During this phase sensory effects resulting from random movements

automatically come to be – consciously or not – distinguished as specific consequences of movements. The *second stage* is a phase of integration: if the activation of the same sensory effect follows the same movement repeatedly enough, movement and effect become integrated together into both the action and the effect representations. The activation of one will then induce the activation of the other so that the bidirectional association between the movement and its sensory effect occurs. This has been successfully experimented by Elsner and Hommel (2001). In a response-effect (R-E) acquisition procedure, participants were required to press a right or a left key as a motor response to a visual stimulus. They experienced the co-occurrence of their responses with high-pitched or low-pitched tones (i.e., auditory effect of the response). Importantly, the tones were irrelevant to the task. In a subsequent test phase, participants were presented with both tones, this time as stimuli. They were asked to press a left or a right button in response to the low or high frequency of the tone. The authors reported that responses of participants were faster when the tone had previously been the effect of this response during the acquisition phase. These results suggest that the perception of a sensory effect (e.g., a tone) activates the corresponding response which has been associated to it through learning (i.e., through the R-E acquisition phase). This means that the action effect representation (e.g., a high or low-pitch) is linked in some aspect to the action properties (e.g., hand movements induced by the right or left key presses) by a bidirectional association, where the activation of one triggers the activation of the other. Interestingly, in line with Elsner and Hommel (2001)'s R-E acquisition phase, Camus, Hommel, Brunel and Brouillet (2017) showed that even when the motor codes of an action effect (e.g., presentation of an object inducing a power grasp, like a hammer) are inconsistent with an

associated grasping movement (e.g., a precision grasp induced by the response apparatus) this last one will be integrated to the action effect representation independently of its inconsistency. This result confirms that a bidirectional association is at work during a R-E acquisition phase. Furthermore, it underlines the strength of the ideomotor bidirectional association, which can integrate an inconsistent movement or a new habit into an action effect representation.

As Kunde (2001, p.387) noticed, an issue raised by Elsner and Hommel (2001)'s experiment is that it does not prove that the responses performed during the second phase are selected according to the anticipation of the sensory effects. Indeed, as long as a stimulus precedes the response (as it is the case in both phases of Elsner & Hommel's experiment), it is not possible to rule out the possibility that the highlighted bidirectional association actually concerns the stimulus and the response effect – versus, as it is stated by ideomotor theories, the response and its effect. To address this ambiguity, Kunde (2001) tested the influence of a R-E compatibility procedure on response selection without the presence of a stimulus. He compared corresponding versus non-corresponding R-E spatial mappings. Subjects were asked to press one of four horizontally aligned response keys. In the first case (corresponding mapping), the location of subjects' responses and the location of the visual effects triggered by these responses were the same, as a lamp was lighting up at the same location subjects pressed a response key. In the second case (non-corresponding mapping), the location of subjects' responses and the location of the visual effects triggered by these responses were different, as a lamp was lighting up in an opposite location from where the response key was. Results revealed that although the effects were displayed after the responses, after a few trials corresponding

mapping triggered faster and more accurate responses than non-corresponding mappings. Thereby Kunde's experiment allows concluding that a response can truly be selected by the anticipation of its sensory effects. In line with the topic of our investigation, it also confirms that the properties of the spatialized response are an integrative part of the spatial content of the action effect representation. In a second experiment Kunde found a comparable result using non-spatialized responses of varying forces (intense or soft press actions) and non-spatialized response effects of varying auditory intensity (low or high-pitched effects). This last result reveals that the ideomotor bidirectional association is not specifically limited to spatial correspondences.

Ideomotor mechanism features and experimental validations

Taken together Kunde (2001)'s and Elsner and Hommel (2001)'s experiments illustrate what we can call an ideomotor mechanism: 1/ a bidirectional association occurs between a movement and its sensory effect, 2/ this bidirectional association leads to integrate motor codes to the effect representation, and 3/ action is selected according to its expected effects. During the last two decades these features have been extensively tested by numerous studies. The ideomotor paradigm covers different procedures: R-E acquisition (Elsner & Hommel, 2001) or R-E compatibility procedures (Kunde, 2001). It covers different tasks: serial reaction time tasks (Nissen & Bullemer, 1987; Ziessler, 1998; Ziessler & Nattkemper, 2001; Hoffmann, Sebald, & Stöcker, 2001; Stöcker, Sebald, & Hoffmann, 2003; Esser & Heider, 2017; Rüsseler, Münte, & Wiswede, 2018), and choice reaction time tasks (Aschersleben & Prinz, 1995; Hommel, 1994; Hommel, 1996; Elsner & Hommel, 2001;

Kunde, Hoffmann, & Zellmann, 2002; Hommel, 2004; Kunde, 2003; Kunde, Koch, & Hoffman, 2004). Different types of effects following responses have been tested: semantic items (Koch & Kunde, 2002), affective pictures (Eder, Rothermund, De Houwer, & Hommel, 2015), tone intensity (Kunde, 2001), tone duration (Kunde, 2003), pictures of graspable objects (Camus, Hommel, Brunel, & Brouillet, 2017), numeric items (Badets, Pesenti, & Olivier, 2010), colored items (Hommel, 2004), different types of word categories (Hommel, Alonso, & Fuentes, 2003), letters (Rieger, 2007). All these experiments highlight that ideomotor bidirectional associations lead to automatically associate any sensory modality of an action effect with any movement properties.

The theory of events coding: an integrative ideomotor theory.

Nowadays the most popular version of ideomotor theories is Hommel's Theory of Event Coding (TEC) (Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; Hommel, 2009). One of the main assumptions of this theory is that elements representing the stimulus context, the selected action, and the effects of that action are stored in a common and abstract code: the event-file. An event-file represents parts of an individual's sensorimotor experiences with his environment. In line with Gibson's ecological theory (1966), TEC assumes that action and perception share a common substrate as well as a bidirectional influence between them. Perceived events (perceptions of stimuli and of action effects) and to-be-produced events (actions) are equally represented in a way that the activation of a specific motor code can be predicted by the activation of a specific corresponding perceptive code, and reciprocally. This last assumption has been largely tested by studies investigating how a motor response code could

be associated with a representational content of its sensory effects (see above, and see Shin, Proctor, & Capaldi, 2010 for a review) and how the integration of response properties into the effect representation influences action control (e.g., Elsner & Hommel, 2001; Camus, Hommel, Brunel, & Brouillet, 2017).

As Shin, Proctor, and Capaldi (2010, p.965) point out, if action and perception share a common representation and exhibit a bidirectional association, then ideomotor theories should take interest in investigating how the properties of action impact perception. A limited number of studies took interest in this last aspect (see Rizzolatti, Riggio, & Sheliga, 1994; Deubel & Schneider, 1996; Müsseler & Hommel, 1997; Craighero, Fadiga, Rizzolatti, & Umiltà, 1999; Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; Hommel & Müsseler, 2006; Fagioli, Hommel, & Schubotz, 2007; Wykowska, Schubö, & Hommel, 2009; Kirsch & Kunde, 2014). Nevertheless, in all instances perception is only defined as perception of stimuli preceding and triggering the action, without any mention of the perception of the action effects. For example, Kirsch and Kunde (2014) showed that the spatial localization of a stimulus could be influenced by the direction of planned movements associated to this stimulus. For example, stimuli were localized as more rightward in space when triggering movements toward the left side than when triggering movements toward the right side. Generally, those studies show that association between a stimulus, a response and an effect can influence the perception of the stimulus. There is no mention whatsoever of the effect representation.

What is the consequence of the R-E bidirectional association on the action effect representational content?

To the best of our knowledge ideomotor studies never took into account the specific properties of movements that are associated to their sensory effects, and how these properties might impact on the representational content of the sensory response effects. Most ideomotor experiments use key presses as tasks. As such they do not explore a large variety of movements nor their dynamic consequences on the representational content of the sensory effect. In that respect, Shin, Proctor, and Capaldi (2010)'s concern about how the properties of action impact perception has been only partially answered. We should explore how movement properties dynamically impact the representational content of their effects. In other words, we propose to turn from the representation of action stimuli to the representation of action effect, and from simple actions (key presses) to dynamic actions.

Regarding the dynamic aspect of actions, the Action Constraints Theories of space perception (ACT, for a review see Morgado & Palluel-Germain, 2015) suggests that the way we intend to act and the properties of our intended actions modify the spatial representation of the stimuli we mean to identify in a dynamic way. For example, in Morgado, Gentaz, Guinet, Osiurak, and Palluel-Germain (2013)'s experiment, participants were asked to report the distance they saw between their hand and a target located behind a transparent barrier of varying width. Before each evaluation participants were asked to mentally simulate the action of grasping the target with their hand by reaching it around the barrier. Results analysis showed that participants' estimations of the target distances were higher after they had to imagine grasping the target around wider barriers than narrower ones (for similar results with genuinely performed actions, see Kirsch & Kunde, 2012, 2014). It remains to know whether movements actually influence the spatial perception of

stimuli themselves or their spatial memory (see Cooper, Sterling, Bacon, & Bridgeman, 2012). To remove this ambiguity in our study we chose to investigate the spatial *representation* of an action effect as part of memory.

In sum, ACT invites ideomotor theories to consider that movement properties could dynamically affect the representational content of their sensory effects, as they do for stimulus perception. In line with this idea, we propose that the ideomotor bidirectional association is a dynamic connection between movement and sensory effect representation. Our studies investigate this point by confronting two versions of the bidirectional association. If this association is passive then the movement properties should not have any impact on the representational content of its sensory effects. However if this association is a dynamic integration, changes in the movement properties (e.g., direction) should entail correlative changes in the representational content (e.g., spatial properties) of its sensory effects. In other words, if the bidirectional association is a passive process then the integration of movement properties into action effect association should not have any influence on the spatial component of the action effect representation. On the other hand, if this bidirectional association is a dynamic process then the integration of movement properties into action effect association should influence the spatial component of the action effect representation, as expected by TEC. We claim that an auditory effect associated to a specific movement is spatially represented according to the spatial properties of this movement.

The Present Study

In this study we want to demonstrate, using an ideomotor paradigm, the dynamic influence of a movement direction on the representational content of associated sensory effects. Before starting any investigation, we conducted a pre-experiment as a replication of Kunde (2001)'s experiment, to control that the R-E compatibility procedure we used in our following-up studies really involved an ideomotor mechanism.

As the results of this pre-experiment were in line with our expectations and with Kunde (2001)'s results, we applied the corresponding mapping condition of the pre-experience to both our experiments – as a condition that involved an ideomotor mechanism. For each experiment we used a pre-test-post-test experimental design divided in four phases: set-up, pre-test, acquisition, and post-test phases.

The goal of the first experiment was to investigate the boundary conditions in which an ideomotor mechanism can impact the spatial content of the action effect representation. In the second experiment we tested our main hypothesis about the specific influence of movement direction on the spatial content of the action effect representation.

The Pre-Experiment: A replication of Kunde (2001)'s experiment.

The aim of this pre-experiment was firstly to replicate Kunde (2001)'s results: a spatial R-E corresponding mapping leads to faster response times than a R-E non-corresponding mapping. Secondly, our goal was to have a R-E compatibility procedure (i.e., the corresponding mapping condition) involving an ideomotor mechanism, in order to test our main hypothesis in the following experiments.

Based on Kunde (2001)'s procedure, our pre-experiment design differs in that the procedure was made to increase the anticipation of the response effects: we chose a paradigm in which events were perfectly predictable. In that respect all our conditions were always fixed, such as in Koch and Hoffman (2014). This means that in contrast to classic ideomotor procedures, our design does not allow testing response selection *per se*, because the decision concerning which movement to perform could be made before the stimulus is presented. Indeed, our main investigation aims at studying effect representation and not response selection. We chose this predictable paradigm in order to make the task as simple as possible for the participants. Moreover, by maintaining the sequences of response-effect associations constant, we ensured that only the direction of the movement changed between experimental conditions in the following-up experiments.

Method

Participants. 40 students of the University of Paris-Nanterre (22 males, participants mean age 21.73 years old, SD 2.84) took part in the pre-experiment. All had normal or corrected-to-normal vision and audition. Two experimenters managed 20 participants each in a randomized fashion. Informed consent was obtained from all participants included in the study.

Apparatus and Material. The whole experimental setup was placed on a 65x120cm desk. The experiment took place on an ASUS X53S laptop (15.6-inch screen, running Windows XP, Core i3 processor), and was programmed with Python v2.7.11 software (<https://www.python.org/>). The laptop screen was placed at 1cm from the upper edge of the desk and centered on its length. Participants

were given a Sennheiser 380 PRO audio headset to wear.

Two kinds of stereo tones were used: a high-pitched pure tone (1777Hz) and a low-pitched pure tone (110Hz), each with 500ms duration, a digital resolution of 32bits and digitized at 48000 samples/sec. These tones were presented through the audio headset either to the left ear or to the right ear of the participant. We therefore used four auditory stimuli: the low-pitched tone heard in the left ear, the high-pitched tone heard in the left ear, the high-pitched tone heard in the right ear, and the low-pitched tone heard in the right ear. These auditory stimuli have been designed with Audacity v.2.1.2 software (<http://www.audacityteam.org/>).

Visual scenes were displayed on the laptop screen, all representing a ghost symbol of 2.8x1.8cm, located in the center of the screen on a white background. Half of the ghost symbols were colored in blue, the other half were colored in yellow. These stimuli were preceded by a fixation cross of font size 48 and of 500ms duration.

The answer apparatus has been built with the device Makey-Makey®. It comprised three squared 4x4cm buttons. One, colored in red, was located in the center of the desk length with its center 3cm away from its lower edge. The other two, covered with aluminum, were aligned with the red button, on the X-axis with respect to the transverse plane of the subject, with their centers 5cm away from the left and right edges of the desk. Both had a blue or yellow sticker placed in their center. They were connected to the laptop and converted into response buttons by the Makey-Makey device.

Procedure. The subjects' task was to match each ghost symbol with the response button presenting the same color. Ghost symbols were displayed in the center of the screen and were preceded with the fixation cross (500ms).

Subjects used both their hands to answer, the left hand for the left side and the right hand for the right side. The yellow color was associated with the left side and the blue color with the right side; this organization was inverted for half of the participants. They were told to start from the red button located at the center, to go and press the button matching the color of the ghost, and then come back to the center. They had to answer as quickly as possible from the onset of visual stimuli. The screen was cleared after each subject's response. Response buttons triggered an auditory effect, displayed in the headset. As in Kunde (2001)'s experiment, we designed two experimental conditions: an R-E spatial corresponding mapping and a non-corresponding mapping. For the corresponding mapping, the two tones heard in the left ear (high and low-pitches) were the effect of left response button, and the two tones heard in the right ear were the effects of right response button. For the non-corresponding mapping, tones heard in the right ear were the effects of left response button, and tones heard in the left ear were the effects of right response button. After an intertrial interval of 1000ms, the fixation cross signaling the following trial was displayed.

In order to measure the level of influence of a R-E compatibility on movement selection according to the temporal evolution of the experiment, we designed twelve blocks as a within-participants factor for each condition (corresponding vs. non-corresponding mapping). The first block was labeled as training. Each block in the corresponding mapping condition followed this systematic pattern: (1) A fixation cross was displayed, followed by a yellow ghost. The subject made a movement toward the left and received as a consequence a low-pitched tone in his left ear. (2) After coming back to the center button, a fixation cross was displayed, followed by a yellow ghost. The subject made a movement

toward the left and received as a consequence a high-pitched tone in his left ear. (3) After coming back to the center button, fixation cross was displayed again, followed by a blue ghost. The subject made a movement toward the right and received as a consequence a high-pitched tone in his right ear. (4) After coming back to the center button, a fixation cross was displayed, followed by a blue ghost. The subject made a movement toward the right and received as a consequence a low-pitched tone in his right ear. The blocks in the non-corresponding condition followed the same order; the only variation was that instead of hearing a tone on the left ear after a movement toward the left, participants heard a right tone; similarly, instead of hearing a tone on the right ear after a movement toward the right, participants heard a left tone.

We recorded response times in milliseconds for each response (time between the onset of stimuli and button press). A power analysis (conducted via G*Power Software, Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007, with Cohen's recommendations, 1988), which assumed a medium effect size of 0.25 for the ANOVA with one between-subjects factors and one within-subjects factor (11 levels of signs as repeated measures), which would not interact together, indicated that a total of 44, 38 and 34 participants were required, respectively, to have a 90, 85, or 80 % power (a minimum required by Cohen, 1988) of detecting a significant effect at p value of 0.05. 20 subjects performed the corresponding condition and 20 subjects performed the non-corresponding condition (for a total of 40 participants).

Results

We considered responses with RTs below 200 ms and above 2700ms as outliers and discarded them (> 3.3% of all responses). We performed an analysis of variance

(ANOVA) on the RTs, with R-E compatibility (corresponding vs. non-corresponding mapping) as a between-participants factor and Blocks (2 to 12, excluding the first training block) as a within-participants factor. The mean RTs for the corresponding versus non-corresponding mapping were 619 versus 840ms. The ANOVA of RTs revealed that this difference was significant $F(1, 38) = 25.3, p < .01, \eta_G^2 = 0.34, \eta_p^2 = 0.4$. Subjects were faster with the corresponding mapping than with the non-corresponding mapping. The effect of the Blocks factor was also significant, $F(10, 380) = 6.2, p < .01, \eta_G^2 = 0.04, \eta_p^2 = 0.14$. This means that RTs became faster and faster for each block. The interaction between R-E compatibility and Blocks factors was not significant ($p > .1$). See Figure 1 for an illustration of these results.

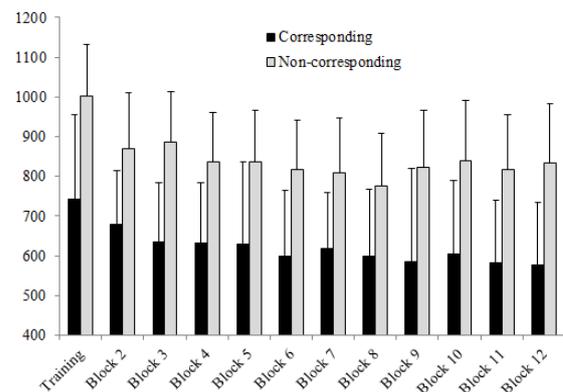


Figure 1. Results of the pre-experiment: RT in ms as a function of corresponding vs. non-corresponding R-E mappings and blocks. The bars represent standard errors.

Interim discussion

The aim of this pre-experiment was, firstly, to replicate Kunde (2001)'s results: a spatial R-E corresponding mapping leads to faster response times than R-E non-corresponding mapping. The obtained results are in line with this assumption: when the location of a subject's response corresponded to the location of its auditory effect, responses

were faster than when these locations did not correspond.

Secondly, our goal was to have an experimental procedure (i.e., the corresponding mapping condition) involving an ideomotor mechanism, in order to test our main hypothesis in the following experiments. The results obtained with the corresponding mapping condition confirm one of the main assumptions of the ideomotor theories: action is selected according to its expected effects. Moreover, in line with the results obtained by Camus, Hommel, Brunel, and Brouillet (2017), we consider that 1/ a bidirectional association occurs in this condition between the response and its sensory effect and 2/ this bidirectional association leads to an integration of the motor code into the movement effect representation. The question is now to know if this integration is a passive mechanism or if it influences the representational content of the sensory effect in a dynamic way. We try to answer this question with the following experiment.

Experiment 1: in which extent an ideomotor mechanism can impact the effect representation?

The goal of this first experiment was to test the boundary conditions in which an ideomotor mechanism can impact the effect representation. Do we need a spatialized movement to change the spatial representation of a movement effect, or could a simple lateralized key press be enough? Does the movement have a specific influence on the effect representation or does it have a specific effect on the whole situation independently of the bilateral R-E association? In sum, which is the part of the bidirectional association impacting on effect representation?

To answer these questions, we used a pre-test-post-test experimental design divided in four phases: set-up, pre-test, acquisition, and

post-test phases. Only the acquisition phase varied between three different conditions.

In the explicit tone-location set-up first phase participants had to memorize four simple sequences of four matches between locations of visual stimuli and spatialized tones (“visual-auditory matches”). The goal of this first phase was to make sure that a predictive and controlled spatial dimension was paired to the representation of the four tones we used.

In the pre-test phase we primed participants with the same sequence of four tones and asked them to affix crosses on answer sheets according to the visual-auditory matches previously memorized. We recorded the X and Y coordinates of each of these crosses.

In the implicit movement-effect acquisition phase we used the R-E corresponding mapping condition of the pre-experience in three experimental conditions. In the first two conditions the four auditory effects of the set-up phase were presented as an action effect following the subject’s responses. In the third condition no effects were displayed after the subject’s responses. Moreover, in the first and third conditions participants had to respond by performing a horizontal outward arm movement (go press a right-button with a rightward movement or go press a left-button with a leftward movement), whereas in the second condition participants just had to press a button with a right or left finger (no arm movement was required to press the buttons). We call *movement with effect* condition the first one, *no-movement with effect* the second one and *movement with no-effect* the third one. In sum 1/ as shown by the pre-experiment, the *movement with effect* and the *no-movement with effect* conditions were two R-E ideomotor procedures, in which responses triggered auditory effects. In one case, responses implied extended arm movements; in the other, responses only required a finger press; 2/ the

movement with no-effect condition was not an ideomotor procedure, but it involved the same spatialized movements as in the *movement with effect* condition. See figure 2 for an illustration of the different variations of the acquisition phase in all conditions.

	Experiment 1			Experiment 2	
	Movement with effect	Movement with no-effect	No-movement with effect	Horizontal outward	Forward-backward
Movement	Horizontal Outward ↔	Horizontal Outward ↔	Key press □ □	↔	↕
Movement effect	Yes	No	Yes	Yes	Yes

Figure 2. Variations in the acquisition phase for both experiments

Lastly, the post-test phase was the same as the pre-test phase: we again asked participants to transcribe the tone locations on answer sheets, still with the same tones. For each experimental condition we observed the impact of the acquisition phase on the discrepancy between pre-test and post-test tasks, on the X and Y crosses coordinates. See figure 3 for an illustration of the procedure followed in the set-up and pre and post-test phases.

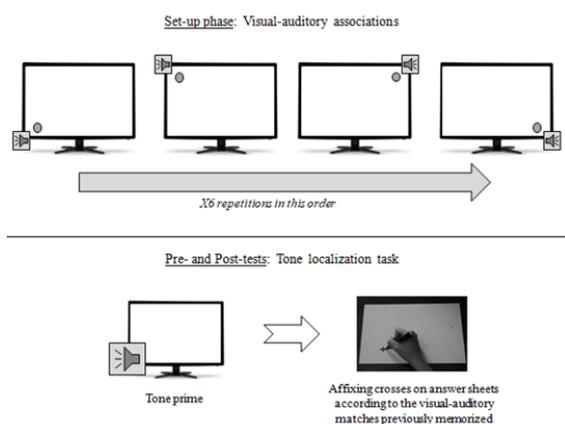


Figure 3. Illustration of the procedure for the set-up phase, and the pre- and post-tests phases.

The comparison of the two R-E ideomotor procedures (*movement with effect* and *no-movement with effect*) of the acquisition phase led us to know to what extent movement

could entail spatial changes in the response effect representation. The comparison of the *movement with effect* and the *movement with no-effect* conditions led us to know to what extent movement impacts the spatial representation of the effect and not the general representation of the whole situation.

In the next section and for a better understanding we present the description of the material and the procedure separately for each phase of the experiment: 1/ set-up, 2/ acquisition and 3/ pre-test post-test phases.

Method

Participants. 108 students of the University of Paris-Nanterre (35 males, participants mean age 20.65 years old, SD 2.28) took part in the experiment. All had normal or corrected-to-normal vision and audition. Three experimenters managed 36 participants each in a randomized fashion. Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

Apparatus. The experimental setup was the same as in the pre-experiment.

Explicit tone-location set-up first phase

Material. Four visual scenes were presented on the laptop screen. Each represented a circle of 1.5cm diameter filled in green, on a white background. In the first visual scene, the circle was located in the lower-left space of the screen, in the second scene the circle was located in the upper-left space, in the third scene the circle was located in the upper-right space, and in the fourth scene the circle was located in the lower-right space. If considering the center of the screen as a reference point with 0cm as X and Y coordinates, then the coordinates of the first circle's center were -6cm, -3.5cm; the second circle's coordinates were -6cm, 3.5cm; the third circle's coordinates

were 6cm, 3.5cm; and the fourth circle's coordinates were 6cm, -3.5cm. If brought together, the four circles' centers were thus located on the four corners of a 6.5x10.5cm rectangle.

The distinctive feature of this set-up phase was that the location of each circle was coupled with a tone in a compatible manner (see Rusconi, Kwan, Giordano, Umiltà, & Butterworth, 2006, and Kunde, 2001, on spatial correspondence between pitches and location). The lower-left circle was associated with a low-pitched tone heard in the left ear; the higher-left circle with a high-pitched tone heard in the left ear; the higher-right circle with a high-pitched tone heard in the right ear; and the lower-right circle with a low-pitched tone heard in the right ear. The four auditory stimuli were the same as in the pre-experiment.

Procedure. (See figure 3) Participants were placed in front of the laptop screen, on which instructions were displayed. They were asked to memorize couplings between locations of visual stimuli (represented by the green circles) and locations of tones (heard through the audio headset). The sequence of visual-auditory couplings presented to the subject was: (1) a low-pitched tone heard in the left ear was coupled with the circle located in the lower-left space of the screen; (2) a high-pitched tone heard in the left ear was coupled with the circle located in the upper-left space of the screen; (3) a high-pitched tone heard in the right ear was coupled with the circle located in the upper-right space of the screen; (4) a low-pitched tone heard in the right ear was coupled with the circle located in the lower-right space of the screen. Each circle was displayed for 1s; the beginning of this display was synchronized with the beginning of the tone. After a first presentation, this sequence was repeated five times. We ensured that the four visual-auditory couplings had been properly memorized in the

pre- and post-test phases. The pre-test follows the first set-up phase, while the post-test follows the acquisition phase. We will present them both last.

Acquisition third phase: R-E procedure

Material. We used the same material as in the pre-experiment.

Procedure. (See Figure 2). We told all participants that they were going to perform a distractive task consisting in a game where they had to “kill ghosts” as fast as possible.

A first group followed the corresponding mapping condition of the pre-experiment procedure. Four auditory effects were associated to two horizontal outward movements (rightward or leftward). The two tones (high and low pitches) heard in the left ear were the effect of leftward movements in response to blue ghost stimuli, and the two tones (high and low pitches) heard in the right ear were the effect of rightward movements in response to yellow ghost stimuli (*movement with effect* condition). Colors on response buttons were counterbalanced. For a second group, the procedure only differed in that spatialized movements performed as responses to ghost stimuli were replaced by simple key presses (*no-movement with effect* condition). In this condition, blue and yellow stickers were displayed on the center of the “B” and “N” keys of the laptop keyboard – the space between these keys being at the center of the keyboard length – in order to indicate the subject where to press according to the displayed ghost color. For a third group, the procedure only differed from the *movement with effect* condition in that participants received no auditory effect after their responses (*movement with no-effect* condition). Instead the rightward and leftward movements

performed by the subjects were followed by a 500ms silence.

Pre- and post-test second and fourth phases: implicit measure of the action effect representation

In these phases we primed participants with the same sequence of four tones previously heard during the set-up phase and asked them to affix crosses on answer sheets according to the visual-auditory couplings they had memorized.

Material. In order to transcribe the locations of the tones, participants used a sharp pencil on blank sheets of A4 paper; one sheet by transcribed location and by participant, namely eight sheets per subject – four during each phase. These sheets were presented in landscape orientation inside an opened cut box (21.5x29.5x2cm) fixed near the participant, at 5cm from the lower edge of the desk and centered on its length. The box was taken out of the desk during the acquisition phase.

Procedure. (See Figure 3). Pre-test and post-test phases were the same in all aspects. The pre-test (second) phase followed the set-up phase, and the post-test (fourth) phase followed the acquisition phase. Subjects were given a pencil and were informed that they were going to hear the same sequence of four tones presented during the set-up phase. After each heard tone, their task was to affix a cross on the sheet in front of them according to the four visual-auditory associations they had memorized. Participants were not given any time limit to realize the task. For each cross affixed by the participant, the sheet was collected by the experimenter to avoid any possible influence of the preceding answers. At the end of the pre-test phase they were told that this task would be followed by a distractive one (the acquisition phase), after which they would

have to redo the exact same task and therefore recall the couplings again. We told participants that before this last phase (the post-test phase) they were going to perform a distractive task (the acquisition phase).

Data registered were the X and Y coordinates in centimeters of the center of each cross obtained during the pre- and post-test phases, according to an orthonormal coordinate system whose origin (the point where $X=0$ and $Y=0$ cm) corresponded to the center of the A4 sheet in landscape orientation. To allow the comparison of the different locations of crosses, only the absolute values of the obtained numbers were considered.

A power analysis (conducted via G*Power Software, Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007, with Cohen's recommendations, 1988), which assumed a medium effect size of 0.25 for the ANOVA with one between-subjects factors and two within-subjects factor (4 levels of signs as repeated measures), which would interact together, indicated that a total of 39, 33 and 30 participants were required, respectively, to have a 90, 85, or 80 % power (a minimum required by Cohen, 1988) of detecting a significant effect at p value of 0.05. We also registered the discrepancy in centimeters between the locations of crosses on the sheet at the pre-test and at the post-test on both axes – the discrepancy was thus obtained by subtracting the absolute values found during the pre-test to the absolute values found during the post-test. A power analysis (conducted via G*Power Software, Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007, with Cohen's recommendations, 1988), which assumed a medium effect size of 0.25 for the ANOVA with one between-subjects factors and one within-subjects factor (2 levels of signs as repeated measures), which would interact together, indicated that a total of 54, 48 and 42 participants were required, respectively, to have

a 90, 85, or 80 % power (a minimum required by Cohen, 1988) of detecting a significant effect at p value of 0.05. 36 subjects performed the *movement with effect* condition, 36 performed the *movement with no-effect* condition, and 36 performed the *no-movement with effect* condition (a total of 108 participants – twice Cohen’s recommendations).

Results

Regarding the error rate, no error was made during the pre-test and post-test parts of the experiment. All participants drew the crosses where it was expected according to the heard stimuli: low-left space of the sheet for low-pitched left tone, high-left space for high-pitched left tone, high-right space for high-pitched right tone and low-right space for low-pitched right tone.

In order to test our hypothesis we used the absolute measures of the locations of crosses drawn by the subjects during the pre- and post-test phases to conduct a first analysis with a mixed ANOVA. Measure (pre-test, post-test) and Axis (X, Y) factors were within-participants measures and Type of acquisition (*movement with effect vs. movement with no-effect vs. no-movement with effect*) was a between-participants factor. The dependent variable used in this analysis was the absolute value of the locations of crosses from the center

of the sheet. Results are summarized in Table 1.

The analysis did not reveal a main effect of the Type of acquisition factor ($p = .36$): the three conditions led to similar tone localization. In contrast, we obtained a main effect of the Measure and Axis factors: respectively, $F(1, 105) = 46, p < .01, \eta_G^2 = 0.01, \eta_P^2 = 0.31$; $F(1, 105) = 444, p < .01, \eta_G^2 = 0.35, \eta_P^2 = 0.81$. In other words participants affixed their crosses further from the sheet center during the post-test (7.03cm) than during the pre-test (mean 6.7cm). The crosses were globally positioned further from the center of the sheet on the X-axis (8.2cm) than on the Y-axis (5.5cm). Moreover, the analysis revealed an interaction between Measure and Axis factors $F(1, 105) = 5.2, p < .01, \eta_G^2 = 0.0005, \eta_P^2 = 0.05$. The crosses were drawn further from the sheet center ($p < .01$) on the X-axis during the post-test (8.4cm) than during the pre-test (7.9cm) and they are also closer to sheet edges ($p < .01$) on the Y-axis during the post-test (5.7cm) than during the pre-test (5.4cm). The most important result of this experiment was the three way interaction observed between Type of acquisition, Measure, and Axis factors $F(2, 105) = 10, p < .01, \eta_G^2 = 0.002, \eta_P^2 = 0.2$. We observed an interaction between Measure and Axis factors for the *movement with effect* condition ($p < .01$) but not for the *movement with no-effect* condition ($p = .8$) nor for the *no-movement with*

Table 1
Summary of results for the two experiments: cross positions in centimeters

Condition	X-axis					Y-axis				
	Pre-test		Post-test		p	Pre-test		Post-test		p
	M	SD	M	SD		M	SD	M	SD	
Experiment 1										
<i>Movement with effect</i>	7.4	1.8	8.4	1.2	<.001	5.5	1.9	5.8	1.1	<.001
<i>Movement with no-effect</i>	8.3	2	8.7	1.2	<.001	5.6	8	6	1.3	<.001
<i>No-movement with effect</i>	8.1	2.4	8.1	1.9	.82	4.9	2.7	5.1	1.9	.17
Experiment 2										
<i>Horizontal outward</i>	7.8	2.1	8.8	1.3	<.001	5.1	2.3	5.5	1.5	<.001
<i>Forward-backward</i>	7.3	1.8	7.8	1.2	<.001	5.4	2	6.2	1.2	<.001

effect condition ($p = .2$). This means that the Axis factor was sensitive to the Measure factor only for the *movement with effect* condition. Post-hoc analyses revealed that for both the *movement with effect* condition and the *movement with no-effect* condition, the locations of crosses were further from the sheet center for the post-test than for the pre-test, both on X and Y axes; but this difference did not appear for the *no-movement with effect* condition. In other words the *no-movement with effect* condition did not trigger any change of the crosses localizations between the pre-test and the post-test neither on the X-axis ($p = .8$) nor on the Y-axis ($p = .17$).

For a better understanding of this last result, we conducted a second analysis where the impact of the Type of acquisition factor on the tone localization was assessed by comparing the discrepancy between the locations of crosses – the spatial representation of the tone in space - from the pre-test to the locations of crosses from the post-test on both axes. The measured values were analyzed with a mixed ANOVA: Axis (X, Y) was a within-participants measure and Type of acquisition (*movement with effect*, *movement with no-effect*, *no-movement with effect*) was a between-participants factor. Results are summarized in Table 2.

Table 2

Summary of results for the two experiments: discrepancies in centimeters

Condition	On X-axis		On Y-axis		<i>p</i>
	M	SD	M	SD	
Experiment 1					
<i>Movement with effect</i>	0.97	0.8	0.34	0.5	<.001
<i>Movement with no-effect</i>	0.42	0.8	0.38	0.6	.8
<i>No-movement with effect</i>	-0.03	0.8	0.12	0.5	.26
Experiment 2					
<i>Horizontal outward</i>	0.98	1	0.42	0.6	<.001
<i>Forward-backward</i>	0.52	0.7	0.81	0.7	.05

The ANOVA revealed a main effect of the Type of acquisition, $F(2, 105) = 10.6$, $p < .01$, $\eta_G^2 = 0.12$, $\eta_p^2 = 0.17$. The mean discrepancy (both axes combined) between the locations of crosses during pre-test and during post-test was statistically different for the three conditions. LSD Post-hoc analysis reveals that the difference of discrepancy between the *movement with effect* condition (0.65cm) and the *movement with no-effect* condition (0.4cm) tended to statistical significance ($p < .06$). The discrepancy between the *movement with effect* condition (0.65cm) and the *no-movement with effect* condition (0.05cm) was statistically different ($p < .01$). The discrepancy between the *movement with no-effect* condition (0.4cm) and the *no-movement with effect* condition (0.05cm) was statistically different ($p < .01$). We also observed a main effect of the Axis factor, $F(1, 105) = 5.2$, $p < .03$, $\eta_G^2 = 0.02$, $\eta_p^2 = 0.05$: the discrepancy between the locations of crosses during pre-test and during post-test was larger on the X-axis (M = 0.45cm) than on the Y-axis (M = 0.28cm). At last, the most interesting result was the interaction observed between Axis and Type of acquisition factors, $F(2, 105) = 9.9$, $p < .01$, $\eta_G^2 = 0.06$, $\eta_p^2 = 0.16$. LSD post-hoc analysis reveals that there was a significant difference between X (0.97cm) and

Y axes (0.34cm) for the *movement with effect* condition ($p < .01$), but there was no significant difference between both axes for the *movement with no-effect* condition (Mean X = 0.42cm and Mean Y = 0.38cm; $p = .8$) nor for the *no-movement with effect* condition (Mean X = -0.03cm and Mean Y = 0.12cm; $p = .24$).

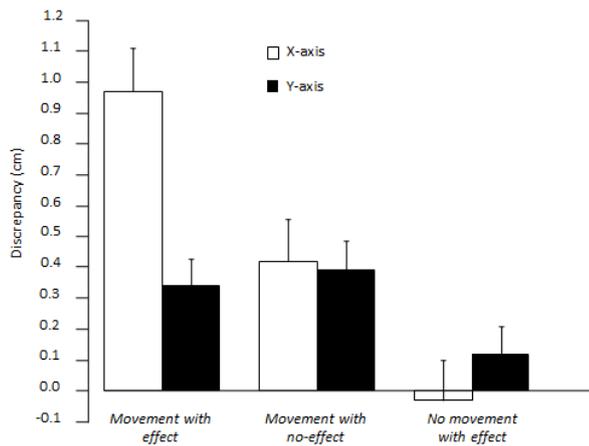


Figure 4. Mean discrepancies (cm) for X-axis and Y-axis for the three conditions of experiment 1. The bars represent standard errors.

Interim discussion

The goal of this first experiment was to test the boundary conditions in which an ideomotor mechanism can impact the effect representation. We investigated the influence of large arm movements vs lateralized key-press responses on the spatial representation of the sensory effect associated to it. We also investigated if arm movements specifically influence the representation of action effect, or if they influence the representation of the whole situation independently of a bidirectional R-E association.

We conducted two analyses on the tone locations reported by the participants, one on absolute values and another one on discrepancies between the locations of crosses during pre-test and during post-test.

The absolute values analysis showed a significant main effect of the Axis factor: the

locations of crosses were globally more distant from the sheet center for X-axis than for Y-axis. This effect is due to the specific feature of our answer sheets format – an A4 paper presented in landscape orientation.

Regarding the goals of this experiment, the first important result concerns the comparison of the two R-E ideomotor procedures (i.e., the *movement with effect* and the *no-movement with effect* conditions). In line with our main hypothesis we observed that the *movement with effect* condition led to representational change according to the movement axis (for both analyses). We observed a statistical difference between the X and Y coordinates of the crosses location between pre-test and post-test. When subjects had to perform horizontal outward arm movements associated with tone effects the representation of these tone effects was shifted accordingly to the performed movements: participants enlarged their tone spatial representation more on the X axis than on the Y axis. In contrast, when participants did not perform any arm movement – a key press with no arm movement – the representation of the tone effects remained unchanged.

The second interesting comparison concerns the *movement with effect* and the *movement with no-effect* conditions. This comparison showed that movements had an impact on the spatial representation of the effect, and not on the representation of the whole situation. In other words, if movements and tones are not associated within an ideomotor procedure, then the spatial representation of the tones (only presented as stimuli during the pre and post-tests) do not reflect the characteristics of the movements. The statistical analysis revealed that the *movement with no-effect* condition led to non-specific changes on the spatial representation of the auditory items. Indeed, we did not observe any difference in the spatial representation of

the tone location on X or Y axis. In contrast, the *movement with effect* condition led to specific changes in the spatial representation of the effect (difference between the X and Y axis spatial representation). Nonetheless in both conditions (*movement with effect* and *movement with no-effect* conditions) we observed a global increase of the tone location on both X and Y axes, as compared to the *no-movement with effect* condition. Taken together, these results show that 1/movements had a global influence on the representation of the whole situation and 2/movements direction had a specific influence on the spatial representation of the action effect only when effects were associated to spatialized movements in an ideomotor procedure.

To conclude, these results show that in R-E ideomotor procedures the representation of action effect integrates the associated movement in its content, and that this integration leads to specific spatial changes in the effect representation according to movement direction: horizontal outward arm movements enlarge the spatial representation of the sensory effect along its horizontal axis. The question is now to determine to what extent this result can be generalized to other movement directions – as for example forward-backward movements. The goal of the following experiment is to investigate this last question and to highlight the dynamic character of the ideomotor bidirectional association. Our hypothesis is that the integration of the movement direction into the effect representation entails correlative change in its spatial components.

Experiment 2: Movement direction and the spatial representation of the action effect

This experiment was designed to test the dynamic character of the ideomotor bidirectional association. We claim that

variations in movement direction result in correlative changes in the spatial representation of its sensory effect. To test this hypothesis we used the procedure of the first experiment. The acquisition phase of this second experiment varied between two different conditions. For the first condition participants performed movements along the transverse axis (i.e. leftward and rightward movements). In the second condition participants performed movements along the anterior-posterior axis (i.e., forward and backward movements). The acquisition phase is drawn on the R-E corresponding mapping condition of the pre-experiment and on the *movement with effect* condition of experiment 1.

In sum we tested two identical ideomotor procedures in which two different types of movement orientations were performed. According to our hypothesis the spatial representation of the movement effects should be impacted in a horizontal outward direction (X-axis) for the *horizontal outward movements* group, while this spatial representation should be affected in a forward-backward direction (Y axis) for the *forward-backward movements* group.

Method

Participants. 96 students of the University of Paris-Nanterre (43 males, participants mean age 19.8 years old, SD 1.97), took part in this experiment. All had normal or corrected-to-normal vision and audition. Four experimenters managed 24 participants each in a randomized fashion. Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

Apparatus and stimuli. They were the same as in experiment 1, aside from the ghost stimuli and the response apparatus for the acquisition phase. These changes are justified by the fact that *forward-backward movements* condition

needs some adaptation in order to be compared to the *horizontal outward movements* condition.

Ghost symbols were the same size and shape as in experiment 1. They were white with a black contour line and displayed in their center digits of size 16. The first ghost symbol displayed digit 1, the second displayed digit 2, the third displayed digit 3 and the fourth displayed digit 4. The answer apparatus for both conditions comprised five squared 4x4cm buttons. For the *horizontal outward movements* group, a red button was located in the center of the desk length and at 8cm from its lower edge. The other four were covered with aluminum. If considering the center of the red button as a reference point with 0cm as X and Y coordinates, then the coordinates of the first button's center were -53cm, -5cm; the coordinates of the second button center were -53cm, 5cm; the coordinates of the third button center were 53cm, 5cm; and the coordinates of the fourth button center were 53cm, -5cm. If brought together, the four button centers were thus located on the four corners of a 106x10cm rectangle. Digits of font size 72 and blue color were displayed in the center of the buttons, corresponding to the digits displayed on the screen: 1 for the button at the lower-left space, 2 for the button at the higher-left space, 3 for the button at the higher-right space, and 4 for the button at the lower-right space. Their function was to indicate the subject where to press according to the instructions. For the *forward-backward movements* group, one button, colored in red, was located at the center of the apparatus: in the center of the desk length and at 19cm from its lower edge. The other four were covered with aluminum. If considering the center of the red button as a reference point with 0cm as X and Y coordinates, then the coordinates of the first button center were -3cm, -16cm; the coordinates of the second button center were -3cm, 16cm; the coordinates of the third button

center were 3cm, 16cm; and the coordinates of the fourth button center were 3cm, -16cm. If brought together, the four button centers were thus located on the four corners of a 32x6cm rectangle. Digits of font size 72 and blue color were displayed in the center of the buttons, corresponding to the digits displayed on the screen (as in the *horizontal outward movements* group: 1 for the button at the lower-left space, 2 for the button at the higher-left space, 3 for the button at the higher-right space, and 4 for the button at the lower-right space) in order to indicate the subject where to press according to the instructions.

Procedure. We used the same procedure divided in four phases as in experiment 1 (cf. Figures 2 and 3). Set-up, pre-test and post-test phase were similar. The only difference was that during the acquisition phase, participants had to move their hands to one of the four buttons positioned in front of them. For the first group, pressing a button corresponded to initiating a forward or backward movement, while for the second group pressing a button led to initiating a horizontal outward movement to the left or to the right. Subjects used both their hands to answer, the left hand for the left buttons (in response to ghosts with symbol 1 and 2) and the right hand for the right buttons (in response to ghosts with symbol 3 and 4). They were told to start from the red button located in the center, press the button matching the digit of the ghost, and return back to the center. As experiment 1 and in line with Koch and Hoffmann (2000)'s procedure, the acquisition phase thus followed this pattern: (1) A fixation cross was displayed during 500ms, followed by the "1" ghost. The subject made a movement with his left hand and received as a consequence a low-pitched tone in his left ear. He came back to the center button. (2) A fixation cross was displayed, followed by the "2" ghost. The subject made a movement with

his left hand and received as a consequence a high-pitched tone in his left ear. He came back to the center button. (3) A fixation cross was displayed, followed by the “3” ghost. The subject made a movement with his right hand and received as a consequence a high-pitched tone in his right ear. He came back to the center button. (4) A fixation cross was displayed, followed by the “4” ghost. The subject made a movement with his right hand and received as a consequence a low-pitched tone in his right ear. He came back to the center button. This sequence was repeated twelve times. A power analysis (conducted via G*Power Software, Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007, with Cohen’s recommendations, 1988), which assumed a medium effect size of 0.25 for the ANOVA with one between-subjects factors and one within-subjects factor (2 levels of signs as repeated measures), which interact together, indicated that a total of 46, 38 and 34 participants were required, respectively, to have a 90, 85, or 80 % power (a minimum required by Cohen, 1988) of detecting a significant effect at p value of 0.05. 48 subjects performed the horizontal outward condition and 48 performed the forward-backward condition (a total of 96 participants).

Data registered were the discrepancy in centimeters between the locations of crosses from the pre-test and the locations of crosses from the post-test on both axes.

Results

As for the other experiment, no error was made during the pre- and post-tests parts of the experiment.

We conducted our analysis with the discrepancies between pre-test and post-test crosses localizations. We conducted analysis with a mixed ANOVA: Axis (X, Y) factor was a within-participants measure and Movement direction (*horizontal outward movements* and *forward-backward movements*) was a between-

participants factor. Results are summarized in Table 2. The analysis revealed no main effect of the Movement direction factor ($p = .75$): discrepancy between the locations of crosses during pre- and post-test was globally the same for the *horizontal outward movements* condition (0.70cm) and for the *forward-backward movements* condition (0.66cm). Analysis also revealed no significant effect of the Axis factor ($p = 0.2$): discrepancy between the locations of crosses during pre- and post-test was globally alike for the X-axis (0.75cm) and for Y-axis (0.62cm). The important result obtained here was the interaction observed between Movement direction and Axis factors $F(1, 94) = 16.2, p < .01, \eta_G^2 = 0.07, \eta_P^2 = 0.15$. Post-hoc analyses revealed that the difference of discrepancy for the *horizontal outward movements* condition between X-axis (0.97cm) and Y-axis (0.42cm) was significant $F(1, 94) = 13.9, p < .01$. Similarly, for the *forward-backward movements* condition the difference of discrepancy between X-axis (0.52cm) and Y-axis (0.81cm) was quasi-significant $F(1, 94) = 3.9, p = .051$. The most interesting result was that the difference of discrepancy on the X-axis between the *horizontal outward movements* (0.97cm) and the *forward-backward movements* (0.52cm) conditions was significant $F(1, 94) = 6.9, p < .02$. Similarly, the difference of discrepancy on the Y-axis between the *horizontal outward movements* (0.42cm) and the *forward-backward movements* (0.81cm) conditions was significant $F(1, 94) = 8.4, p < .01$; see Figure 5. When participants performed horizontal outward movements during the acquisition phase, their tone localizations became enlarged on the X-axis more than on the Y-axis. Reversely, when participants performed forward and backward movements during the acquisition phase, their tone localizations became enlarged on the Y-axis more than on the X-axis.

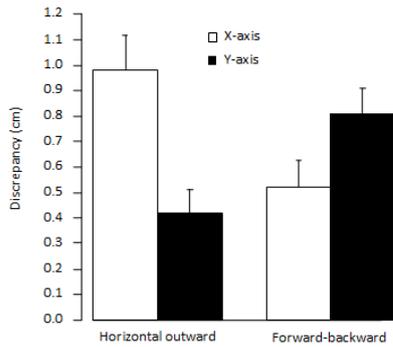


Figure 5. Mean discrepancies (cm) for X-axis and Y-axis for experiment 2 (horizontal outward and forward-backward movements). The bars represent standard errors.

Interim discussion

The goal of this second experiment was firstly to replicate results of experiment 1 for the *horizontal outward movements* condition. In the first experiment, during the acquisition phase one group of participants had to perform a horizontal outward arm movement triggering a specific tone effect (i.e., the *movement with effect* condition). As in experiment 1, horizontal movements entailed more changes on the horizontal dimension (X axis) than on the vertical one (Y axis) for the spatial representation of the action effects.

The main goal of this last experiment was to test our hypothesis about the influence of movement direction on the spatial representation of action effect. The analysis on the discrepancy between pre-test and post-test tone locations reported by participants revealed an interaction between the Movement direction and the Axis factor. This interaction indicates that when participants performed forward-backward movements they were subsequently more likely to locate the crosses more up and down on the sheets during the post-test phase than during the pre-test phase, and conversely participants who performed horizontal outward movements were more likely to locate their crosses more to the right and left edges of the sheets during the post-test phase than during

the pre-test phase. In sum, horizontal outward movements enlarge the spatial representation of action effect more on its horizontal spatial dimension (X axis) than on its vertical one (Y axis), whereas forward-backward movements enlarge its spatial representation more on its vertical dimension (Y axis) than its horizontal one (X axis). This is in line with our hypothesis according to which movements had an incidental consequence on the representational content of sensory movement effects: changes in the movement spatial properties entail correlative changes in the spatial representation of the sensory effects. As predicted this last experiment highlights the dynamic aspect of the R-E bidirectional association.

General discussion

In this paper we investigated how the spatial properties of movements affect the spatial representation of movement effects. This question was addressed under the scope of ideomotor theories. One of the core concepts of ideomotor theories is the bidirectional association between a movement and its sensory effect settled through their co-occurrence during all life span. One consequence of the bidirectional association is that any subsequent presentation of one event (action or action effect) will automatically trigger the activation of the other event. Many studies have shown that the motor components of the response are integrated into the action effect representation (Elsner & Hommel, 2001; Camus et al., 2017). Nevertheless, to the best of our knowledge none of them took interest in the consequences of this integration. Our study investigated this point by confronting two versions of the bidirectional association. If this association is passive, then movement properties should not be able to affect the representational content of the action effect. In this case the association would merely be a

reciprocal connection between two events where the activation of one triggers the activation of the other one. On the other hand, if the bidirectional association is dynamic, then changes in the movement properties should entail correlative changes in the representational content of the action effects. We tested both these possibilities in two experiments with an ideomotor procedure.

The first experiment showed that an ideomotor procedure featuring a simple index finger key press associated to auditory effects (*no-movement with effect condition*) does not entail changes in the spatial representation of these effects, as compared to an ideomotor procedure featuring a spatialized arm movement associated to the same auditory effects (*movement with effect condition*). We also observed that the same spatialized movements still had an influence on the spatial representation of auditory stimuli, even when these stimuli were not presented as the effects of these movements (*movement with no-effect condition*) – in other words, auditory stimuli were not part of an ideomotor association. Nevertheless, in this case movements had a *global* impact on the representation of the tones, which were reported as more distant after than before performing the movements. Only the condition displaying an ideomotor association between spatialized movements and tone effects (*movement with effect condition*) had a *specific* impact on the spatial representation of these tones: they became perceived as more enlarged on the X-axis than on the Y-axis. The second experiment confirmed that when a spatialized arm movement is associated to an auditory effect, the spatial representation of this effect is affected by movement properties. More precisely, and in line with our main hypothesis, this second experiment highlighted that movement direction entails correlative changes in the spatial representation of its associated

action effect. Horizontal outward arm movements strongly enlarged the spatial representation of movement effects on the X-axis, whereas forward-backward movements strongly enlarged the spatial representation of movement effects on the Y-axis.

More investigations need to be conducted in order to extend our results to other movement properties, such as range, strength, duration or fluency. Indeed, if movement properties entail changes in the representational content of action effects, then these properties should also impact action effects correlatively.

Our results invite to think that the ideomotor bidirectional association is more than a passive integration of the movement properties into the representation of movement effects. Instead, the ideomotor bilateral association is a dynamic integrative process, through which movements shape the way we represent the spatial properties of their effects. This last assumption is essential, because until now ideomotor theories have not investigated the consequences of the bilateral ideomotor association on the representation of the action effect yet. One reason for this shortage can be found in one of TEC's claims. According to this theory, only the distal aspect of an action effect is integrated with the action in a bilateral association. This means that action effects are only considered by TEC as already-spatialized *per se* and localized in the external world. Indeed, TEC assumes that the ideomotor mechanism is only at work with distal codes of action effects – as external expected outcomes. This explains why TEC have been putting aside the proximal aspect of sensory action effects in its studies – while not denying that such aspect exists. As Hommel specifies it himself (Hommel, 2009), TEC fails to explain how we attribute distal reference (perceptive experience in space) to proximal sensations (information received in the body by the different sensory

modalities): “Given the distal focus of TEC the theory does not address, and cannot explain, how the transition is made between proximal and distal representations”. This explains why many studies investigating the ideomotor mechanism use already-spatialized visual or auditory action effects (Pfister, Janczyk, Gressmann, Fournier, & Kunde, 2014; Badets & Rensonnet, 2015; Thébault, Michalland, Dérozier, Chabrier, & Brouillet, 2018). Some experimental results support this claim by showing that R-E compatibility effect arises within distal effects and not with proximal ones (Hommel, 1996; Pfister & Kunde, 2013; Osiurak, & Badets, 2014).

However, some recent studies highlight that proximal information actively participates to the selection of action (Pfister et al., 2014; Thébault et al., in press). For example, in line with Kunde (2001, experiment 1), Thébault et al. (in press) have shown that tactile vibrations with no spatial reference make it possible to observe ideomotor compatibility effects. They conclude that proximal information (delivered by touch and proprioception) are part of the ideomotor mechanism. In fact, as it was initially proposed by James in, ideomotor theory is always about the proximal information: action effects are nothing more and nothing less than raw sensory information. What our study suggests, in line with other studies about proximal information previously mentioned, is that the ideomotor bilateral association is actually what gives distal reference to a proximal information. Movements performed in space shape the space of their sensory effects.

This proposal is in line with the sensorimotor theory of perceptual experience (see O’Regan & Noë, 2001). This theory suggests that « *perceiving is a way of acting. Perception is not something that happens to us, or in us. It is something we do* » (Noë, 2004, p.1). Action is what constitutes and defines the

laws of perception: seeing is the ability to actively change our sensory impressions. In other words, the spatial properties of an object are shaped by sensorimotor contingency laws. In line with these assumptions, we can conclude that distal information is something *extracted* from the sensorimotor contingency laws. It is not something coded as an internal representation from an external world, independently of our body.

Our findings suggest that representations of action and action effects are not only related through simple co-occurrence, but that their association results in a distortion of the perceptual experience. In that respect, our results can also be interpreted under the scope of O’Regan and Noë (2001)’s theory. We can say that some sensorimotor contingency laws were formed by the repeated association between a movement direction and an auditory effect during the acquisition phase. These sensorimotor contingency laws led to change the perceptual experience previously highlighted during the set-up phase (see experiment 1 and 2 for the description of the different phases). This interpretation also echoes studies showing the crucial role of the body in perception (for example, see the own-body-size effect of Van der Hoort & Ehrsson, 2014; or the distortion of perception by motion by Veto, Einhäuser, & Troje, 2017), as well as studies supporting the Action Constraints Theories of space perception (ACT: see Morgado & Palluel-Germain, 2015), and studies claiming that the body we have and how it moves determines how we think and how we perceive (the body-specificity hypothesis: see Casasanto, 2009 and Casasanto & Chrysikou, 2011).

To conclude, more investigation needs to be done to highlight the dynamic influence of the bidirectional association on action effect representation. Nevertheless, our study opens a new way of investigation for ideomotor theory

because, as say by Stock and Stock (2004), “all representatives of the ideomotor hypothesis expressed themselves rather unspecifically on the contents of the idea of a movement” (2004, p.186). All the considerations presented here lead us to think that all ideas are built for and by the movement, in the sense that a stimulus is no more no less than a bilateral action-effect construct.

References

- Aschersleben, G., & Prinz, W. (1995). Synchronizing actions with events: The role of sensory information. *Perception & Psychophysics*, *57*(3), 305-317.
- Badets, A., Pesenti, M., & Olivier, E. (2010). Response-effect compatibility of finger-numeral configurations in arithmetical context. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(1), 16-22.
- Badets, A., & Rensonnet, C. (2015). Une approche idéomotrice de la cognition. *L'Année Psychologique*, *115*(4), 591-635.
- Camus, T., Hommel, B., Brunel, L., & Brouillet, T. (2017). From anticipation to integration: the role of integrated action effects in building sensorimotor contingencies. *Psychonomic bulletin & review*, <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1308-6>
- Casasanto, D. (2009). Embodiment of abstract concepts: good and bad in right- and left-handers. *Journal of Experimental Psychology, General*, *138*(3), 351-367.
- Casasanto, D. (2011). Different Bodies, Different Minds: The Body Specificity of Language and Thought. *Current directions in Psychological Science*, *20*(6), 378-383.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York: Routledge.
- Cooper, A.D., Sterling, C. P., Bacon, M.P., & Bridgeman, B. (2012). Does action affect perception or memory? *Vision Research*, *62*, 235-240.
- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., & Umiltà, C. (1999) Action for perception. A motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(6), 1673-1692.
- Deubel, H., & Schneider, W.X. (1996). Saccade target selection and object recognition: evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, *36*(12), 1827-1837.
- Eder, A. B., Rothermund, K., Houwer, J. D., & Hommel, B. (2015). Directive and Incentive Functions of Affective Action Effects. *Psychological Research*, *79*, 630-649.
- Elsner, B., & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*(1), 229-240.
- Esser, S., & Heider, H. (2017). Action-effects enhance explicit sequential learning. *Psychological Research*, <https://doi.org/10.1007/s00426-017-0883-5>
- Fagioli, S., Hommel, B., & Schubotz, R.I. (2007). Intentional control of attention: action planning primes action-related stimulus dimensions. *Psychological Research*, *71*(1) 22-29.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*, 175-191.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Hoffmann, J., Sebald, A., & Stöcker, C. (2001). Irrelevant response effects improve serial learning in serial reaction time tasks. *Journal of Experimental Psychology*.

- Learning, Memory, and Cognition*, 27(7), 470-482.
- Hommel, B. (1994). Effects of irrelevant spatial S-R compatibility depend on stimulus complexity. *Psychological Research*, 56(3), 179-184.
- Hommel, B. (1996). S-R Compatibility effects without response uncertainty. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49(3), 546-571.
- Hommel, B. (2004). Coloring an action: Intending to produce color events eliminates the Stroop effect. *Psychological Research*, 68, 74-90.
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, 73, 512-526.
- Hommel, B., Alonso, D., & Fuentes, L. (2003). Acquisition and generalization of action effects. *Visual Cognition*, 10, 965-986.
- Hommel, B., & Müsseler, J. (2006). Action-feature integration blinds to feature-overlapping perceptual events: evidence from manual and vocal actions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(3), 509-523.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a new framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-937.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. Cambridge: Harvard University Press.
- Kirsch, W., & Kunde, W. (2012). Visual Near Space Is Scaled to Parameters of Current Action Plans. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39, 1313-1325.
- Kirsch, W., & Kunde, W. (2014). Impact of planned movement direction on judgments of visual locations. *Psychological Research*, 78(5), 705-720.
- Koch, I., & Hoffmann, J. (2000). The role of stimulus-based and response-based spatial information in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 26, 863-882.
- Koch, I., & Kunde, W. (2002). Verbal response-effect compatibility. *Memory & Cognition*, 30(8), 1297-1303.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 387-394.
- Kunde, W. (2003). Temporal Response-Effect Compatibility. *Psychological Research*, 67, 153-159.
- Kunde, W., Hoffmann, J., & Zellmann, P. (2002). The impact of anticipated action effects on action planning. *Acta Psychologica*, 109(2), 137-155.
- Kunde, W., Koch, I., & Hoffman, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection, initiation, and execution of actions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 57(1), 87-106.
- Morgado, N., Gentaz, E., Guinet, E., Osiurak, F., & Palluel-Germain, R. (2013). Within reach but not so reachable: obstacles matter in visual perception of distances. *Psychonomic Bulletin and Review*, 20(3), 462-467.
- Morgado, N., & Palluel-Germain, R. (2015). How actions constrain the visual perception of space. In Y. Coello, & M. C. Fischer, *Foundations of Embodied Cognition: Perceptual and emotional embodiment* (Vol. 1, pp. 167-180). Hove: Psychology Press.
- Müsseler, J., & Hommel, B. (1997). Blindness to response-compatible stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 861-872.
- Nissen, M.J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning:

- evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, 19, 1-32.
- Noë, A. (2004). *Action in perception*. Cambridge: MIT Press.
- O'Regan, K. J., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939-973.
- Osiurak, F., & Badets, A. (2014). Pliers, not fingers: tool-action effect in a motor intention paradigm. *Cognition*, 130(1), 66-73.
- Pfister, R., Janczyk, M., Gressmann, M., Fournier, L., & Kunde, W. (2014). Good vibrations? Vibrotactile self-stimulation reveals anticipation of body-related action effects in motor control. *Experimental Brain Research*, 232, 847-854.
- Pfister, R., & Kunde, W. (2013). Dissecting the response in response-effect compatibility. *Experimental Brain Research*, 224, 647-655.
- Rieger, M. (2007). Letters as visual action effects in skilled typing. *Acta psychologica*, 126(2), 138-153.
- Rizzolatti, G., Riggio, L., & Sheliga, B. M. (1994). Space and selective attention. In C. Umiltà, & M. & Moscovitch, *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (pp. 231-265). Cambridge, MA: MIT Press.
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B., Umiltà, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: the SMARC effect. *Cognition*, 99(2), 113-129.
- Rüsseler, J., Münte, T.F., & Wiswede, D. (2018). On the influence of informational content and key-response effect mapping on implicit learning and error monitoring in the serial reaction time (SRT) task. *Experimental Brain Research*, 236(1), 259-273.
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, 136(6), 943-974.
- Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological Research*, 68, 176-188.
- Stöcker, C., Sebald, A., & Hoffmann, J. (2003). The influence of response--effect compatibility in a serial reaction time task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 56(4), 685-703.
- Thébault, G., Michalland, A.H., Dérozier, V., Chabrier, S., & Brouillet, D. (2018). When the vibrations allow for anticipating the force to be produced: an extend to Pfister et al. (2014). *Experimental Brain Research*, <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5190-x>
- van der Hoort, B., & Ehrsson, H. H. (2014). Body ownership affects visual perception of object size by rescaling the visual representation of external space. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76(5), 1414-1428.
- Veto, P., Einhäuser, W., & Troje, N. F. (2017). Biological motion distorts size perception. *Scientific Reports*, 7, 1-6.
- Wykowska, A., Schubö, A., & Hommel, B. (2009). How You Move Is What You See: Action Planning Biases Selection in Visual Search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(6), 1755-1769.
- Ziessler, M. (1998). Response-effect learning as a major component of implicit serial learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24(4), 962-978.
- Ziessler, M., & Nattkemper, D. (2001). Learning of event sequences is based on response-effect learning: Further evidence from a serial reaction task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(3), 595-613.

Table 1

Summary of results for the two experiments: cross positions in centimeters

Condition	<u>X-axis</u>					<u>Y-axis</u>				
	<u>Pre-test</u>		<u>Post-test</u>			<u>Pre-test</u>		<u>Post-test</u>		
	M	SD	M	SD	<i>p</i>	M	SD	M	SD	<i>p</i>
<hr/>										
Experiment 1										
<hr/>										
<i>Movement with effect</i>	7.4	1.8	8.4	1.2	<.001	5.5	1.9	5.8	1.1	<.001
<i>Movement with no-effect</i>	8.3	2	8.7	1.2	<.001	5.6	8	6	1.3	<.001
<i>No-movement with effect</i>	8.1	2.4	8.1	1.9	.82	4.9	2.7	5.1	1.9	.17
<hr/>										
Experiment 2										
<hr/>										
<i>Horizontal outward</i>	7.8	2.1	8.8	1.3	<.001	5.1	2.3	5.5	1.5	<.001
<i>Forward-backward</i>	7.3	1.8	7.8	1.2	<.001	5.4	2	6.2	1.2	<.001
<hr/>										

Table 2

Summary of results for the two experiments: discrepancies in centimeters

Condition	<u>On X-axis</u>		<u>On Y-axis</u>		<i>p</i>
	M	SD	M	SD	
<hr/> Experiment 1 <hr/>					
<i>Movement with effect</i>	0.97	0.8	0.34	0.5	<.001
<i>Movement with no-effect</i>	0.42	0.8	0.38	0.6	.8
<i>No-movement with effect</i>	-0.03	0.8	0.12	0.5	.26
<hr/> Experiment 2 <hr/>					
<i>Horizontal outward</i>	0.98	1	0.42	0.6	<.001
<i>Forward-backward</i>	0.52	0.7	0.81	0.7	.05

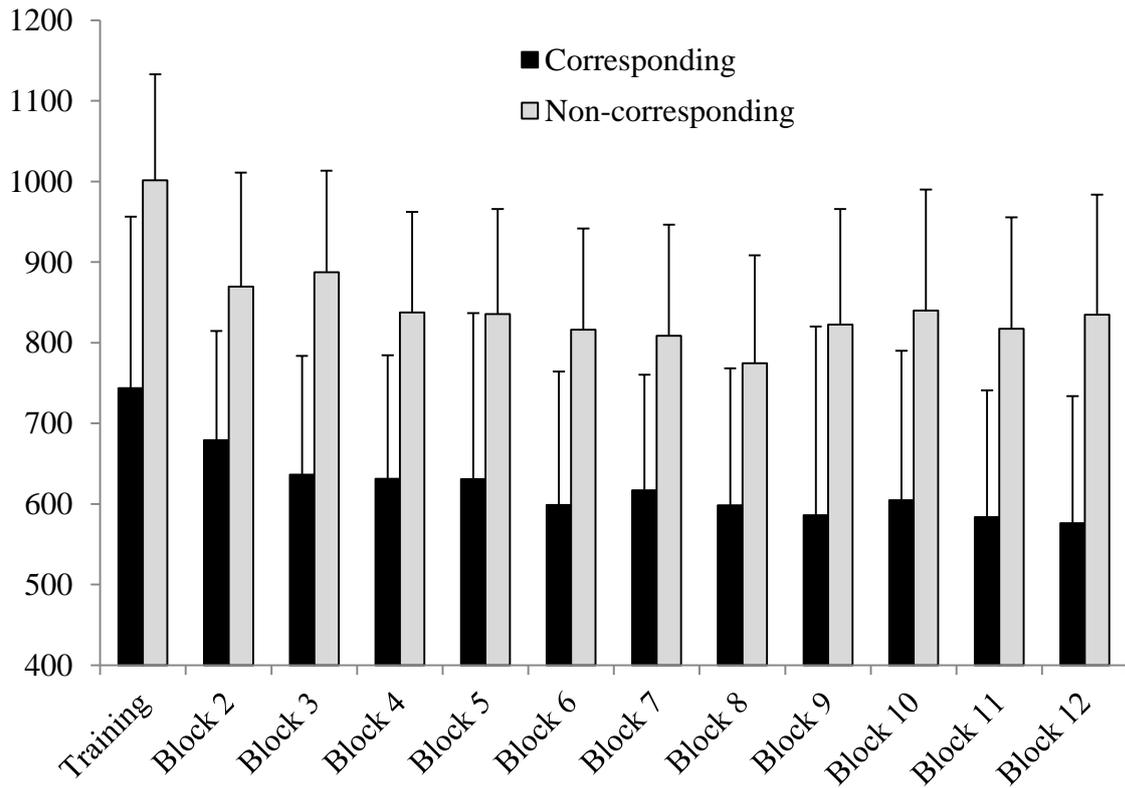


Figure 1. Results of the pre-experiment: RT in ms as a function of corresponding vs. non-corresponding R-E mappings and blocks. The bars represent standard errors.

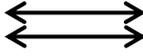
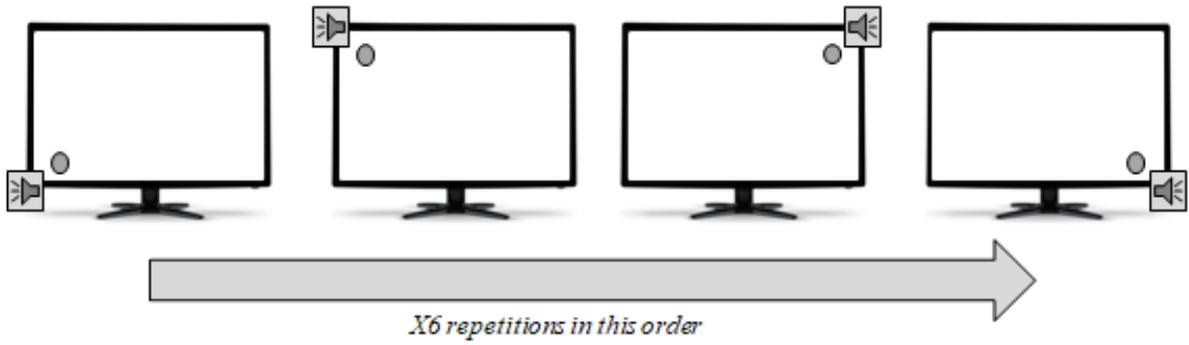
	<u>Experiment 1</u>			<u>Experiment 2</u>	
	<i>Movement with effect</i>	<i>Movement with no-effect</i>	<i>No-movement with effect</i>	<i>Horizontal outward</i>	<i>Forward-backward</i>
<i>Movement</i>	<i>Horizontal Outward</i> 	<i>Horizontal Outward</i> 	<i>Key press</i> 		
<i>Movement effect</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>

Figure 2. Variations in the acquisition phase for both experiments

Set-up phase: Visual-auditory associations



Pre- and Post-tests: Tone localization task

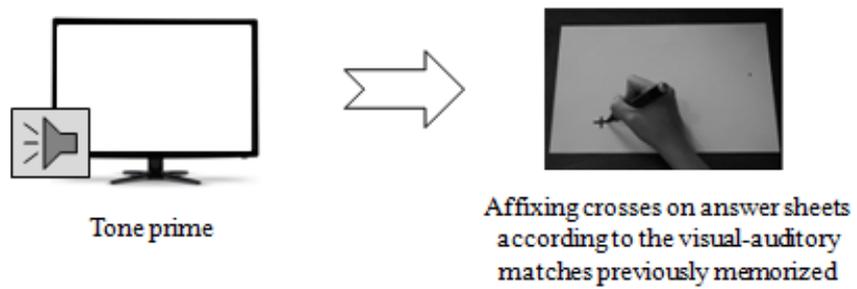


Figure 3. Illustration of the procedure for the set-up phase, and the pre- and post-tests phases.

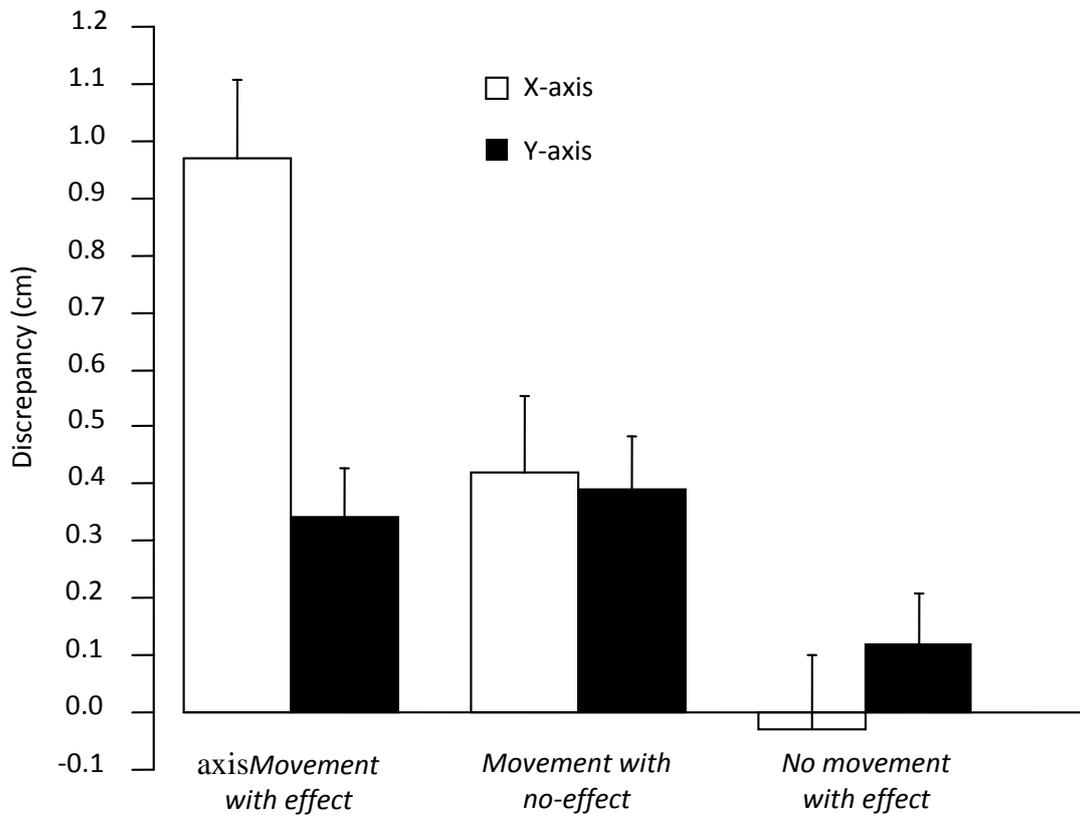


Figure 4. Mean discrepancies (cm) for X-axis and Y-axis for the three conditions of experiment 1. The bars represent standard errors.

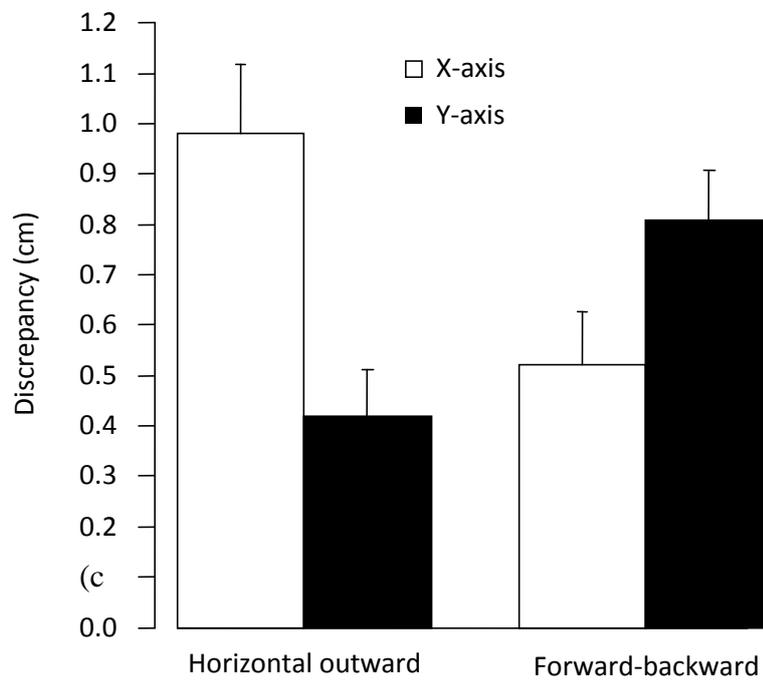


Figure 5. Mean discrepancies (cm) for X-axis and Y-axis for experiment 2 (horizontal outward and forward-backward movements). The bars represent standard errors.

2.2. Présentation de l'article (*short paper*) en attente d'envoi : Lestage, Coutté, Camus, et Brouillet. When sounds move in space: About the correlative variation between movements and the spatial representation of effects in an ideomotor association.

Les résultats obtenus dans notre première étude appuient l'idée que la représentation spatiale de l'effet d'un mouvement est influencée par le mouvement qui lui est associé. Autrement dit, l'association bidirectionnelle R-E est constitutive de la représentation spatiale de l'objet de perception. Cette représentation spatiale définit le caractère distal de l'objet. En ce sens, nos résultats valident notre hypothèse 1 selon laquelle l'association bidirectionnelle mouvement-effet sensoriel est constitutive du caractère distal de l'objet de perception. En effet, même si l'article 1 ne mentionne pas le champ de la substitution sensorielle et l'attribution distale pour des raisons de parcimonie (due aux exigences des publications expérimentales scientifiques), nous pouvons aisément interpréter nos résultats en ces termes. Dans nos expériences, des sons sont reçus en réponses à des mouvements et résultent en un changement perceptif de ces sons. Il s'agit donc du même procédé que dans la substitution sensorielle : l'appareil de substitution visuo-auditif The vOICe fonctionne grâce à des sons reçus en réponse aux mouvements de l'utilisateur avec la caméra. On a vu que dans la substitution sensorielle, à force d'être associées à ces mouvements les sensations proximales des sons deviennent distales et sont en ce sens rapportées à la perception d'objets dans l'espace. Nos expériences montrent qu'une association idéomotrice de type R-E peut provoquer un changement dans la perception distale des sons. En ce sens, l'association idéomotrice est donc responsable de la spatialisation de la perception et explique le passage du proximal au distal dans la substitution sensorielle.

De plus, nos résultats suggèrent que ce sont les propriétés spatiales du mouvement qui déterminent la distalité de l'objet perçu. De même que dans la substitution sensorielle les mouvements de la caméra sont spatialisés et corrélatifs des sensations reçues, dans nos expériences la modification de la perception de E est corrélative des propriétés physiques du mouvement. Une sensation proximale devient perceptivement « distalement » localisée à droite parce qu'elle a été associée à un mouvement orienté vers la droite.

Néanmoins, cet article ne s'intéresse qu'à une propriété du mouvement, l'orientation. L'article 2 a pour but de généraliser ces découvertes à une autre propriété du mouvement : l'amplitude. La procédure expérimentale suivie est la même que pour l'expérience 2 de l'étude 1. La variante introduite dans la phase d'acquisition concerne l'amplitude des mouvements sur les deux axes. Ainsi, dans une première condition, les mouvements sont effectués sur l'axe horizontal (cf. condition 1 de l'expérience 2 dans l'étude 1) et les mouvements nécessaires pour aller appuyer sur les boutons du haut ont une amplitude différente des mouvements nécessaires pour aller appuyer sur les boutons du bas. Dans la seconde condition, les mouvements sont effectués sur l'axe antéropostérieur (cf. condition 2 de l'expérience 2 dans l'étude 1) et les mouvements nécessaires pour aller appuyer sur les boutons de droite ont une amplitude différente des mouvements nécessaires pour aller appuyer sur les boutons de gauche. Nous nous attendons à ce que lors du post-test, les effets sonores ayant été associés aux mouvements d'amplitudes plus larges soient perçus comme plus éloignés dans l'espace que lorsqu'ils ont été associés aux mouvements d'amplitudes plus petites.

When sounds move in space: About the correlative variation between movements and the spatial representation of effects in an ideomotor association

Hélène Lestage¹, Thomas Camus², Alexandre Coutté¹, & Thibaut Brouillet¹

¹CeRSM laboratory (EA2931), Paris Nanterre University, 200 Avenue de la République, 92000 Nanterre, France. helene.lestage@gmail.com, +1 (778) 300-7902

²EPSYLON laboratory (EA 4556), Paul Valéry University, Route de Mende, 34090 Montpellier, France

Abstract: In this research, we examined whether and how a bidirectional ideomotor association between movements and their sensory effects could impact on the spatial representation of these sensory effects. We hypothesized and showed that constraining the orientation and range of movements in an ideomotor acquisition phase would change the localization of tone effects associated with these movements, correlatively to the movement constraints. In our experiment, subjects had to report the localization of tones before and after these tones had been associated with different types of movements. We compared a group where movements were performed on the horizontal axis to a group where movements were performed on the anterior-posterior axis. Moreover, we compared short to long-range movements. Results revealed tone localizations to be shifted correlatively to the axis and range of the movements they had been associated to. For example, tones associated with horizontal movements (rightward and leftward) during the acquisition phase were localized as more “to the right” and “to the left” after than before this phase. Similarly, results revealed tones associated with long-range movements to be localized as more enlarged in space than tones associated with short-range movements. This study replicates Lestage et al. (2018)’s findings and extends their result to another property of movement (range).

Keywords: ideomotor mechanism, bidirectional association, effect representation, movement

Introduction

Ideomotor theories highlight a bidirectional association taking place between performed actions and their sensory effects (see Elsner & Hommel, 2001; Kunde 2001; Stock & Stock, 2004; Shin, Proctor, & Capaldi, 2010; Badets & Rensonnet, 2015). When the same sensory effects follow the same movements repeatedly enough, movements and effects become associated into a common representational field. This assumption has been largely tested by many studies showing that action is unconsciously selected by its expected effect (Greenwald, 1970; Elsner & Hommel, 2001; Kunde, 2001; Badets, Pesenti, & Olivier, 2010; Camus, Hommel, Brunel, & Brouillet, 2017; Thébault, Michalland, Derozier, Chabrier, & Brouillet, 2018). If ideomotor theories have been successful in investigating how the idea of an action effect can be integrated as a mental cue to the response selection, their focus on action control leaves a question unanswered: how are the action effects represented in the mind? This question is important because it addresses a fundamental question about the bidirectional association. As mentioned by Lestage et al. (2018) ideomotor theories are unclear about this. Does the bidirectional association consist in *linking* movements and perceptive effect representations into a common representational field (as describe by TEC)? Or does the association consist in *integrating* movements and sensory effect components into a common perceptive representation of the effect?

In the first case (bidirectional association as a linking process), effects are understood as perceptual representations that refer to a distal event spatialized per se. In consequence the bidirectional association can be defined as a process linking movement and perceptual effect into a common representational field (see Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; and Hommel, 2009). In the second case (bidirectional association as an integrative process), effects are understood as a proximal sensory flow that has no distal reference per se. In consequence the bidirectional association can be defined as an integration of movement properties and proximal sensations into a common representation: the distal representation of the effect. In this case, spatial reference of the effect is given by the spatial component of the movement.

In line with Lestage et al. (2018), we investigated the consequences of the bidirectional association on the action effects representation to identify which one of these assumptions is valid.

Lestage et al (2018) showed that specific spatial constraints of subjects' movements in association with specific repeated sensory effects impact on the spatial representation of these sensory effects. In their experiments, subjects were asked to report before and after an acquisition phase tone localizations on answer sheets, depending on a previous set-up phase (e.g., participants were told to localize a high-pitched tone heard in the right ear at the top-right corner of a sheet). During a subsequent acquisition phase participants performed specific movements that triggered one of the tones heard during the set-up phase. Results revealed that

constraining movement characteristics during the acquisition phase impacted on the representation of these movement effects in a way that reflects these constraints. For example, subjects reported tones heard in the right ear as more “to the right” of the sheet after these tones had been associated to right horizontal outward movements than to forward-backward movements. Conversely, subjects reported tones as more “up” after these tones had been associated to forward-backward movements than to horizontal outward movements. Because the spatial representation of each sensory effect was affected in a correlative way by the spatial properties of the movements associated to them, Lestage et al. (2018)’experiments support the idea that the bidirectional ideomotor association led to integrate movement properties with proximal sensations in order to form the perceptive representation of the effect. Nevertheless, these experiments only tested one type of movement constraints: orientation. Movements were performed on the subjects’ horizontal axis (rightward and leftward movements) and on the anterior-posterior axis (forward and backward movements), on the subject’s transversal plane.

In the present study, we investigate the possibility to generalize the Lestage et al. (2018)’s finding to another component of movement. We manipulated two important factors of movement description: orientation and range. These factors are the main information required to know where to reach an object. They define the localization of objects in space with respect to the actor’s body. If action effects are spatially represented according to movement properties, we can expect the

range and orientation of movements to entail correlative changes in the spatial representation of the effect. For the range factor, we expect to show that sensory effects associated to long-range movements will be localized further in space than sensory effects associated to short-range movements. For the orientation factor, we expect to replicate Lestage et al. (2018)’s results.

General setting/method

Our experimental paradigm was based on Lestage et al. (2018)’s procedure. The design and the material used in this experiment are rigorously identical to Lestage et al (2018)’s ones. It was a pre-test-post-test experimental design. The experiment was divided in four phases: set-up, pre-test, acquisition, and post-test phases. Only the acquisition phase was different from Lestage et al. (2018) experiment because we manipulated different movement factors. Here we only present the fundamental information useful for understanding the experiment; for details read Lestage et al. (2018) and see figure 1 for a schematic representation.

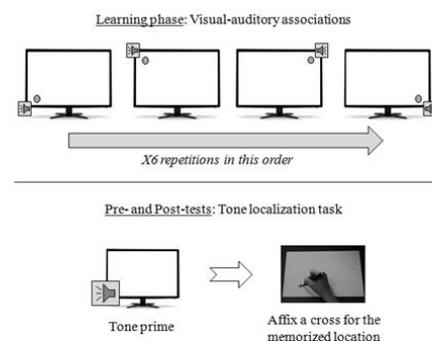


Figure 1. Illustration of the procedure for the learning phase, and the pre- and post-tests phases (from Lestage et al., submitted)

Participants. 96 students of the University of Paris-Nanterre (45 males, participants mean age 21.47 years old, SD 7.35) took part in the experiment. All had normal or corrected-to-normal vision and audition. Four experimenters managed 24 participants each in a randomized fashion. Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

Explicit tone-location set-up first phase.

Materials and procedure. In the set-up phase participants were asked to memorize four matches between spatial locations of visual stimuli and tones (“visual-auditory matches”). Visual stimuli were circles presented on the laptop screen, and tones were presented through a headset. In the first visual scene the circle was located in the lower-left space of the screen and was associated to a low-pitched tone heard in the left ear. In the second scene the circle was located in the upper-left space and was associated with a high-pitched tone heard in the left ear. In the third scene the circle was located in the upper-right space and was associated with a high-pitched tone heard in the right ear. In the fourth scene the circle was located in the lower-right space and was associated with a low-pitched tone heard in the right ear. Each tone and circle had 500ms duration. After a first presentation, the sequence of visual-auditory couplings was repeated five times. Participants were asked to memorize matches between the locations of visual stimuli and the locations of tones.

	Condition 1: horizontal outward movements		Condition 2: forward-backward movements	
	Configuration 1A	Configuration 1B	Configuration 2A	Configuration 2B
Movements				

Figure 2. Variations of movements in the acquisition phase.

Acquisition third phase. (see Figure 2)

Material for the horizontal movement condition. Answer apparatus comprised five squared 4x4cm buttons. One, colored in red, was located in the center of the desk’s length and at 13cm from its lower edge. The other four were covered with aluminum.

If considering the center of the red button as a reference point with 0cm as horizontal and vertical coordinates, then for a first configuration, the coordinates of first button’s center (bottom left, long range) were -53cm, -10cm; the second button’s coordinates (up left, sort range) were -10cm, 10cm; the third button’s coordinates (up right, sort range) were 10cm, 10cm; and the fourth button’s coordinates (bottom right, long range) were 53cm, -10cm. For a second configuration, the first button’s coordinates (bottom left, sort range) were -10cm, -10cm; the second button’s coordinates (up left, long range) were -53cm, 10cm; the third button’s coordinates (up right, long range) were 53cm, 10cm; and the fourth button’s coordinate (bottom right, sort range) were 10cm, -10cm. Digits of font size 72 and blue color were displayed in the center of the buttons, corresponding to the digits displayed on the screen (1 for the bottom left button, 2 for the upper left button, 3 for the upper right button, and 4 for the bottom right button) in order to

indicate the subject where to press according to the instructions

Material for anterior-posterior movement condition. As for condition 1, answer apparatus comprised five squared 4x4cm buttons. In condition 2, the red button was located at the center of the apparatus, still in the center of the desk's length, and at 19cm from its lower edge. The four remaining buttons were covered with aluminum.

If considering the center of the red button as a reference point with 0cm as horizontal and vertical coordinates, then, for a first configuration, the first button's coordinates (bottom left, short range) were -10cm, -3cm; the second button's coordinates (up left, short range) were -10cm, 3cm; the third button's coordinates (up right, long range) were 10cm, 16cm; and the fourth button's coordinates (bottom right, long range) were 10cm, -16cm. For a second configuration, the first button's coordinates (bottom left, long range) were -10cm, -16cm; the second button's coordinates (up left, long range) were -10cm, 16cm; the third button's coordinates (up right, short range) were 10cm, 3cm; and the fourth button's coordinates (bottom right, short range) were 10cm, -3cm.

Procedure. The aim of this phase was for participants to implicitly associate a specific movement with an auditory effect. We told participants that they were going to perform a distractive task consisting in a game where they had to "kill ghosts" as fast as possible. To do so, they had to match the digits displayed on the ghost symbols appearing on the laptop screen using the response button on the desk displaying the same digit. The ghost

symbols displayed the digits 1, 2, 3, or 4, corresponding to the digits displayed on the four buttons in front of the subject. Each time participants "killed" a ghost after matching its digit with the corresponding response button, it triggered one of the tones used in the set-up phase as a sensory action effect. Subjects used both their hands to answer, the left hand for the left buttons (1 and 2) and the right hand for the right buttons (3 and 4). We distinguished two movement conditions, corresponding to two groups of participants. For the first movement condition participants performed movements along the transverse axis (i.e. leftward and rightward movements) to press response buttons. Tones heard in the right ear were triggered by movements towards the right while tones heard in the left ear were triggered by movements towards the left. Moreover, long range movements triggered low-pitched tones while short range movements triggered high-pitched tones; this organization was inverted for half of the participant of this first movement condition. In the second movement condition participants performed movements along the anterior-posterior axis (i.e., forward and backward movements). High-pitched tones were triggered by forward movements while low-pitched tones were triggered by backwards movements. Moreover, long range movements triggered tones heard the right ear while short range movements triggered tones heard the left ear; this organization was inverted for half of the participants of this second movement condition. See Figure 2 for a schematic representation of the acquisition phase.

Pre- and post-test second and fourth phases: implicit measure of the action effect representation.

In the pre and post-test phases subjects were asked to transcribe the tone locations memorized during the set-up phase on answer sheets. They were primed with the same sequence of four tones. After each heard tone, their task was to affix a cross on the sheet in front of them according to the four visual-auditory associations they had memorized.

We registered the X and Y coordinates in centimeters of the center of each cross obtained during the pre- and post-test phases, according to an orthonormal coordinate system whose origin (the point where $X=0$ and $Y=0\text{cm}$) corresponded to the center of the A4 sheet in landscape orientation. To allow the comparison of the different locations of crosses, only the absolute values of the obtained numbers were considered. Data considered were the discrepancy in centimeters between the locations of crosses on the sheet at the pre-test and at the post-test on both axes. The discrepancy was thus obtained by subtracting the absolute values found during the pre-test to the absolute values found during the post-test.

A power analysis (conducted via G*Power Software, Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007, with Cohen's recommendations, 1988), which assumed a medium effect size of 0.25 for the ANOVA with one between-subjects

factors and two within-subjects factors (2 levels of signs as repeated measures), which would interact together, indicated that a total of 30, 26 and 24 participants were required, respectively, to have a 90, 85, or 80 % power (a minimum required by Cohen, 1988) of detecting a significant effect at p value of 0.05. 48 subjects performed the first condition, and 48 performed the second condition (a total of 96 participants – three times Cohen's recommendations).

Results

Regarding the error rate, no error was made during the pre-test and post-test parts of the experiment. All participants drew the crosses where expected according to the heard stimuli: low-left space of the sheet for low-pitched left tone, high-left space for high-pitched left tone, high-right space for high-pitched right tone and low-right space for low-pitched right tone.

To assess the effect of orientation and range-auditory associations on the post-test transcription of the tone locations, we conducted an analysis where we compared the discrepancy between cross locations from the pre-test to cross locations from the post-test, on both axes for the different orientations and ranges. The measured values were analyzed with a mixed ANOVA. Axis (X, Y) and Range (long, short) factors were within-participant measures, and Movement direction (horizontal outward movements and forward-backward movements) was a between-participants factor. Results are summarized in Table 1. See Figure 3 for a summary of results.

Table 1

Summary of results: discrepancies in centimeters between post-test and pre-test cross locations on the X and Y-axes

Condition	On X-axis				On Y-axis			
	Long range		Short range		Long range		Short range	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Horizontal outward	1.07	0.51	0.53	0.73	0.28	0.67	0.21	0.66
Forward-backward	0.42	1.36	0.25	0.85	0.99	0.77	0.5	0.63

The analysis revealed no main effect of the Axis factor ($p = .23$): discrepancy between the locations of crosses during pre- and post-test was globally alike for the X-axis (0.57cm) and for Y-axis (0.49cm). Analysis also revealed no significant effect of the Movement direction factor ($p = 0.92$): discrepancy between the locations of crosses during pre- and post-test was globally the same for the horizontal outward movements condition (0.52cm) and for the forward-backward movements condition (0.53cm). The ANOVA revealed a main effect of Range, $F(1, 94) = 17.2, p < .001, \eta_G^2 = 0.04, \eta_p^2 = 0.15$. Discrepancy was more important for long-range movements (0.68cm) than for short-range movements (0.37cm). The analysis also revealed a significant interaction between Movement direction and Axis, $F(1, 94) = 44.7, p < .006, \eta_G^2 = 0.09, \eta_p^2 = 0.32$. Post-hoc analyses revealed that the difference of discrepancy on the X-axis between the horizontal outward movements (0.8cm) and the forward-backward movements (0.33cm) conditions was significant, $F(1, 94) = 9.6, p < .01$. Similarly, the difference of discrepancy on the Y-axis between the horizontal outward movements (0.24cm) and the forward-backward movements (0.73cm) conditions was significant $F(1, 94) = 23.9, p < .01$. When participants performed horizontal outward movements during the acquisition phase, their tone localizations became enlarged on the X-

axis more than on the Y-axis. Reversely, when participants performed forward and backward movements during the acquisition phase, their tone localizations became enlarged on the Y-axis more than on the X-axis.

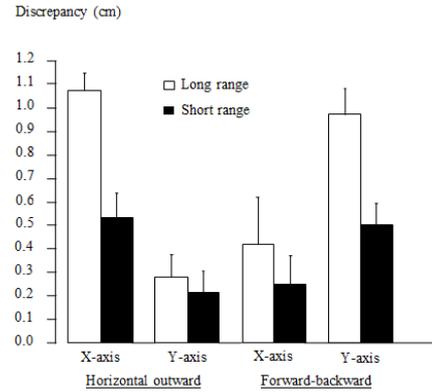


Figure 3. Mean discrepancies (cm) for long and short ranges on Y- and X-axes for experiments 1 (horizontal outward) and 2 (forward-backward). The bars represent standard errors.

The ANOVA revealed no significant interaction between Axis and Range factors, ($p = 0.56$). It also revealed no significant interaction between Movement direction and Range factors, ($p = 0.91$). The most interesting result is the three-ways interaction between Movement direction, Axis, and Range factors, $F(1, 94) = 7.24, p < .008, \eta_G^2 = 0.07, \eta_p^2 = 0.02$. When tones were associated to movements performed horizontally outwards, the difference observed between long and short ranges was significant only on the X-axis (long-range movements = 1.07cm; short-range movements = 0.53cm), $F(1, 94) = 11.8, p < .001$. The difference did not appear on the Y-axis (long-range movements = 0.28cm; short-range movements = 0.21cm), $p = 0.64$. The reverse pattern of result is observed when tones were associated to movements performed forward-backward. The difference observed between long and short ranges was this time significant only

on the Y-axis (long-range movements = 0.97cm; short-range movements = 0.5cm), $F(1, 94) = 11.76$, $p < .001$. The difference did not appear on the X-axis (long-range movements = 0.4cm; short-range movements = 0.25cm), $p = 0.3$.

Discussion

The goal of this experiment was firstly to replicate Lestage et al.'s findings showing that movements specifically influence the representation of action effect in a bidirectional ideomotor association. This finding is indeed revealed in our analysis by the significant interaction between Movement direction and Axis factors: first of all, this result reveals that tones are localized as more "enlarged" after following spatialized movements, as shown by the positive difference between post-test and pre-test cross positions. More precisely, this result shows that tones are represented as more "to the right" and "to the left" after having been associated with outwards horizontal movements, while tones are represented as more "upward" and "downward" after having been associated with forward-backward movements. This replicates Lestage et al. findings and highlights the specific influence of movement physical constraints on the spatial representation of movement effects.

The other aim was to extend this finding to another movement property: the range of movements. According to our expectations, results revealed a main effect of the range factor, meaning that tones associated with long-range movements were localized as more enlarged in space than tones associated with short-range movements. Importantly, the influence of

the range factor only manifested itself on the movement axis where this range has been taking place: the difference between tone localization associated to long and short-ranges is only significant on the X-axis for the horizontal outward condition, and on the Y-axis for the forward-backward condition. This suggests that the bidirectional ideomotor association impacts on the effect representation by integrating all movement properties accordingly to their spatial organization in the subject's external space. The fact that movement direction has a global influence as well as a specific influence (i.e: tone localization is globally enlarged on both axes as well as specifically more enlarged on the axis where the movement took place) can then be explained by the double property of movements direction: it displays at the same time the property of being outwards (external) *and* on a certain axis. The bidirectional association takes place accordingly to these two properties.

Lastly, we would like to stress that most studies falling within an ideomotor approach actually use very few types of movements. More often than not, tasks consist in pressing response buttons lateralized on a computer keyboard. Movements are thus not really spatialized. Yet if an ideomotor mechanism is really at stake in everyday life, it involved a varieties of movements deployed in space. Franklin and Tversky (1990) suggest the influence of physical properties of the body on the localization of objects. They present and test a model of mental rotation called the "spatial framework" accounting for the perception of object localization depending on body position. Similarly, some studies (see Quesque et al., 2017; and Coello & Iachini, 2016) have shown that

near-body space is perceived according to different laws than distant space. Longo and Laurenco (2007) suggest that the limit defining these two spaces could depend on the arm length: near-space becomes more extended when the arm is longer. Put together with our results, these findings suggest that physiological and anatomical constraints applied to movement structure the perceptual space.

Altogether, our study supports a dynamic approach of the bidirectional association. Indeed, our results show that the effect representation is changed by the bidirectional association. Movement properties repeatedly followed by tones have modified the spatial representation of these tones. This suggests that sensations are not spatialized in the external space by themselves. Their distal reference is acquired through their integration with the movement spatial component.

References

- Badets, A., Pesenti, M., & Olivier, E. (2010). Response–effect compatibility of finger–numeral configurations in arithmetical context. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63* (1), 16-22.
- Badets, A., & Rensonnet, C. (2015). Une approche idéomotrice de la cognition. *L'Année Psychologique*, *115* (3), 591-635.
- Camus, T., Hommel, B., Brunel, L., & Brouillet, T. (2017). From anticipation to integration: the role of integrated action-effects in building sensorimotor contingencies. *Psychonomic bulletin & review*.
- Coello, Y., & Iachini, T. (2016). Embodied perception of objects and people in space: toward a unified theoretical framework. In Y. Coello & M. Fischer, *Foundations of embodied cognition: Perceptual and Emotional Embodiment*. Hove: Psychology Press.
- Elsner, B., & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27* (1), 229-240.
- Hommel, B. (1998). Perceiving one's own action - and what it leads to. Dans J. S. Jordan, *Systems theories and a priori aspects of perception* (pp. 143-179). Amsterdam: Elsevier Science.
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, *73*, 512-526.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a new framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 849-937.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27* (2), 387-394.
- Lestage, H., Camus, T., Dru, V., Brouillet, T. (under reviews). How movements shape the spatial representation of their effects: about the dynamic character of the ideomotor bidirectional association, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Quesque, F., Ruggiero, G., Mouta, S., Santos, J., Iachini, T., & Coello, Y. (2017). Keeping you at arm's length: Modifying peripersonal space influences interpersonal distance. *Psychological Research*, *81*, (4), 709-720.

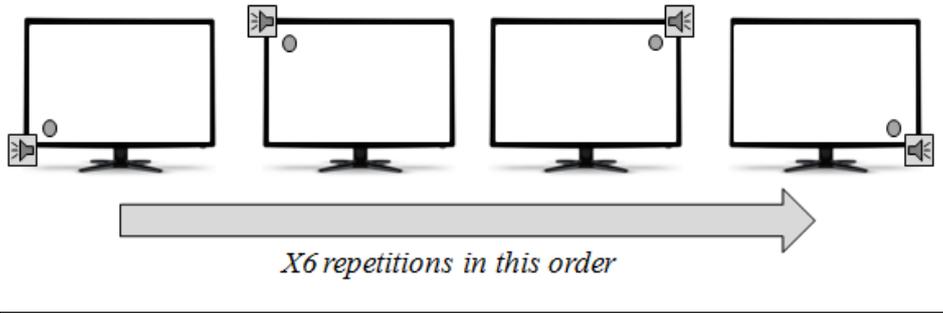
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, 136 (6), 943-974.
- Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological Research*, 68, 176-188.
- Thébault, G., Michalland, A.H, Derozier, V, Chabrier, S, & Brouillet, D. (2018). When the vibrations allow for anticipating the force to be produced: an extend to Pfister et al. (2014). *Experimental Brain Research*. doi: 10.1007/s00221-018-5190-x.

Table 1

Summary of results: discrepancies in centimeters between post-test and pre-test cross locations on the X and Y-axes

Condition	<u>On X-axis</u>				<u>On Y-axis</u>			
	Long range		Short range		Long range		Short range	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
<i>Horizontal outward</i>	1.07	0.51	0.53	0.73	0.28	0.67	0.21	0.66
<i>Forward-backward</i>	0.42	1.36	0.25	0.85	0.99	0.77	0.5	0.63

Learning phase: Visual-auditory associations



Pre- and Post-tests: Tone localization task



Figure 1. Illustration of the procedure for the learning phase, and the pre- and post-tests phases (from Lestage et al., submitted)

	<u>Condition 1: horizontal outward movements</u>		<u>Condition 2: forward-backward movements</u>	
	Configuration 1A	Configuration 1B	Configuration 2A	Configuration 2B
<u>Movements</u>				

Figure 2. Variations of movements in the acquisition phase.

Discrepancy

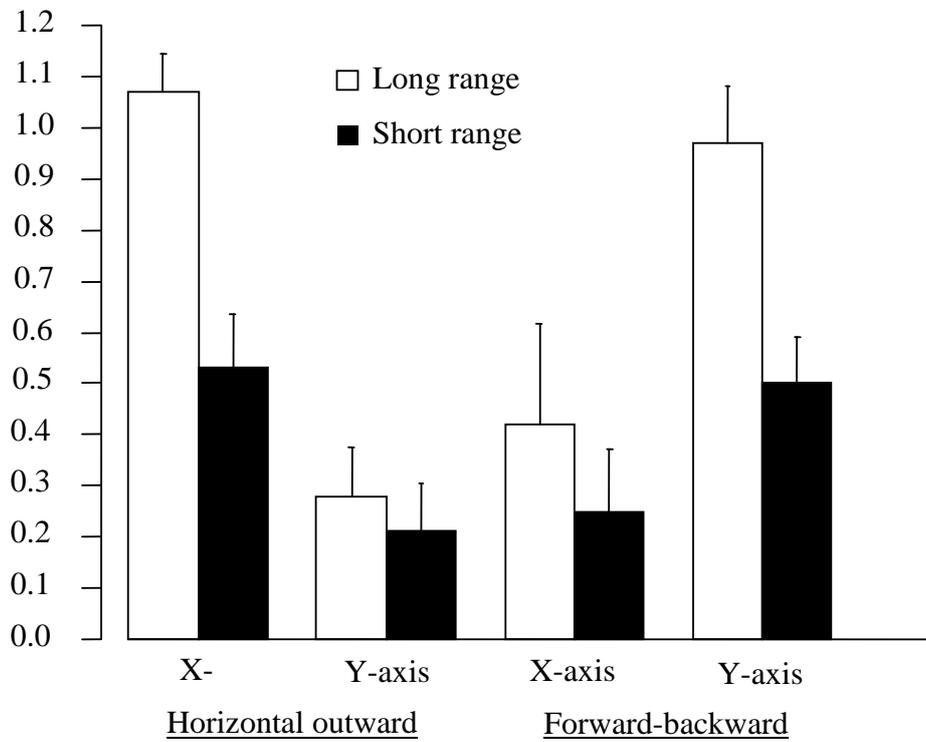


Figure 3. Mean discrepancies (cm) for long and short ranges on Y- and X-axes for experiments 1 (horizontal outward) and 2 (forward-backward). The bars represent standard errors.

3. Discussion

SYNTHESE DE NOS ETUDES ET LIMITES

1. Résumé

Cette thèse avait pour principal objet d'étude la genèse de la perception spatiale tridimensionnelle à travers l'étude du processus attribution distale. Comment attribuons-nous des dimensions distales à nos sensations proximales ? Quel rôle joue le mouvement et ses conséquences sensorielles dans ce processus ? Comment les propriétés spatiales du mouvement peuvent-elles rendre compte de la façon dont nous construisons un monde de perceptions en trois dimensions ?

Les philosophes empiristes du XVIIIème siècle, par leur investigation du problème de Molyneux, suggéraient déjà que la perception de l'espace est une construction cognitive nécessitant un temps d'apprentissage pour laquelle le mouvement a un rôle crucial. Les résultats obtenus par l'utilisation d'appareils de substitution sensoriels semblent confirmer cette proposition : des individus non-voyants peuvent acquérir une perception des objets à distance grâce à des appareils transcrivant des enregistrements d'images en impulsions tactiles ou encore en sons. Lors du processus d'apprentissage, un changement soudain prend place dans la perception de l'individu : celui-ci passe d'une perception des sensations proximales reçues par le dispositif (impulsions tactiles, sons) à la perception des objets à distance dans l'environnement. Ce processus dit d'attribution distale est notre principal objet d'investigation.

Les études développées autour de la compréhension des processus mis en jeu par l'utilisation de dispositif de substitution sensorielle s'inscrivent le plus souvent dans le cadre des théories sensorimotrices de la perception (O'Regan & Noë, 2001 ; O'Regan, Myin, & Noë, 2005 ; Hurley & Noë, 2003 ; Lenay et al., 1997 ; Lenay, 2006). Ces théories établissent que l'attribution distale ne prend place que lorsque le sujet, immergé dans la situation offerte par le dispositif, peut effectuer des mouvements auto-générés. Selon elles ces mouvements

font partie d'un processus sensorimoteur obéissant à des lois de contingences entre la spécificité des déplacements effectués et les retours sensoriels provoqués par la position et les caractéristiques de l'objet à percevoir. Les théories sensorimotrices soulignent également le rôle central de la proprioception dans l'attribution distale. Néanmoins, certaines ambiguïtés demeurent : les contingences sensorimotrices en jeu dans l'attribution distale sont-elles inférées à un niveau cognitif ou implantées à un niveau physique ? Autrement dit, est-il question d'un processus abstrait ou incarné ? Quel est le rôle de l'objet de perception et de celui de l'appareil de couplage sensorimoteur dans ce processus ?

Les théories sensorimotrices mettent l'accent sur l'importance de contingences existantes entre mouvements et sensations pour qu'un processus d'attribution distale prenne place, mais elles n'expliquent pas vraiment comment une perception distale en émerge. Autrement dit, elles nous renseignent sur les conditions nécessaires et préalables pour que le sujet vive l'expérience d'une perception distale mais elles restent plus évasives sur la façon dont ces contingences peuvent structurer un espace de perception tridimensionnelle.

L'une des ambitions théoriques de cette thèse était d'unifier les théories sensorimotrices et les théories idéomotrices sur la base des questions soulevées par l'étude de l'attribution distale. Les théories idéomotrices (Stock & Stock, 2004 ; Shin, Proctor, & Capaldi, 2010 ; Badets & Rensonnet, 2015) sont des théories du contrôle moteur qui s'intéressent principalement aux liens qui unissent le mouvement et ses effets perceptifs. Elles stipulent que la répétition du lien entre des mouvements et des conséquences sensorielles récurrentes génère une association bidirectionnelle entre ces deux entités. Ainsi, la présentation ultérieure de l'effet ou l'activation d'une image anticipatoire de l'effet a pour conséquence d'activer automatiquement le mouvement auquel cet effet a été associé. Si ces théories fournissent un bon cadre interprétatif du contrôle de l'action, elles sont toutefois moins enclines à rendre compte des processus par lesquels une perception distale se construit. En effet, elles ne considèrent la perception que comme perception de stimuli distaux existant préalablement dans le monde extérieur au sujet. Les conséquences sensorielles de nos actions ne sont toujours considérées qu'en relation à ces stimuli localisés dans l'environnement et aux mouvements. La question de comment les effets des mouvements sont perçus est laissée de côté. Or, si les théories idéomotrices ne se posent pas de question sur le statut perceptif des effets nous pensons qu'elles font l'impasse sur un aspect important concernant la perception : le processus d'attribution distale. Dans cette thèse nous avançons l'hypothèse que l'on peut

rendre compte de la perception distale par l'étude du processus bidirectionnel explicité par les théories idéomotrices. Toutefois, l'étude des conséquences perceptives de ce processus nous oblige à nous confronter à l'hétérogénéité des théories idéomotrices. En effet, la théorie originale jamesienne de l'idéomoteur présente une version profondément incarnée de l'association bidirectionnelle entre mouvements et conséquences sensorielles, tandis que la version plus moderne TEC (Theory of Event Coding) postule que cette association se joue à un niveau cognitif abstrait où les représentations des perceptions et des actions partagent des codes communs. Ces codes communs font référence à un niveau distal du traitement de la perception et de l'action, en opposition à un niveau proximal. Cette distinction entre différents niveaux de traitement et la focalisation de TEC sur le niveau distal a pour conséquent la définition des codes communs comme abstraits. L'étude de l'attribution distale nous invite à introduire la distinction entre sensations et perceptions dans les théories idéomotrices et à revisiter ainsi la distinction établie par TEC entre proximal et distal. Par définition, toute sensation est proximale et toute perception est distale. C'est l'apport principal de la substitution sensorielle aux théories idéomotrices : les effets proximaux de l'action (les sensations) diffèrent de la perception distale de ces effets. L'interprétation sensorimotrice des résultats de la substitution sensorielle nous invite à penser que le passage de l'un à l'autre est sous-tendu par un processus d'attribution distale où l'espace physique des mouvements imprègne les conséquences sensorielles jusqu'à leur attribuer leur caractère perceptif et donc distal. Autrement dit, les propriétés spatiales du mouvement associées à des conséquences sensorielles définissent les propriétés spatiales de la perception de ces conséquences sensorielles.

Les théories idéomotrices, au regard de la substitution sensorielle, nous conduisent à avancer l'hypothèse que les propriétés spatiales du mouvement modifient le flux des événements sensoriels qui les accompagnent, et que ces modifications participent à l'attribution de propriétés spatiales et distales aux sensations reçues. Autrement dit, le statut *perceptif* de l'effet comme objet distal est le résultat de l'association bidirectionnelle idéomotrice entre les propriétés spatiales du mouvement et ses conséquences sensorielles proximales. De plus, nous avançons l'idée que la perception tridimensionnelle est structurée par l'espace dans lequel les mouvements prennent place. Nous percevons l'espace en trois dimensions car nos mouvements modifient le flux de sensations selon ces trois dimensions.

D'autre part, nous avons aussi testé l'hypothèse selon laquelle les modifications de la perception distale de l'effet sont corrélatives au plan et à l'axe sur lequel les variations des propriétés spatiales du mouvement ont lieu. Autrement dit, l'influence du mécanisme idéomoteur sur la perception distale peut être prédite par les propriétés physiques des mouvements qui l'ont constituée.

Préalablement à nos études, nous avons mené une pré-expérience dans le but de vérifier que nos protocoles mettaient bien en jeu un mécanisme idéomoteur. Reprenant la procédure de Kunde (2001) et Koch et Hoffmann (2000), nous avons comparé des temps de réponse de sujets dans deux situations : compatibilité spatiale entre réponses et effets sensoriels (mapping R-E correspondant : un mouvement vers la droite entraîne un son entendu dans l'oreille droite et un mouvement vers la gauche entraîne un son entendu dans l'oreille gauche) et incompatibilité (mapping R-E non-correspondant : un mouvement vers la droite entraîne un son entendu dans l'oreille gauche et un mouvement vers la gauche entraîne un son entendu dans l'oreille droite). Les situations de mapping R-E correspondant entraînent les temps de réponse les plus rapides. L'analyse des résultats confirme ainsi qu'une association idéomotrice est effectivement en jeu dans notre protocole. Fort de cette constatation, nous avons utilisé le paradigme expérimental de cette pré-expérience comme phase d'acquisition dans nos procédures suivantes. Tous nos protocoles suivaient un design expérimental pré-post test. Durant les phases pré- et post-tests, les sujets avaient pour tâche de reporter la localisation de sons en apposant des croix sur des feuilles de réponse. Nous avons utilisé quatre sons, organisés de manière orthogonale selon leur fréquence (aigue et grave) et leur latéralité (son entendu dans l'oreille droite ou dans l'oreille gauche). Nos expériences avaient pour but d'observer l'évolution de la localisation de ces sons entre les phases pré et post-tests, en fonction de la phase d'acquisition ayant eu lieu entre ces deux phases. Pour cela, nous mesurons la position du centre de chaque croix – correspondant à la localisation des sons – sur chaque feuille. L'analyse des résultats s'effectuait avec la distance en centimètres, pour chaque son, entre le centre de la croix apposée lors du pré-test et le centre de la croix apposée lors du post-test, sur les axes horizontal et vertical suivant un plan orthonormé.

Une première expérience (article 1, expérience 1) a permis d'observer qu'un mécanisme idéomoteur peut influencer la perception spatiale des effets des mouvements. Un premier groupe de sujets était soumis à une phase d'acquisition lors de laquelle des mouvements effectués sur l'axe horizontal du plan transversal (vers la droite et vers la gauche) avaient pour

effet des sons spatialement compatibles : des sons entendus dans l'oreille droite suivaient les mouvements effectués vers la droite et des sons entendus dans l'oreille gauche suivaient les mouvements effectués vers la gauche (condition avec mouvements et effets sonores). Un second groupe était soumis à une phase d'acquisition sans mouvements spatialisés : les sujets devaient appuyer sur des touches de réponses sans avoir à effectuer de déplacement (condition sans mouvements avec effets sonores). Ces deux premiers groupes étaient donc exposés à des phases d'acquisition idéomotrices. Un troisième groupe était soumis à une phase d'acquisition non-idéomotrice, lors de laquelle les mêmes mouvements étaient effectués mais ne provoquaient aucun son (condition avec mouvements sans effets sonores).

L'analyse des résultats a révélé une distorsion de la représentation spatiale des sons pour les conditions une et trois : les croix correspondant à la localisation des sons étaient apposées davantage vers l'extérieur de la feuille lors du post-test – après la phase d'acquisition – que lors du pré-test. En revanche, le premier groupe (condition idéomotrice avec mouvements et effets sonores) présente une distorsion de la perception spatiale des sons davantage marquée sur l'axe horizontal que pour le troisième groupe (condition non-idéomotrice avec mouvements sans effets sonores) : les croix correspondant à la localisation des sons étaient davantage apposées vers les bords droits et gauches de la feuille lors du post-test pour le premier groupe. Cet impact unique du mécanisme idéomoteur confirme que l'attribution distale dans la substitution sensorielle peut être le résultat d'un mécanisme idéomoteur où mouvements et effets font émerger une perception spatiale particulière. L'analyse des résultats n'a révélé aucun impact de la phase d'acquisition sur la localisation des sons pour le second groupe (condition idéomotrice sans mouvements avec effets sonores) : les croix correspondant à la localisation des sons sont apposées en moyenne aux mêmes positions lors du pré-test que lors du post-test. Ceci suggère que la spatialisation du mouvement est indispensable à l'attribution distale. Autrement dit, la spatialisation du mouvement est un élément essentiel du mécanisme idéomoteur pour expliquer la distalité de la perception.

Une fois établie l'influence du mécanisme idéomoteur sur l'attribution distale, nous avons voulu tester notre hypothèse selon laquelle l'influence de ce mécanisme sur la perception des effets pouvait être prédite par la direction des mouvements (article 1, expérience 2). Pour cela, nous avons comparé deux groupes effectuant chacun un type de mouvement différent lors de la phase d'acquisition. Pour le premier groupe les mouvements

effectués étaient contraints sur l'axe horizontal du plan transversal : les mouvements vers la droite étaient associés à des sons entendus dans l'oreille droite et les mouvements vers la gauche à des sons entendus dans l'oreille gauche. Pour le second groupe, les mouvements effectués étaient contraints sur l'axe antéropostérieur du plan transversal : les mouvements vers l'extérieur étaient associés à des sons aigus et les mouvements vers soi à des sons graves. L'analyse des résultats a révélé une distorsion de la localisation des sons dans la direction horizontale pour le premier groupe : les croix correspondant à la localisation des sons étaient davantage apposées vers les bords droits et gauches de la feuille de réponse lors du post-test pour le premier groupe que pour le second groupe. A l'inverse, nous avons observé une distorsion de la localisation des sons dans la direction verticale pour le second groupe : les croix correspondant à la localisation des sons étaient davantage apposées vers les bords hauts et bas de la feuille de réponse lors du post-test pour le second groupe que pour le premier groupe. Cette interaction confirme que l'influence du mécanisme idéomoteur sur la perception des effets peut être prédite par la direction des mouvements.

Notre deuxième étude a répliqué et généralisé ce dernier constat en montrant que les contraintes des mouvements n'impliquent pas uniquement la direction sur laquelle ils sont effectués, mais également leur amplitude. Nous avons comparé deux conditions dans lesquelles les sujets devaient effectuer des mouvements sur l'axe horizontal (condition 1) ou sur l'axe antéropostérieur (condition 2) de leur plan transversal, de même que pour l'expérience 2 de l'article 1. La différence introduite dans la procédure de l'étude 2 était que pour les mouvements contraints sur l'axe horizontal (condition 1), les mouvements à effectuer pour atteindre les boutons de réponses les plus hauts avaient une amplitude différente des mouvements à effectuer pour atteindre les boutons de réponses les plus bas. Pour les mouvements contraints sur l'axe antéropostérieur (condition 2), les mouvements à effectuer pour atteindre les boutons de réponses à droite avaient une amplitude différente des mouvements à effectuer pour atteindre les boutons de réponses à gauche.

L'analyse des résultats a confirmé l'interaction entre les facteurs Axe (X, Y) et Orientation du mouvement (horizontal, antéropostérieur) déjà observée dans l'expérience 2 de l'article 1. Pour les mouvements contraints sur l'axe horizontal lors de la phase d'acquisition, lors du post-test les participants localisaient les sons comme plus éloignés spatialement sur l'axe X que sur l'axe Y que lors du pré-test. A l'inverse, pour les mouvements contraints sur l'axe antéropostérieur lors de la phase d'acquisition, lors du post-test les participants

localisaient les sons comme plus éloignés spatialement sur l'axe Y que sur l'axe X que lors du pré-test. Les résultats ont également révélé un effet principal significatif de l'amplitude : les effets sonores associés à des mouvements de grande amplitude lors de la phase d'acquisition ont été localisés comme plus éloignés dans l'espace que les effets sonores associés à des mouvements de petite amplitude. Ceci confirme nos attentes concernant l'impact des propriétés physiques du mouvement sur la spatialisation des effets qui lui sont associés. De plus, l'analyse des résultats a également révélé une interaction à trois niveaux entre les facteurs Orientation (horizontal, vertical), Amplitude (mouvements longs, mouvements courts) et Axe (X, Y). Cette interaction signifie que lorsque les effets sonores étaient associés à des mouvements horizontaux lors de la phase d'acquisition, la différence observée entre les sons associés à des mouvements d'amplitude longue et les sons associés à des mouvements d'amplitude courte était significative uniquement sur l'axe X ; la différence n'apparaît pas sur l'axe Y. On observe la configuration inverse pour les effets sonores associés aux mouvements antéropostérieurs. La différence observée entre les sons associés à des mouvements d'amplitude longue et les sons associés à des mouvements d'amplitude courte était cette fois-ci significative uniquement sur l'axe Y et non significative sur l'axe X. Autrement dit, l'influence de l'amplitude ne s'est manifestée que sur l'axe du mouvement où cette amplitude a été contrainte. Cela souligne à quel point l'organisation spatiale des mouvements a une influence spécifique sur l'organisation spatiale de la perception distale.

2. Limite des interprétations

Plusieurs remarques peuvent être adressées à nos études. Nous laissons de côté les aspects déjà abordés dans les discussions des articles.

2.1. Les biais de demande dans les expériences sur la perception

Tout d'abord, on peut évoquer la possibilité d'un biais de demande expérimentale pour expliquer nos résultats. Ce biais fait référence à la possibilité d'expliquer certains résultats obtenus par la volonté (qui peut être inconsciente) des sujets à valider ou infirmer l'hypothèse expérimentale qu'ils perçoivent. Il a en effet été reproché à un grand nombre d'études étudiant le rôle du mouvement sur des estimations spatiales de présenter un tel biais (cf. Morgado & Palluel-Germain, 2015, pp.175-176). Par exemple, dans l'étude de Proffitt (2006), les

participants auraient pu juger les pentes comme plus raides en portant un sac sur le dos simplement car ils auraient deviné ce qui était attendu d'eux et auraient souscrit à cette attente – leur perception de la pente ne serait alors pas affectée directement. Durgin et al (2009) ont ainsi reproduit l'expérience de Proffitt en modifiant les informations préalables données aux sujets (« cover story ») : il leur était donné une raison pour laquelle ils devaient porter le sac à dos. Dans cette condition, les sujets portant un sac à dos ne jugeaient plus les pentes comme plus raides par rapport aux sujets ne portant pas de sac à dos. Les auteurs concluent que le poids porté ne faisait pas « percevoir » les pentes différemment mais était part d'un biais de demande expérimentale.

En ce qui concerne nos expériences, nous avons plusieurs éléments de réponse à cette critique. Premièrement, nous avons demandé aux sujets à chaque fin de passation ce qu'ils pensaient être le but de l'expérience qu'ils venaient de réaliser. Aucun d'entre eux n'a été capable de formuler nos hypothèses – les seules réponses obtenues évoquaient l'impact éventuel des couleurs des fantômes. Ainsi, nous pouvons affirmer qu'aucun biais *conscient* de demande expérimentale ne peut expliquer nos résultats. Deuxièmement, si l'on admet que le biais expérimental est effectivement un facteur explicatif dans l'ensemble de nos protocoles, alors cela implique de la part des sujets d'avoir inconsciemment conçu l'idée que des propriétés spatiales des mouvements peuvent avoir un impact sur la perception spatiale. Etant donné le caractère non intuitif de cette hypothèse, on peut supposer qu'une conception inconsciente du phénomène et sa manifestation dans le comportement des sujets implique que le phénomène en question soit effectivement intégré dans les processus cognitifs. Autrement dit, la manifestation inconsciente de la connaissance du phénomène implique dans une certaine mesure la validité du phénomène. Troisièmement, si le changement de localisation des sons entre le pré et le post-test peut être interprété en termes de biais de demande, comment expliquer alors qu'un décalage soit observé sur Y pour la condition où les mouvements ont lieu sur l'axe horizontal et sur X pour la condition où les mouvements ont lieu sur l'axe antéro-postérieur ? Comme suggéré par la condition « sans mouvements avec effets sonores » de l'expérience 1 (étude 1), ce décalage ne peut pas être dû à un effet pré-post test, mais est bien attribuable au mouvement et à ses propriétés.

2.2. Processus perceptifs ou processus de mémoire ?

Une autre critique concerne la possible explication des résultats obtenus en termes de mémoire, et non de perception comme nous l'affirmons. Autrement dit, les processus manifestés seraient des processus mémoriels et non perceptifs.

Some researchers have proposed that the effects of action constraints on visual perception reflect memory biases rather than perceptual ones (e.g., Blaesì & Bridgeman, 2015; Cooper et al., 2012). They argued that in some action-constraint studies the participants could not directly see the spatial properties that they had to estimate or were looking away from it when they made their estimations. Consequently, their estimations had a memory component, which was confounded with the perceptual and other postperceptual processes that influence the spatial estimations. (Morgado & Palluel-Germain, 2015, p.174)

Dans nos expériences, les phases de pré-test et de post-test engagent effectivement des processus mnésiques puisque la tâche des sujets implique de se rappeler des correspondances apprises en début d'expérience lors de la phase de mémorisation. L'impact de l'association idéomotrice et des propriétés spécifiques des mouvements pourrait donc être un impact sur la mémoire perceptive, non sur la perception elle-même. Mais comme l'affirment Morgado et Palluel-Germain, dans une perspective incarnée de la cognition la distinction entre perception et mémoire est une distinction artificielle et insignifiante. En effet, l'approche incarnée de la mémoire est une approche intégrée selon laquelle la perception et la mémoire impliquent les mêmes processus sensorimoteurs et sont fonctionnellement équivalents. La perception est définie dans ce cadre comme mémoire de traces sensorimotrices (la mémoire du contenu sensoriel des expériences passées).

From an embodied and situated perspective, processes like memory and perception are based on the same sensorimotor system, resulting possibly in functional equivalence in the processing of present and absent stimuli (e.g., Rey, Riou, & Versace, 2014; Riou, Rey, Vallet, Cuny, & Versace, 2014; Versace, Vallet, Riou, Lesourd, Labeye, & Brunel, 2014). It is thus difficult to distinguish between perceptual and memory effects. (Ibid.)

Cette approche est compatible avec notre interprétation : percevoir les effets d'un mouvement implique l'évocation d'une association bidirectionnelle mouvement-effet

préalablement apprise. De plus, pour les théories idéomotrices l'image anticipatoire des conséquences de l'action n'est jamais présente dans la vision du stimulus : elle est une trace mnésique associée au stimulus, une « représentation ». En cela les théories idéomotrices sont des théories de la mémoire. Cette remarque justifie notre choix d'utiliser le terme de « représentation » et non de « perception » des effets dans nos articles. En effet, selon nous, les deux dimensions cognitives que sont la perception et la mémoire ne devraient pas être distinguées – elles réfèrent aux mêmes processus et aux mêmes phénomènes. Les théories idéomotrices n'étant pas considérées comme des théories de la perception, nous avons choisi de nous adapter à leur vocabulaire. De plus, le terme de « perception » pour les théories idéomotrices est avant tout associé à la perception *des stimuli*, or notre intérêt étant centré sur la perception *des conséquences sensorielles* des mouvements, le terme de « représentation » nous a permis de lever une possible confusion pour les lecteurs propres à ce champ.

1.2.3. Mouvements réalisés ou imaginés ?

Notre dernière remarque constitue sans doute la limite la plus importante de notre investigation. Il s'agit de savoir à quel point les mouvements dans le mécanisme idéomoteur ont besoin d'être effectivement réalisés. Qu'en est-il de l'impact de mouvements observés (vus ou entendus), ou même imaginés ? Autrement dit, quels résultats auraient été obtenus si, lors de la phase d'acquisition, les sujets avaient observé quelqu'un d'autre effectuer la tâche, ou s'ils avaient eu pour consigne d'imaginer les mouvements plutôt que de les effectuer véritablement ? Il s'agit de savoir si la cinématique du mouvement a effectivement un rôle dans le mécanisme idéomoteur. Nous prévoyons d'investiguer cette question plus en avant à travers un protocole expérimental présenté dans la section « projets futurs » de cette partie discussion.

Suivant la même idée, nos futures études devraient s'attacher à préciser la définition du mouvement dans le contexte idéomoteur. Tout d'abord, il s'agira de prendre en compte d'autres propriétés du mouvement que la direction et l'amplitude. Par exemple, on pourra considérer le facteur de la vitesse d'un mouvement (mouvement lent versus mouvement rapide), sa hauteur (nous n'avons testé que le plan transversal), ou encore sa force (mouvement contraint par un poids versus mouvement fluent). De plus, il s'agira de généraliser un mouvement engageant le bras à d'autres parties du corps (jambe, tête...) et au corps entier. En effet, hors du contexte expérimental les mouvements corporels impliquent l'ensemble du corps.

3. Perspectives théoriques

Nous avons suggéré que le processus idéomoteur s'inscrit dans les théories sensorimotrices et peut expliquer l'attribution distale. Par là, il permet de répondre à la question du passage d'un monde extérieur au monde intérieur de l'esprit et rend compte de la genèse de la perception spatiale tridimensionnelle. Cet apport est néanmoins conditionné par la redéfinition des théories idéomotrices et de son vocabulaire. La version des théories idéomotrices permettant de répondre à notre question de recherche est une version profondément incarnée, où la distinction entre sensations et perceptions remplace celle entre proximal et distal. Toute tentative de définition du mécanisme liant sensations et effets en termes abstrait est vouée à l'échec. Cependant, la question du degré d'incarnation à adopter demeure. Nous positionnons-nous dans une version incarnée modérée où perception et action sont en interaction, ou dans une version incarnée radicale où perception et action sont identiques ? Afin d'ouvrir des pistes de réponse à cette question, nous proposons de faire appel aux percées théoriques proposées par le constructivisme.

Cette thèse soutient que la perception distale est une propriété émergente des liens mouvements-sensations et peut être modulée par ce lien. Au-delà des théories de la cognition incarnée et située, cette affirmation inscrit notre thèse dans une perspective constructiviste telle que défendue par Von Foerster (e.g 1949, 2002) ; voir Segal 1990, Bateson (1972), Glasersfeld (2001), Piaget (1967), et Watzlawick (1984)⁴³.

L'idée centrale du constructivisme est que la réalité est une croyance construite par l'individu à partir de ses expériences sensorimotrices. Par « réalité », on entend un monde extérieur objectif tel que « représenté » par nos perceptions. Le point de départ du constructivisme est la remise en cause de la notion traditionnelle de causalité. Cette notion traditionnelle peut être schématisée par une flèche horizontale menant d'une cause A à un effet B : $A \Rightarrow B$; par exemple, un mouvement (A) cause un effet sensoriel (B). Or, cette définition est extrêmement restrictive dans la mesure où elle réduit la causalité à la seule *causalité efficiente*. Aristote propose une approche beaucoup plus riche de la causalité. Il distingue la cause matérielle (le bois peut être la cause matérielle d'une table), de la cause formelle (la forme de rectangle apposée sur quatre pieds est la cause formelle de la table), de

⁴³ Le débat concernant la possibilité ou impossibilité d'une analogie entre énoncé et constructivisme ne nous intéresse pas dans le cadre de cette thèse. Nous considérons ici que les deux champs, qu'ils s'inscrivent l'un dans l'autre ou soient différents, ont des apports communs quant à notre problématique.

la cause efficiente (tout ce qui a amené à la construction de la table, de l'ingénieur au bâtisseur, est sa cause efficiente) et de la cause finale (la table a pour cause finale de pouvoir soutenir des objets). La causalité efficiente est donc une forme d'explication selon laquelle la cause *précède* toujours l'effet, tandis qu'on peut dire que la cause finale intervient quand l'effet *précède* la cause. « Chaque fois que vous employez le mot « parce que », vous parlez le langage de la causalité efficiente. Chaque fois que vous employez l'expression « afin de », vous parlez le langage de la causalité finale. » (Segal, 1990). La causalité finale invite à dépasser la schématisation horizontale $A \Rightarrow B$ pour inclure la rétroactivité que la cause finale invite à prendre compte. Cette causalité circulaire est bien celle que nous défendons ; le mécanisme idéomoteur en est une application directe : de la causalité mouvements \Rightarrow effets, nous parvenons à la boucle rétroactive liant mouvements et effets.

Les contingences sensorimotrices sont définies comme boucles rétroactives. Mais ces boucles ne sont pas les éléments isolés d'un système : elles s'inscrivent dans un corps, un environnement, un contexte et interagissent entre elles pour former de nouvelles boucles, de nouvelles relations causales circulaires. La réalité émerge de ces boucles. Dans cette optique, la perception distale dans la substitution sensorielle est une émergence des boucles sensorimotrices créées *via* le dispositif. Selon la même logique, la perception spatiale tridimensionnelle « normale » (*i.e.* non substituée) est une émergence des boucles circulaires établies par l'apprentissage sensorimoteur pré et post-natal consistant à lier des mouvements à des sensations. Comme postulent les constructivistes, « nous construisons la réalité plutôt que nous la découvrons » (Segal, 1990).

Cette affirmation épistémologique va de pair avec l'empirisme radical de James (1912). Cet empirisme est dit « radical » en ce que contrairement à l'empirisme « classique » anglais et écossais (de Hume, par exemple) il considère les relations entre les choses tout autant objets d'expérience que les choses elles-mêmes. Pour James, toute théorie se voulant holistique doit s'intéresser aux relations entre les éléments plutôt qu'aux parties.

James défend un empirisme qui est radical en ce que les relations entre les choses sont tout autant objets d'expérience que les choses elles-mêmes [...]. Pour une telle philosophie, les relations qui relient les expériences doivent elles-mêmes être des relations dont on fait l'expérience, et toute relation, de quelque type qu'elle soit, dont on fait l'expérience, doit être considérée comme aussi « réelle » que n'importe quoi d'autre dans le système. (Introduction à James, 1912, p.13)

Cette compréhension de la réalité comme émergence de relations plutôt que comme somme d'éléments est en accord avec nos hypothèses : la perception spatiale tridimensionnelle est une émergence à partir de relations idéomotrices et sensorimotrices, perception qui contient des propriétés de la relation (propriétés du mouvement et des sensations) mais s'en démarque.

De telles approches ne peuvent qu'inclure le corps et l'environnement dans l'investigation scientifique : s'intéresser aux relations dans une approche globale, c'est replacer l'esprit ou le cerveau dans le dynamisme de leur existence. Un cerveau n'est jamais une entité flottante dans l'air : replacé dans l'expérience, il n'est qu'une partie du corps de l'individu, individu toujours situé pour sa part dans un environnement, un contexte. C'est pourquoi constructivisme, empirisme et cognition incarnée et située partent du postulat que le centre de l'expérience n'est plus le cerveau, mais le corps actif et ressenti comme tel. C'est par ce corps actif et ressenti que la perception distale existe et se définit.

Enfin, cette approche globale nous permet de donner notre dernier mot sur les phénomènes évoqués dans cette thèse. Etudier l'action et la perception comme cycle et non comme deux entités séparées nous mène à différentes conclusions :

(1) Les sensations, données brutes de récepteurs physiologiquement inscrits dans le corps, sont à distinguer strictement de la perception, construction du monde par le sujet ;

(2) Le mouvement, déplacement d'un point à un autre dans l'espace, est à distinguer strictement de l'action, qui désigne un changement intenté d'un système sur un autre. Selon cette définition, tout mouvement involontaire (*e.g.* les réflexes) ne consiste pas en une action. Seuls les mouvements involontaires ayant été associés à des sensations au travers de boucles idéomotrices deviennent action dans l'environnement (puisque toute action a pour but de produire un effet). En revanche, toute action implique bien un mouvement. Même un acte purement « cérébral » consistant par exemple à se rappeler d'une liste de mot – et qui consiste en une action dans la mesure où un changement d'état est bien intenté par le système – implique des déplacements dans l'espace interne du corps, ne serait-ce que les mouvements du message nerveux qui se transmet via les réseaux neuronaux.

(3) Le mécanisme idéomoteur est un processus circulaire dont la perception émerge. Cette perception est émergente en ce qu'elle contient des caractéristiques du mouvement

(orientation, amplitude,...) et de la sensation – tout comme l'individu qui contient des caractéristiques héritées de ses parents mais fonctionne comme une entité distincte.

(4) Si l'on met ces définitions en perspective avec les théories de la cognition incarnée et située, on peut se demander si elles s'inscrivent dans une vision modérée où perception et action sont en interaction, ou dans une vision radicale où perception et action sont conçues comme identiques. Nous proposons une approche intermédiaire où la perception serait un genre d'action ; une manifestation spécifique de l'action. En effet, si l'on définit l'action comme tout changement intenté d'un système sur un autre, la perception est une forme d'action puisqu'elle consiste à construire une réalité par des boucles sensorimotrices où mouvements et sensations s'influencent réciproquement. Autrement dit, un système cognitif sensorimoteur agit sur le système de la réalité extérieure avec l'intention de donner un sens à cette réalité. Ceci étant dit, l'action est un concept bien plus large que la perception. Par exemple, on peut affirmer que le langage est une action : des ensembles de phonèmes formant un système lexical vont *agir* sur des croyances ou des comportements. Le raisonnement est une action : un acte de structuration de concepts. Plus largement tout processus cognitif volontaire est action. Le mouvement des tournesols en croissance vers le soleil est un type d'action : celle-ci est dirigée par l'intention du système à rechercher les meilleures conditions pour la photosynthèse. En conclusion, on peut dire que la perception est l'une des actions possibles sur le monde.

Nous pouvons maintenant apporter une réponse à notre question initiale : comment s'effectue le passage d'un monde extérieur objectif, palpable et avec des références communes, à un monde intérieur fluctuant, invisible et unique ? Comment passe-t-on de la matière à la pensée ? Et comment, par la pensée, peut-on agir avec un corps matériel sur ce monde extérieur ? Nous suggérons que la question du passage d'un monde extérieur au monde intérieur est en fait une mauvaise question : le véritable « passage » se fait dans l'autre sens. Ce sont nos sensations internes (mouvements, proprioception, modalités sensorielles) qui par leur enchaînement et les répétitions qu'elles créent, font émerger un monde extérieur. C'est donc d'un monde intérieur brut que des régularités émergent et construisent la perception d'un monde stable. Le « monde de l'esprit » n'est en ce sens aucunement différent d'un « monde matériel » – il s'agit de deux facettes d'une même réalité construite par l'individu. Cette perspective matérialiste permet alors de redéfinir la pensée comme un

ensemble de *relations* (au sens Jamesien) unissant des éléments matériels palpables, dévoilant ainsi la solution au mystère cartésien de la possibilité de l'action de l'esprit sur le corps.

OUVERTURE : PROJETS FUTURS

1. Tester d'autres propriétés du mouvement

L'un des défis à relever par notre hypothèse est d'arriver à montrer que d'autres types de propriétés des mouvements sont à prendre en compte dans la construction idéomotrice de la perception. Nous nous sommes intéressés à la direction et à l'amplitude. Afin d'étayer l'idée de la dépendance de la perception spatiale tridimensionnelle aux caractéristiques des mouvements, d'autres caractéristiques devraient être manipulées, telles que la durée, la hauteur ou encore la force. Au-delà de renforcer nos hypothèses, il s'agit de mieux cerner comment définir les contraintes des mouvements en jeu dans la construction de la perception. Plus exactement, il s'agit de préciser la définition du mouvement dans le contexte idéomoteur.

Alexandre Coutté et Thibaut Brouillet, de l'équipe « Emotion Cognition et Comportement » du Centre de Recherches sur le Sport et le Mouvement (CeRSM, Nanterre Université) travaillent actuellement sur un projet inspiré des travaux présentés dans cette thèse, visant à tester des contraintes de force des mouvements sur la perception des distances. L'expérience menée est similaire à la procédure expérimentale présentée dans nos études. Pour chacune des trois phases de l'expérience (la phase de mise en place est retirée), les participants avaient pour tâche de localiser des objets à distance dans l'espace grâce à différents sons. Quatre distances correspondaient à quatre types de sons différents ; plus l'objet était proche plus l'intensité des sons était élevée. Lors des phases de pré et post-tests, les participants localisaient la distance les séparant du son correspondant à l'objet à l'aide d'une règle graduée. Durant une phase test intermédiaire, chaque estimation de distance sur la règle graduée était précédée d'un mouvement exploratoire visant à toucher l'objet ainsi que du son correspondant à la distance de cet objet. Pour la moitié des sujets le son était produit par un mouvement nécessitant une grande force physique ; pour l'autre moitié il suivait un mouvement nécessitant une faible force physique. L'impact des contraintes physiques de la

force des actions était mesuré en comparant l'écart en centimètres entre les réponses données en pré-test et en post-test.

Le pattern de résultats obtenus est similaire à celui de l'expérience testant différentes amplitudes du mouvement : lorsque les mouvements de la phase intermédiaire sont de grande amplitude ou nécessitent une grande force physique, les participants ont tendance à estimer les sons comme plus éloignés dans l'espace que lorsque les mouvements sont de faible amplitude ou qu'ils nécessitent une faible force physique.

Ces résultats vont dans le sens de notre hypothèse et confirment que la perception spatiale tridimensionnelle est fortement tributaire d'un processus idéomoteur de nature sensorimotrice et profondément incarné.

2. Mouvement « réel » versus mouvement « imaginé »

Pour répondre à la question concernant le caractère véritablement moteur de l'association idéomotrice que nous avons évoquée plus haut, un projet est en cours de développement en collaboration avec l'Université de Colombie Britannique (Rob Whitwell et James Enn, Vision Lab, UBC, Canada).

Le but de ce projet est d'investiguer à quel point l'aspect « moteur » dans l'association idéomotrice est nécessairement motrice : la cinématique joue-t-elle vraiment un rôle ? Quatre groupes ont été testés sur un paradigme idéomoteur classique. Dans une première phase d'acquisition, des mouvements sont associés à des sons : des mouvements latéraux vers les extrémités droite et gauche de la table sont associés à des sons aigus tandis que des mouvements d'amplitude restreints vers des touches situées au centre du dispositif sont associés à des sons graves (ces associations sont contrebalancées pour la moitié des sujets) (cf.

Figure 29).

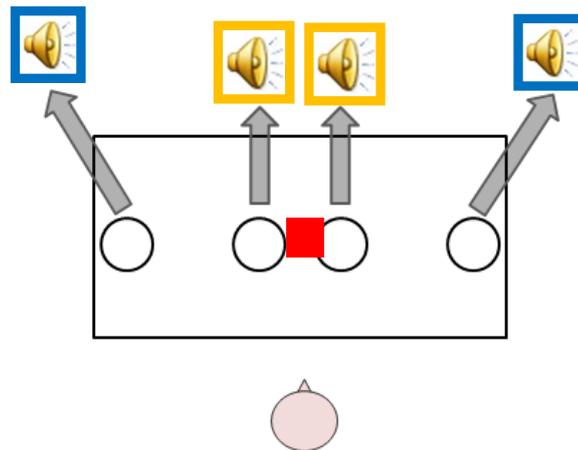


Figure 29 : schéma des associations mouvements-sons dans la phase d'acquisition. Le carré rouge représente le point de départ du mouvement. Le dispositif est vu d'en haut.

Un écran tactile est fixé au centre d'une table. L'expérience se déroule sur cet écran. Pour le premier groupe, la tâche des sujets est de faire glisser un doigt du point de départ à la touche de réponse (index de la main droite pour touches à droite et index de la main gauche pour touches à gauche). Une amorce indique au sujet vers quelle touche aller : flèche longue vers la gauche pour la touche à l'extrémité gauche, flèche courte vers la gauche pour la touche au milieu à gauche, flèche courte vers la droite pour la touche au milieu à droite et flèche longue vers la droite pour la touche à l'extrémité droite. Pour les deuxième et troisième groupes, la tâche des sujets est d'observer un individu faire la tâche et appuyer sur une touche située en face d'eux dès que l'individu fait une erreur (l'individu est un expérimentateur « complice » dont les erreurs ont été calibrées). Pour le deuxième groupe, le sujet est placé en face de l'expérimentateur et l'observe effectivement effectuer les mouvements. Pour le troisième groupe, la situation est la même mais une barrière occultant la scène a été placée entre les deux sujets. L'écran tactile a été divisé en deux (dans le sens de la longueur) de manière à ce que sujet et expérimentateur aient tous les deux accès aux mêmes stimuli à l'écran. Une « trace » amovible à l'écran suit les mouvements de l'expérimentateur lorsqu'il fait glisser son doigt, de manière à ce que le sujet puisse inférer ses mouvements à partir de la trace qu'il voit sur sa partie de l'écran. Dans un quatrième groupe, il n'y a plus d'individu effectuant la tâche. Les amorces des flèches à l'écran sont suivies par un flash dans l'une des quatre locations indiquant les touches de réponse et le sujet a pour tâche d'appuyer sur la

touche située en face de lui si la localisation flashée ne correspond pas à la localisation indiquée par la flèche (Cf. Figure 30).

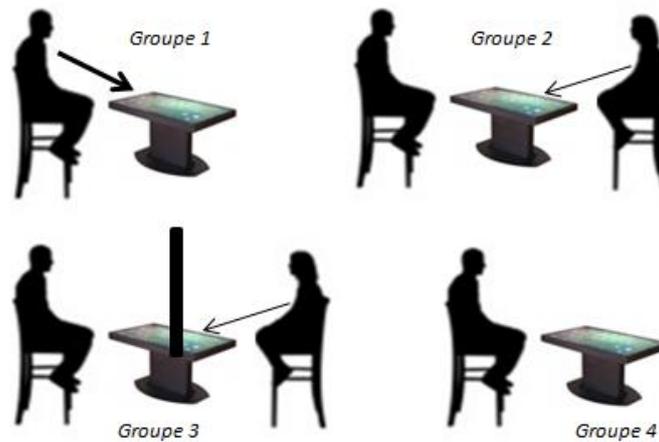


Figure 30 : schéma des différentes variations de l'expérience selon les groupes. Les sujets sont représentés par la figure masculine, à gauche.

La seconde phase (phase test) est la même pour tous les groupes : la tâche des sujets est de faire correspondre la localisation d'une amorce flèche à la localisation des touches de réponse en faisant glisser leurs doigts sur l'écran – même tâche que pour le groupe 1 dans la phase d'acquisition. Dans cette phase test, les amorces flèches sont accompagnées d'une amorce sonore – que le sujet a pour consigne de ne pas prendre en compte. Ces amorces sonores peuvent être compatibles ou incompatibles avec l'association précédemment établie dans la phase d'acquisition. Dans la condition où les sons aigus suivaient des mouvements amples et les sons graves des mouvements courts lors la phase d'acquisition, les situations compatibles dans la phase test correspondent aux amorces des flèches longues accompagnées d'un son aigu et des flèches courtes accompagnées d'un son grave ; tandis que les situations incompatibles correspondent aux amorces des flèches longues accompagnées d'un son grave et des flèches courtes accompagnées d'un aigu. Durant cette phase, on enregistre les temps de réponses (temps entre l'apparition de la flèche et l'instant où le sujet atteint la localisation de la réponse), ainsi que les temps de mouvements (temps entre l'initiation du mouvement et l'instant où le sujet atteint la localisation de la réponse).

D'après les données des théories idéomotrices, on devrait observer une différence entre les situations compatibles et les situations incompatibles de la phase test au niveau des temps de réponses et des temps de mouvement pour le groupe 1. En revanche, aucune donnée ne prédit d'attentes pour les autres groupes. On peut faire l'hypothèse qu'une différence entre

situations compatibles et incompatibles s'observera également pour le groupe 2 : les recherches sur les neurones miroirs suggèrent en effet qu'observer un individu faire un mouvement implique les mêmes activités neuronales que faire soi-même ce mouvement (Rizzolatti, Fadiga, Gallese, & Fogassi, 1996). En revanche, la question demeure de savoir si cette différence sera équivalente ou inférieure à celle observée pour le groupe 1. Nous proposons quatre cas de figure potentiellement observables :

- Situation 1 : le même impact de l'association idéomotrice établie en phase d'acquisition est observé pour les quatre groupes (Cf. Figure 31A). Ce cas extrême (et peu probable au regard des nombreuses données en faveur des théories idéomotrices et de la cognition incarnée et située) impliquerait de conclure que la cinématique du mouvement au niveau physiologique n'a aucun impact. De plus, l'influence même du mouvement est remise en cause dans ce scénario puisqu'une simple association entre deux positions (groupe 4, où le mouvement est au mieux inféré à partir d'une association de positions ou du mouvement des yeux) a le même impact qu'une association entre un mouvement et ses effets sensoriels. Ce scénario inviterait les théories idéomotrices et plus largement les théories de la cognition incarnée et située à revoir leur définition du mouvement et sa distinction avec l'action.

- Situations 2 et 3 : On observe un impact de l'association idéomotrice établie en phase d'acquisition mais celui-ci est inégal pour les quatre groupes (Cf. Figure 31B et Figure 31C). Ce cas illustrerait l'idée que plus l'individu engage ses mouvements dans le monde et inscrit les associations idéomotrices dans la cinématique corporelle plus l'association idéomotrice serait efficiente. Dans le cas B, la cinématique aurait un rôle non nécessaire (le groupe 4 sans mouvements manifestant toujours un effet de l'association idéomotrice) tandis que dans la situation 3 cette cinématique serait bien nécessaire – elle est néanmoins reléguée à une cinématique d'intention puisque dans le cas 3 le mouvement est seulement inféré.

- Situation 4 : On observe un impact de l'association idéomotrice établie en phase d'acquisition uniquement pour les groupes 1 et 2 (Cf. Figure 31D) : ce résultat irait dans le sens des hypothèses idéomotrices et permettrait de valider l'importance du mouvement en tant que processus corporellement inscrit.

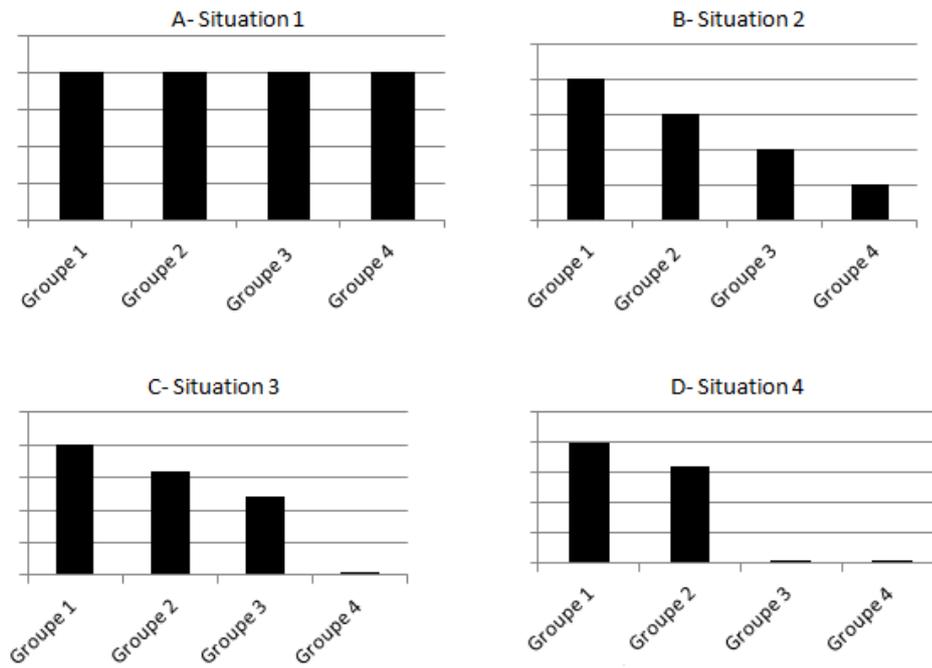


Figure 31 : graphiques prédictifs des possibles résultats de l'expérience

Conclusion

Le résultat de notre investigation de la construction d'une perception distale à travers l'attribution distale participe à une recherche générale sur les liens perception-action et invite une profonde refonte de la définition de ces deux concepts. Sur un plan fondamental, nous proposons de considérer la perception comme un type d'action. Nous avons mis en avant l'importance du mécanisme idéomoteur, liant mouvements et sensations dans une dynamique circulaire dont émerge la perception distale. Défini comme un processus sensorimoteur, le mécanisme idéomoteur est à la base de l'attribution distale, essentielle à la maîtrise de l'individu sur le monde extérieur. Sur le plan appliqué, notre étude permet une meilleure compréhension du fonctionnement des appareils de substitution sensorielle. Elle favorise une politique d'inclusion des personnes malvoyantes et non-voyantes non plus en tant qu'individus « handicapés », mais simplement différents ; il s'agit d'une autre manière de percevoir, plutôt que d'une déficience : « Être non-voyant ce n'est pas une infirmité, c'est seulement une autre façon de voir » (Siboun, 1978).

A la question posée en introduction : Pourquoi et comment acquérons-nous une perception spatiale en trois dimensions ?, nous répondons que la perception spatiale tridimensionnelle est une perception *active*, voire une forme d'action. Les liens répétés entre nos mouvements et leurs effets sensoriels affectent la représentation spatiale des effets. Cette influence nous suggère que nos actions font émerger et structurent un espace de perception et de pensée. De nos mouvements émerge un monde intérieur spatialisé par lequel se produit l'attribution distale.

L'impératif esthétique formulé par Von Foerster (1988) et présenté en ouverture de cette thèse prend alors tout son sens : « si tu veux voir, apprends à agir ». Le monde extérieur stable et universel n'est d'aucune manière « donné » ou « reflété » dans l'esprit ; c'est le monde intérieur du corps qui construit l'illusion d'un monde extérieur objectif.

Nous espérons avoir contribué à une recherche aux conséquences à la fois fondamentales et pratiques, s'inscrivant dans une démarche holistique visant à un décloisonnement conceptuel entre les différentes disciplines des sciences cognitives.

« Qui expérimente ? Le corps. Qui invente ? Lui. Et qui flotte, court et vole, en ivresse archangélique lorsque l'intuition bienheureuse le baigne et le fait léviter ? Le corps, oui, le corps encore. Nu. Confite en logique et en mémoire, toutes deux machinales – laissez-les donc aux machines –, l'intelligence reste bête et lourde sans lui, ailé. Ascension : il vient d'appareiller » (Michel Serres, pp.135-136)



LEXIQUE

Action : Processus cognitifs qui traitent des mouvements (déplacements), incluant ainsi leurs buts (les intentions derrière le déplacement) et leur réalisation (programmation, planification). Permet le couplage entre le sujet et son environnement.

Attribution distale : Processus par lequel des sensations proximales (spatialisées sur l'espace du corps) acquièrent une localisation dans l'espace extérieure au sujet et sont « oubliées » (i.e. ne font plus l'objet de l'attention) par l'individu au profit d'une perception spatialisée en trois dimensions.

Idéomoteur (mécanisme) : Qualifie le mécanisme en deux étapes consistant à (1) associer bilatéralement des mouvements à leurs effets sensoriels, et (2) activer l'image anticipatoire de ces effets pour contrôler l'action.

Kinesthésie : Perception du corps relevant des systèmes proprioceptif et vestibulaire. Couramment utilisé comme synonyme de proprioception.

Mouvement : Déplacement d'un point à un autre dans un espace.

Perception : Construction cognitive active des connaissances immédiates d'un individu sur son environnement, à partir de l'information délivrée par les sensations et par le corps en mouvement. Plus exactement, la perception est le résultat émergent des ruptures engendrées par les mouvements dans les flux sensoriels.

Perception spatiale : Désigne les processus cognitifs permettant d'évaluer la position d'objets dans un espace donné et de comprendre leurs relations entre eux et avec l'environnement du sujet.

Perception spatiale tridimensionnelle : Perception spatiale définie dans un espace particulier : porte uniquement sur des objets situés à distance de l'observateur dans son environnement extérieur en trois dimensions.

Perception distale : Phénomène émergent du processus de l'attribution distale. Qualifie la perception spatiale tridimensionnelle en mettant l'accent sur le caractère extérieur et distant de cette perception par rapport au corps de l'individu.

Proprioception : Système perceptif relié aux muscles ; aujourd'hui considérée comme un « sixième sens ». Système activé par (et seulement par) les déformations du corps induits par les changements de positions de l'individu, qui désigne ainsi le sens de la position, de la vitesse et de la force du mouvement.

Sensation : Réaction physiologique des récepteurs sensoriels à l'environnement extérieur.

Sensation proximale : Qualifie le caractère spatial en une ou deux dimensions de l'activité des récepteurs sensoriels par rapport à l'individu. Utilisé en opposition au caractère distal de la plupart des perceptions.

Sensorimoteur (processus) : Qualifie le processus consistant à créer des liens systématiques et automatiques entre l'activité motrice et l'activité sensorielle de l'individu, afin de percevoir, ressentir, raisonner ou encore agir.

Substitution sensorielle : Transformation des caractéristiques d'informations propres à une modalité sensorielle (généralement, la vision), en des informations propres à une autre modalité sensorielle (e.g. le toucher ou l'audition). La substitution sensorielle est utilisée dans des appareils créés pour pallier le handicap lié à la déficience visuelle. Ces dispositifs de substitution sensorielle sont conçus à l'intention des non-voyants et des malvoyants.

BIBLIOGRAPHIE

- Aiello, G. (1998). Multidimensional electrocutaneous stimulation. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering* , 6 (1), 95-101.
- Allport, A. D. (1987). Selection for action: Some behavioral and neurophysiological considerations of attention and action. Dans H. Heuer, & A. F. Sanders, *Perspectives on perception and action* (pp. 395-419). Hillsade: Erlbaum..
- Aristote. (1953). *La métaphysique*. (J. Tricot, Trad.) Paris: Vrin.
- Auvray, M. (2004). *Immersion et perception spatiale. L'exemple des dispositifs de substitution sensorielle*. Paris: Thèse de doctorat: Psychologie cognitive. EHESS.
- Auvray, M., & Arnold, G. (2014). Perceptual learning: tactile letter recognition transfers across body surfaces. *Multisensory Research* , 27 (1), 71-90.
- Auvray, M., Hanneton, S., & O'Regan, K. J. (2007). Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: Localisation and object recognition with "The vOICE". *Perception* , 36, 416-430.
- Auvray, M., Hanneton, S., Lenay, C., & O'Regan, K. J. (2005). There is something out there: distal attribution in sensory substitution, twenty years later. *Journal of Integrative Neuroscience* , 4, 505-521.
- Bach-y-Rita, P. (1972). *Brain Mechanisms in Sensory Substitution*. New York: Academic Press.
- Bach-y-Rita, P. (1989). Physiological considerations in sensory enhancement and substitution. *Europa Med Phsm*, 25, 107-128.
- Bach-y-Rita, P. (1967). Sensory plasticity: Applications to a vision substitution system. *Acta Neurologica Scandinavica* , 43 (4), 417-426.

- Bach-y-Rita, P. (2002). Sensory substitution and qualia. Dans A. Noë, & E. Thompson, *Vision and Mind* (pp. 497-514). Cambridge: MIT Press.
- Bach-y-Rita, P. (1983). Tactile vision substitution: past and future. *International Journal of Neuroscience*, 19 (1-4), 29-36.
- Bach-y-Rita, P. (1999). Theoretical aspects of sensory substitution and of neurotransmission related reorganization in spinal cord injury. *Spinal Cord*, 37(7), 465-474.
- Bach-y-Rita, P. (1984). The relationship between motor processes and cognition in tactile vision substitution. Dans W. Prinz, & A. Sanders, *Cognition and Motor Processes* (pp. 149-160). Berlin: Springer-Verlag.
- Bach-y-Rita, P., Kaczmarek, K. A., & Meier, K. (1998). The tongue as a man-machine interface: A wireless communication system. *Proceeding of the 1998 International Symposium on Information Theory and its Applications*, 79-81.
- Badets, A., & Rensonnet, C. (2015). Une approche idéomotrice de la cognition. *L'Année Psychologique*, 115 (3), 591-635.
- Badets, A., Pesenti, M., & Olivier, E. (2010). Response–effect compatibility of finger–numeral configurations in arithmetical context. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63 (1), 16-22.
- Bateson, G. (1972). *Steps to an Ecology of Mind: Collected Essays in Anthropology, Psychiatry, Evolution, and Epistemology*. Chicago: University of Chicago Press.
- Beilock, S., Berthenthal, B., Carr, T., & McCoy, A. (2004). Haste does not always make waste: Expertise, direction of attention, and speed versus accuracy in performing sensorimotor skills. *Psychonomic Bulletin and Review*, 11, 373-379.
- Berkeley, G. (1709). *An essay towards a new theory of vision*. Dublin: Rhames, Aaron.
- Bermejo, F., Di Paolo, E. A., Hüg, M. X., & Arias, C. (2015). Sensorimotor strategies for recognizing geometrical shapes: a comparative study with different sensory substitution devices. *Frontiers in Psychology*, 6 (679).

- Bermejo, F., Ramos, O., & Arias, C. (2009). Descubriendo figuras geométricas invisibles: una experiencia en sustitución sensorial [Discover invisible geometric shapes: an experience with sensory substitution]. *Proceeding of XII National and International Meeting of Argentina Association of Behavioral Sciences* (pp. 25-27). Buenos Aires: AACC.
- Blaesi, S., & Bridgeman, B. (2015). Perceived difficulty of a motor task affects memory but not action. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *62*, 235-240.
- Brown, D., Macpherson, T., & Ward, J. (2011). Seeing with sound? Exploring different characteristics of a visual-to-auditory sensory substitution device. *Perception* (40), 1120–1135.
- Brunswik, E. (1944). Distal focusing of perception. Size constancy in a representative sample of situations. *Psychological Monographs*, *56* (254), 1-49.
- Camus, T., Hommel, B., Brunel, L., & Brouillet, T. (2017). From anticipation to integration: the role of integrated action-effects in building sensorimotor contingencies. *Psychonomic bulletin & review*.
- Capelle, C., Trullemans, C., Arno, P., & Veraart, C. (1998). A real-time experimental prototype for enhancement of vision rehabilitation using auditory substitution. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *45* (10), 1279-1293.
- Cardin, S., Thalmann, D., & Vexo, F. (2007). A wearable system for mobility improvement of visually impaired people. *The Visual computer*, *23*, 109-118.
- Carpenter, W. B. (1852). On the influence of suggestion in modifying and directing muscular movement, independently of volition. *Proceedings of the Royal Institution*, 147-154.
- Chalmers, D. (2008). Foreword to *Supersizing the mind*. Dans A. Clark, *Supersizing the mind*. Oxford: University Press.
- Cheselden, W. (1728). An Account of Some Observations Made by a Young Gentleman, Who Was Born Blind, or Lost His Sight so Early, That He Had no Remembrance of Ever Having Seen, and Was Couch d between 13 and 14 Years of Age. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (35), 447-450.

- Clark, A. (2008). Pressing the flesh: A tension in the study of the embodied, embedded mind? *Philosophy and Phenomenological Research* , 76 (1), 37-59.
- Clark, A., & Chalmers, D. J. (1998). The extended mind. *Analysis* , 58, 10-23.
- Condillac, E. B. (1754). *Traité des sensations*. Paris: De Bure aîné.
- Cooper, A. D., Sterling, C. P., Bacon, M. P., & Bridgeman, B. (2012). Does action affect perception or memory? *Vision Research*, 62 , 235-240.
- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., & Umiltà, C. A. (1999). Action for perception: A motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* , 25, 1673-1692.
- Dakopoulos, D., & Bourbakis, N. (2010). Wearable Obstacle Avoidance Electronic Travel Aids for Blind: A Survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* , 40 (1), 25-35.
- Deroy, O., & Auvray, M. (2012). Reading the world through the skin and ears: A new perspective on sensory substitution. *Frontiers in Psychology* , 3 (457).
- Descartes, R. (1964). *L'homme*. Paris: Théodore Girard.
- Deubel, H., & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research* , 36, 1827-1837.
- Dewey, J. (1896). The reflex arc concept in psychology. *Psychological Review* , 3, 357-370.
- Díaz, A., Barrientos, A., Jacobs, D., & Travieso, D. (2012). Action-contingent vibrotactile flow facilitates the detection of ground level obstacles with a partly virtual sensory substitution device. *Human Movement Science* , 31 (6), 1571-1584.
- Dobelle, W. (2000). Artificial vision for the blind by connecting a television camera to the visual cortex. *ASAIO Journal* , 46, 3-9.
- Doidge, N. (2007). *The brain that changes itself: Stories of personal triumph from the frontiers of brain science*. New York: Viking Press.

- Durgin, F. H., Baird, J. A., Greenburg, M., Russell, R., Shaughnessy, K., & Waymouth, S. (2009). Who is being deceived? The experimental demands of wearing a backpack. *Psychonomic Bulletin & Review* , 16, 964-969.
- Edelman, G. (1989). *The remembered present: A biological theory of consciousness*. . New York: Basic Books Inc.
- Elsner, B., & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* , 27 (1), 229-240.
- Epstein, W. (1985). Electronic spatial sensing for the blind. Dans D. H. Warren & E. R. Strelow (Eds.), *Amodal information and transmodal perception* (421-430). Dordrecht, Netherlands.
- Fagioli, S., Hommel, B., & Schubotz, R. I. (2007). Intentional control of attention: Action Planning primes action related stimulus dimensions. *Psychological Research* , 71, 22-29.
- Fletcher, P. (2002, Avril 8). *The vOICe at Tucson. Seeing with sound*. Récupéré sur Seeing with sound: <https://www.seeingwithsound.com/tucson2002.html>
- Ford, P., Hodges, N. J., & Williams, M. A. (2005). Online attentional-focus manipulations in a soccer-dribbling task: implications for the proceduralization of motor skills. *Journal of motor behavior* , 37 (5), 386-394.
- Franklin, N., & Tversky, B. (1990). Searching Imagined Environments. *Journal of Experimental Psychology. General* , 119 (1), 63-76.
- Gallistel, C. (1980). *The Organization of Action: A New Synthesis*. Hillsdale: Erlbaum.
- Gapenne, O. (2014). The co-constitution of the self and the world: action and proprioceptive coupling. *Frontiers in Psychology* , 5 (594).
- Geldard, F. (1960). Some neglected possibilities of communication. *Science* , 131 (3413), 1583-1588.
- Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review* , 69 (6), 477-491.

- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Glaserfeld, E. v. (2001). The radical constructivist view of science. (A. Riegler, Éd.) *Foundations of Science. Special issue on "The Impact of Radical Constructivism on Science"* , 6 (1-3), 31-43.
- Goldman, A., & De Vignemont, F. (2009). Is social cognition embodied? *Trends in Cognitive Sciences* , 13 (4), 154-159.
- Grant, A. C., Thiagarajah, M. C., & Sathian, K. (2000). Tactile perception in blind Braille readers: A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception & Psychophysics* , 62 (2), 301-312.
- Greenwald, A. G. (1970). A choice reaction time test of ideomotor theory. *Journal of Experimental Psychology* , 86 (1), 20-25.
- Gregory, R. L., & Wallace, J. G. (1963). *Recovery from early blindness: A case study*. Cambridge: W. Heffer & Sons.
- Grice, H. (1962). Some Remarks About the Senses. Dans R. Butler, *Analytical philosophy (first series)* (pp. 248-268). Oxford: Basil Blackwell.
- Guiard, Y. (1983). The lateral coding of rotations: A study of the Simon effect with wheel-rotation responses. *Journal of Motor Behavior* , 15, 331-342.
- Harless, E. (1861). Der Apparat des Willens. Dans I. H. Fichte, H. Ulrici, & I. U. Wirth, *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik: Vol. 38* (pp. 50-73). Halle: Pfeffer.
- Heider, F. (1930). The function of the perceptual system. *Psychological Issues* , 371-384.
- Heider, F. (1926). Things and medium. *Psychological Issues* .
- Held, R., & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology* , 56 (5), 872-876.

- Herbart, J. F. (1816). *Lehrbuch zur Psychologie*. Königsberg: Unzer.
- Herbart, J. F. (1825). *Psychologie als Wissenschaft neu gegründet auf Erfahrung, Metaphysik und Mathematik. Zweiter, analytischer Teil*. Königsberg: Unzer.
- Hirsh, I. (1988). Auditory perception and speech. Dans R. Atkinson, R. Herrnstein, G. Lindzey, & R. Luce, *Handbook of Experimental Psychology* (éd. 2, Vol. 1, pp. 377-408). New York: John Wiley.
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, 73, 512-526.
- Hommel, B. (1998). Perceiving one's own action - and what it leads to. Dans J. S. Jordan, *Systems theories and a priori aspects of perception* (pp. 143-179). Amsterdam: Elsevier Science.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a new framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24 (5), 849-937.
- Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (2001). Detection by action: Neuropsychological evidence for action-defined templates in search. *Nature Neuroscience*, 4, 84-89.
- Hurley, S. (2001). Perception and action: alternative views. *Synthese* (129), 3-40.
- Hurley, S., & Noë, A. (2003). Neural plasticity and consciousness: Reply to Block. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (8), 342.
- James, W. (1912 (2005)). *Essais d'empirisme radical*. (G. Garréta, & M. Girel, Trads.) Paris: Flammarion.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. Cambridge: Harvard University Press.
- Jeannerod, M. (1975). Déficit visuel persistant chez les aveugles-nés opérés. Données cliniques et expérimentales. *L'Année psychologique*, 75 (1), 169-195.
- Jeannerod, M. (1979). Visuomotor experiments: Failure to replicate, or failure to match the theory. *Behavioral and Brain Sciences*, 2-71.

- Jones, L. A., & Starter, N. B. (2008). Tactile displays: guidance for their design and application. *Human Factors* , 50 (1), 90-111.
- Kaczmarek, K. A. (1995). Sensory augmentation and substitution. *CRC Handbook of Biomedical Engineering*, 2100-2109.
- Kaczmarek, K. A., & Bach-y-Rita, P. (1995). *Tactile displays. Virtual Environments and Advanced Interface Design*, 349-414.
- Kirsh, W., & Kunde, W. (2014). Impact of planned movement direction on judgments of visual locations. *Psychological Research*, 78, 705-720
- Koch, I., & Hoffmann, J. (2000). The role of stimulus-based and response-based spatial information in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition* , 26, 863-882.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* , 27 (2), 387-394.
- Laycock, T. (1845). On the reflex functions of the brain. Dans *Reprinted from N. XXXVII of The British and Foreign Medical Review* (pp. 1-16). Bartholomew Close: Adlard.
- Lenay, C. (2006). Enaction, externalisme et suppléance Perceptive. (R. d. COSTECH, Éd.) *Intellectica* , 43, 27-52.
- Lenay, C., Canu, S., & Villon, P. (1997). Technology and perception: the contribution of sensory substitution systems. *Cognitive technology: humanizing the information age* (pp. 44-53). IEEE Computer society.
- Lenay, C., Gapenne, O., & Stewart, J. (2001). The constitution of spatiality in relation to the lived body : a study based on prosthetic perception. *Conference on the Emergence and Development of Embodied Cognition*. Beijing, China.
- Lenay, C., Gapenne, O., Hanneton, S., Marque, C., & Genouëlle, C. (2003). Sensory substitution: limits and perspectives. Dans Y. Hatwell, A. Streri, & E. Gentaz, *Touching for Knowing: Cognitive Psychology of Haptic Manual Perception* (pp. 275-292). Amsterdam: John Benjamins.

- Llinas, R. (1987). "Mindness" as a functional state of the brain. . Dans C. Blakemore, & S. Greenfield, *Mindwaves* (pp. 339-358). Oxford: Blackwell.
- Locke, J. (1694). *An essay concerning human understanding* (éd. 2e édition). London: Thomas Bassett.
- Longo, M. R., & Lourenco, S. F. (2007). Space perception and body morphology: extent of near space scales with arm length. *Experimental Brain Research* , 177, 285-290.
- Lotze, R. H. (1852). *Medicinische Psychologie oder Physiologie der Seele*. Berlin: Weidmann.
- Lowel, S., & Singer, W. (1992). Selection of intrinsic horizontal connections in the visual cortex by correlated neuronal activity. *Science* , 255 (5041), 209-212.
- MacKay, D. (1987). *The organization of perception and action: A theory for language and other cognitive skills*. Springer-Verlag, New York.
- Maidenbaum, S., Abboud, S., & Amedi, A. (2014). Sensory substitution: Closing the gap between basic research. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* , 41, 3-15.
- Mandavilli, A. (2006). Visual neuroscience: Look and learn. *Nature* , 441 (7091), 271-272.
- Manolova, A. (2012). *Chapitre 2 : description anatomique du mouvement*. Consulté le 2017, sur Sciences du sport: <https://www.sci-sport.com/theorie/001-02.php>
- Mariot, S. P. (2010). *Global data on visual impairments*. Genève: World Health Organization.
- Mathôt, S., Grainger, J., & Strijkers, K. (2017). Pupillary responses to words that convey a sense of brightness or darkness. *Psychological Science* , 28 (8), 1116-1124.
- Meijer, P. B. (1992). An experimental system for auditory image representations. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* , 39 (2), 112-121.
- Melara, R. D., & O'Brien, T. P. (1997). Interaction between synesthetically corresponding dimensions. *Journal of Experimental Psychology: General* , 116, 323-336.
- Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Paris: Gallimard.

- Michaels, C. F., & Stins, J. F. (1997). An ecological approach to stimulus-response compatibility. Dans B. Hommel, & P. Wolfgang, *Theoretical issues in stimulus-response compatibility* (Vol. 118, pp. 333-360). Amsterdam: Elsevier.
- Morgado, N., & Palluel-Germain, R. (2015). How actions constrain the visual perception of space. Dans Y. Coello, & M. C. Fischer, *Foundations of Embodied Cognition: Perceptual and emotional embodiment* (Vol. 1, pp. 167-180). Hove: Psychology Press.
- Müsseler, J., & Hommel, B. (1997). Blindness to response-compatible stimuli. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* , 23, 861-872.
- Noë, A. (2004). *Action in perception*. Cambridge: MIT Press.
- Noë, A. (2006). Précis of Action in perception. *Psyche* , 12 (1).
- OMS. (2001). *Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé: CIF*. Genève: Organisation mondiale de la santé.
- O'Regan, K. J. (2011). *Why red doesn't sound like a bell. Understanding the feeling of consciousness*. Oxford: Oxford University Press.
- O'Regan, K. J., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences* , 24 (5), 939-973.
- O'Regan, K. J., Myin, E., & Noë, A. (2005). Skill, corporality and alerting capacity in an account of sensory consciousness. *Progress in Brain Research* , 150, 55-68.
- Pacherie, E. (1997). Du problème de Molyneux au problème de Bach-y-Rita. Dans J. Proust, *Perception et intermodalité. Approches actuelles du problème de Molyneux*. (pp. 255-293). Paris: PUF.
- Pfister, R., & Kunde, W. (2013). Dissecting the response in response-effect compatibility. *Experimental Brain Research* , 224, 647-655.
- Pfister, R., Janczyk, M., Gressmann, M., Fournier, L. R., & Kunde, W. (2014). Good vibrations? Vibrotactile self-stimulation reveals anticipation of body-related action effects in motor control. *Experimental Brain Research* , 232 (3), 847-854.

- Piaget, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique* (Vol. 22). Paris: Encyclopédie de la Pléiade, Gallimard.
- Platon. (1794). *La République de Platon, ou, Dialogue sur la justice*. Paris: Belin.
- Platon. (2008). Cratyle, dans Luc Brisson (dir.) (trad. Catherine Dalimier) : *Platon, Œuvres complètes*, Éditions Flammarion (1^{re} éd. 2006), p.2204
- Poincaré, H. (1907). *La Science et l'Hypothèse*. Paris: Flammarion.
- Poincaré, H. (1905). *La Valeur de la Science*. Paris: Flammarion.
- Prechtl, H. (2001). Prenatal and Early Postnatal Development of Human Motor Behavior . Dans K. a. eds, *Handbook of brain and behaviour in human development* (pp. 415-418). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Prinz, J. (2006). Putting the brakes on enactive perception. *Psyche* , 12 (1).
- Proctor, R. W., & Kim-Phuong, L. V. (2001). TEC: integrated view of perception and action or framework for response selection? [Peer commentary on "the theory of event coding (TEC): A framework for perception and action", by B. Hommel, J. Müsseler, G. Aschersleben, and W. Prinz]. *Behavioral and Brain sciences* , 24, 899-900.
- Proffitt, D. R. (2006). Embodied perception and the economy of action. *Perspectives on Psychological Sciences* , 1 (2), 110-122.
- Proulx, M. J., Brown, D. J., Pasqualotto, A., & Meijer, P. (2014). Multisensory perceptual learning and sensory substitution. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* , 41, 16-25.
- Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience* , 6, 576-582.
- Reich, L., Maidenbaum, S., & Amedi, A. (2011) The brain as a flexible task machine: implications for visual rehabilitation using noninvasive vs. invasive approaches. *Current Opinion in Neurology*, 25, 86-95.
- Reid, T. (1764). *An inquiry into the human mind on the principles of common sense*. Pennsylvania: Pennsylvania State University Press.

- Renier, L., Volder, A. G., & Rauschecker, J. P. (2014). Cortical plasticity and preserved function in early blindness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* , 41, 53-63.
- Rey, A. E., Riou, B., & Versace, R. (2014). Demonstration of an Ebbinghaus illusion at a memory level: manipulation of the memory size and not the perceptual size. *Experimental Psychology* , 61 (5), 378-384.
- Reynolds, C., Cassinelli, A., & Ishikawa, M. (2008). Meta-perception: reflexes and bodies as part of the interface. *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 3669-3674.
- Ricciardi, E., & Pietrini, P. (2011). New light from the dark: what blindness can teach us about brain function. *Current Opinion in Neurology*, 24, 357-363.
- Richardson, D. C., & Spivey, M. J. (2001). The TEC as a theory of embodied cognition [Peer commentary on "the theory of event coding (TEC): A framework for perception and action", by B. Hommel, J. Müsseler, G. Aschersleben, and W. Prinz]. *Behavioral and Brain sciences* , 24, 900-901.
- Riou, B., Rey, A. E., Vallet, G. T., Cuny, C., & Versace, R. (2015). Perceptual processing affects the reactivation of a sensory dimension during a categorization task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* , 68 (5), 1223-1230.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research. Cognitive Brain Research* , 3 (2), 131-141.
- Rizzolatti, G., Riggio, L., & Sheliga, B. M. (1994). Space and selective attention. Dans C. Umiltà, & M. & Moscovitch, *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (pp. 231-265). Cambridge, MA: MIT Press.
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J., Ibanez, V., Deiber, M. P., & Dold, G. (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature* , 380 (6574), 526-528.

- Sato, M., Cattaneo, L., Rizzolatti, G., & Gallese, V. (2007). Numbers within our hands: modulation of corticospinal excitability of hand muscles during numerical judgment. *Journal of Cognitive Neuroscience* , 19, 684-693.
- Segal, L. (1990 (1986)). *Le rêve de la réalité. Heinz von Foerster et le constructivisme*. Paris: Seuil.
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin* , 136 (6), 943-974.
- Siboun, G. (1978). *Les couleurs de la nuit*. Paris: Robert Laffont.
- Siegle, J. H., & Warren, W. H. (2010). Distal attribution and distance perception in sensory substitution. *Perception* , 39 (2), 208-223.
- Simon, J. R., & Wolf, J. D. (1963). Choice reaction time as a function of angular stimulus-response correspondence and age. *Ergonomics* , 6 (1), 99-105.
- Simon, J. R., Hinrichs, J. V., & Craft, J. L. (1970). Auditory S-R compatibility. Reaction time as a function of ear-hand correspondence and ear-response-location correspondence. *Journal of Experimental Psychology* , 86, 97-102.
- Sinha, P. (2013). Once blind and now they see. *Scientific american* , 48-55.
- Sinha, P., Chatterjee, G., Gandhi, T., & Kalia, A. (2013). Restoring vision through "Project Prakash": The opportunities for merging science and service. *PLoS Biology* , 11 (12).
- Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological Research* , 68, 176-188.
- Striem-Amit, E., Bubic, A. & Amedi, A. (2011). Neurophysiological mechanisms underlying plastic changes and rehabilitation following sensory loss in blindness and deafness. Dans M.M. Murray, & M.T. Wallace, *Frontiers in the Neural Bases of Multisensory Processes*. Taylor and Francis, Oxford, UK.
- Sutter, C., Sülzenbrück, S., Rieger, M., & Müsseler, J. (2013). Limitations of distal effect anticipation when using tools. *New Ideas in Psychology* , 31 (3), 247-257.

- Thébaud, G., Michalland, A.H, Derozier, V, Chabrier, S, & Brouillet, D. (2018). When the vibrations allow for anticipating the force to be produced: an extend to Pfister et al. (2014). *Experimental Brain Research*. doi: 10.1007/s00221-018-5190-x.
- Thorndike, E. L. (1911). *Animal Intelligence*. New York: MacMillan.
- Thorndike, E. L. (1913). Ideo-motor action. *Psychological Review* , 20, 91-106.
- Trevarthen, C. (1978). Modes of Perceiving and Modes of Acting. Dans H. L. Pick, & E. Saltzman, *Modes of Perceiving and Processing Information* (pp. 99-136). Hillsdale: Erlbaum.
- Van erp, J. (2007). *Tactile displays for navigation and orientation: perception and behavior*. Utrecht: Utrecht University, doctoral dissertation.
- Varela, F. J. (1988). *Autonomie et connaissance. Essai sur le vivant*. (P. Bourguine, & P. Dumouchel, Trans.) Paris: Seuil.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit : Sciences cognitives et expérience humaine*. Paris: Seuil.
- Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, E., & Brunel, L. (2014). Act-In: An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology* , 26 (3), 280-306.
- Visell, Y. (2009). Tactile sensory substitution: Models for enaction in HCI. *Interacting with Computers* , 21 (1-2), 38-53.
- Von Foerster, H. (1949). *Conference, Cybernetics: Transactions of the Sixth Conference*. New York: Josiah Macy Jr. Foundation.
- Von Foerster, H. (2002). *Understanding understanding*, a volume of von Foerster's papers. Berlin: Springer-Verlag.
- Von Helmholtz, H. (1867/1910). *Handbuch der physiologischen optik [Optique Physiologique]*. (E. Javal, & K. N.Th., Trans.) Paris: Victor Masson.

- Wallace, R. A. (1972). Spatial S-R compatibility effects involving kinesthetic cues. *Journal of Experimental Psychology* , 93, 163-168.
- Wallace, R. A. (1971). S-R compatibility and the idea of a response code. *Journal of Experimental Psychology* , 88, 354-360.
- Wanet Defalque, M. C., Veraart, C., de Volder, A., & Metz, R. (1988). High metabolic activity in the visual cortex of early blind human subjects. *Brain Research* , 446 (2), 369-373.
- Watzlawick, P. (1984). *he Invented Reality: How Do We Know What We Believe We Know? Contributions to Constructivism*. New York: W.W. Norton and Company.
- Welford, A. T. (1976). *Skilled performance: Perceptual and motor skills*. Glenview: Scott, Foresman.
- White, B. W., Saunders, F. A., Scadden, L., Bach-y-Rita, P., & Collins, C. C. (1970). Seeing with the skin. *Perception & Psychophysics* , 7 (1), 23-27.
- Wykowska, A., Schubö, A., & Hommel, B. (2009). How You Move Is What You See: Action Planning Biases Selection in Visual Search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* , 35 (6), 1755–1769.

-Annexes-

Annexe 1 : Apport des modèles bayésiens de la perception pour expliquer le rôle de l'action dans l'attribution distale (Briscoe, unpublished)..... p.231

1. La perception distale dans la substitution sensorielle comme hypothèse opérationnelle bayésienne.....p.231
2. L'hypothèse de l'information : le rôle contingent du mouvement.....p.235
3. Une remise en cause de l'approche sensorimotrice pour expliquer l'attribution distale dans la substitutionp.238

Bibliographie.....p.240

Annexe 2 : Perspectives neuroscientifiques sur la coordination perception-action (PAC).....p.242

Bibliographie.....p.247

Annexe 3 : Tableaux excel des données bruts pour chaque expérience...p.249

Apport des modèles bayésiens de la perception pour expliquer le rôle de l'action dans l'attribution distale (Briscoe, unpublished)

L'interprétation sensorimotrice du rôle de l'action dans la substitution sensorielle et l'attribution distale justifie la nécessité du mouvement (*i.e.* du contrôle actif de la caméra) en ce qu'il permet d'établir le lien entre la variation des stimulations reçues par l'appareil et la variation des mouvements auto-initiés. Autrement dit, le mouvement est nécessaire pour permettre au sujet de maîtriser les contingences sensorimotrices propres à la substitution sensorielle. Briscoe (unpublished) propose une interprétation du rôle du mouvement dans la substitution sensorielle qui est selon lui alternative à l'approche sensorimotrice défendue par Lenay.

1. La perception distale dans la substitution sensorielle comme hypothèse opérationnelle bayésienne

Briscoe propose de comprendre la perception distale comme « la solution à un problème d'inférence causale auquel sont confrontés les systèmes perceptifs du sujet » (“it is helpful, I would suggest, to think of distal attribution as the solution to a causal inference problem faced by the subject's perceptual system”). Briscoe s'appuie sur le modèle bayésien de la perception en sciences cognitives (Cf Mamassian, Landy, & Maloney, 2002 ; Kersten & Yuille, 2003 ; Shams & Beierholm, 2010 ; Clark, 2013 ; Hohwy, 2013 ; Rescorla, 2015) : selon ce modèle, toute perception est le résultat d'un processus qui vise à inférer la cause la plus probable d'un ensemble de stimulations sensorielles proximales. Cette inférence se fait sur la base (1) d'indices de bas niveaux contenus dans les stimulations elles-mêmes et (2) des connaissances ou des croyances préalables du système perceptif sur le monde.

The central challenge faced by any perceptual system, on Bayesian models of perception, is to infer the most probable cause of a given pattern of proximal sensory stimulation on the basis of (1) the low-level cues present in the pattern itself, *i.e.*, properties of the pattern that are predictive of properties in the environment, and (2) pre-wired or learned assumptions about the environment's

statistical structure (the perceptual system's 'prior knowledge' about the world). (Briscoe, unpublished, pp.5-6)⁴⁴.

Selon la théorie bayésienne, tout contenu perceptif est une « hypothèse opérationnelle » (« operative hypothesis ») concernant la structure de l'environnement accessible. Le système perceptif pose le problème suivant à la cognition : étant donné un ensemble d'informations endogènes et exogènes disponibles pour l'individu à un moment et dans un contexte donnés, quelle est la cause la plus probable de ces informations ; quelle structure potentielle de l'environnement explique le mieux ces données endogènes et exogènes ?

The content of the perceptual state formed in response to a particular pattern of stimulation – the brain's operative 'hypothesis' about the structure of the impinging environment – is the cause to which the highest probability is assigned given all the available endogenous and exogenous evidence. (*Ibid.*, p.6)

Le système cognitif utilise les indices de bas niveaux et les connaissances préétablies sur le monde pour répondre à cette question. Ainsi, l'hypothèse opérationnelle la plus probable correspondant aux informations reçues par le système visuel est un espace en trois dimensions (spatial et distal ; tandis que pour le système tactile, ce sera l'espace de la peau (spatial mais non distal) :

The default hypothesis space for causal inference in everyday vision (the space of world states over which the posterior distribution is computed) is a *distant scene space*, in which different hypotheses correspond to different possible arrays of objects at a distance from the perceiver's eyes. [...] By contrast, the default hypothesis space for causal inference in everyday touch is a *contacting object space*, in which different hypotheses correspond to different possible objects in contact with the surface of the perceiver's body. (*Ibid.*)

Selon ces définitions bayésiennes, la perception distale dans la substitution sensorielle est l'hypothèse opérationnelle sélectionnée par la cognition de l'utilisateur – autrement dit, la perception distale est la cause environnementale la plus probable pour rendre compte des stimulations proximales reçues. La présence d'objets à distance dans une scène en trois dimensions est ce qui explique le mieux les ressentis du sujet lors de son utilisation des

⁴⁴ Briscoe précise qu'il s'agit d'une simplification des modèles bayésiens.

dispositifs – et c’est pourquoi l’attribution distale a lieu. Il faut maintenant expliquer pourquoi la perception distale est l’hypothèse opérationnelle sélectionnée dans la substitution sensorielle.

Briscoe s’appuie sur le système de substitution sensorielle visuo-tactile du TVSS pour étayer son interprétation. Dans ce dispositif, le système cognitif doit interpréter des stimulations proximales tactiles. Mais si l’hypothèse opérationnelle pour des sensations tactiles est un espace de contact (soit l’espace correspondant à la surface de la peau), comment expliquer l’émergence d’une perception distale ? Pour résoudre ce problème, Briscoe s’appuie sur deux arguments.

(1) Tout d’abord, il explique pourquoi la perception distale n’émerge pas lorsque le sujet est dans un rapport passif au dispositif, c’est-à-dire lorsqu’il n’y a pas de mouvement. Dans ce cas, toutes les « preuves » endogènes et exogènes reçues par le système sont compatibles avec une interprétation haptique de la cause de la stimulation.

When a subject outfitted with a TVSS device lacks control of the camera’s movements and is not otherwise able to register its position, all of the available endogenous and exogenous evidence is consistent with the default haptic interpretation of incoming sensory stimulation: the most likely cause of that stimulation is direct, bodily contact with an object of some kind. From a causal inference perspective, it is thus unsurprising that she does not learn to perceive spatially remote objects and features by means of TVSS. There is simply no reason for her perceptual systems to shift away from the hypothesis that the tactile stimulations she is receiving have an ordinary tactile cause. (*Ibid.*)

L’action est l’évènement qui va indirectement provoquer le « changement d’hypothèse » du système ; indirectement, dans la mesure où ce qui importe est que les sensations provoquées par les mouvements de la caméra soient tactiles. En effet, les connaissances ou croyances préalables du système sont incompatibles avec le fait que déplacer une caméra portée dans les mains ou montée sur la tête provoque des changements de stimulation tactiles dans le dos. L’espace (en deux dimensions) du toucher n’est donc plus une hypothèse possible pour expliquer les sensations ressenties⁴⁵

⁴⁵ On note que cet argument présuppose la distinction précédemment établie entre variations tactiles et proprioceptives – puisque ce sont les deux qui sont ici en désaccord.

When the subject has the ability to guide and keep track of the camera's movement, she also has a significant amount of voluntary control over whether and how the vibrotactile stimulation she experiences undergoes change. In consequence, the situation is now one that conflicts with the default haptic interpretation: it is not typically possible to modify tactile stimulation on the surface of one's back by moving a camera mounted on a tripod or on one's head! The observed coupling between camera movement and vibrotactile stimulation is evidence that the latter's cause resides outside of the hypothesis space for everyday touch. (*Ibid.*)

Ce n'est pas l'action en soi qui importe, mais le fait que les sensations (musculaires et proprioceptives) associées aux mouvements aient pour conséquence « inattendue » des sensations tactiles.

(2) Le second argument pour l'hypothèse opérationnelle d'une perception distale est que l'interface entre l'utilisateur et le dispositif de substitution sensorielle fournit des indices en faveur d'une telle perception. Tout d'abord, le contrôle actif de la caméra permet de procurer des informations concernant la position relative du corps par rapport à la caméra et donc par rapport à l'objet à détecter : les caractéristiques de la structure de l'objet par rapport à l'individu (hauteur, taille...) produisent des variations de structure de l'image enregistrée par la caméra, qui produit des variations de structure dans les ressentis tactiles. Ensuite, le contrôle actif de la caméra permet – comme cela a déjà été mentionné par Gapenne (2014) – de situer les objets (et l'espace) *en rapport avec l'individu* ; autrement dit, cela permet de distinguer soi-même du monde.

As Bach-y-Rita writes, *'In the absence of motor control over the orientation of the sensory input, a person may have no idea from where the information is coming, and thus no ability to locate [its source] in space'* (2004: 90). Another key reason, then, that active control over the movements of the camera matters is that it generates information about the camera's body-relative position necessary for causal inference to the way objects are arrayed in space at distance from the subject's body. Such causal inference, on the present interpretation, is the essence of distal attribution. (*Ibid.*, p.7)

Comme on l'a vu, la proprioception est essentielle en tant que source d'information concernant les changements de positions du corps par rapport à la caméra (et à l'espace). Briscoe cite également l'importance potentielle d'une copie efférente : la copie efférente

serait une « copie » des commandes motrices envoyées aux muscles (une copie générée par et dans le cerveau). Cette copie permet au système de « prédire » le retour sensoriel (*feedforward*) qui sera reçu après activation du muscle et de comparer cette prédiction au retour sensoriel « actuel » (*feedback*), généré notamment par la proprioception. C'est cette comparaison entre copie efférente et information proprioceptive qui permet au système d'organiser les mouvements. L'auteur du concept de copie efférente, Von Helmholtz (1867), explique ainsi la localisation des objets visuels par le cerveau : la position d'un objet par rapport à soi est calculée à partir (1) de la position de l'objet sur la rétine et (2) de la prédiction (grâce à la copie efférente) de la position des yeux dans l'orbite. Ceci explique pourquoi les déplacements de nos yeux (saccades) dans une scène visuelle sont si rapides, et pourquoi le mouvement de l'œil est « prévu » dans le cerveau avant la saccade⁴⁶.

L'hypothèse de Briscoe est que l'action, via le contrôle de la caméra, génère des informations basées sur la proprioception et la copie efférente. Ces informations concernent la manière structurelle dont la position de la caméra change par rapport à la position du corps. Ce sont elles qui permettent l'inférence causale de la perception distale.

2. L'hypothèse de l'information : le rôle contingent du mouvement

Pour Briscoe, cette approche est une alternative à une interprétation sensorimotrice du processus d'apprentissage à l'œuvre dans la substitution sensorielle : ce n'est pas le mouvement auto-généré en soi qui est au cœur du processus d'apprentissage, mais plutôt *l'information perceptive ou proprioceptive* apportée par ce mouvement. Briscoe appelle cette hypothèse « hypothèse de l'information ». Elle est selon lui une variante de l'« hypothèse de l'invariance » proposée par Siegle et Warren (2010) et basée sur la théorie gibsonienne. L'hypothèse de l'information de Briscoe nous intéresse car elle est en fait une synthèse des éléments apportés par l'approche gibsonienne, par l'interprétation de Siegle et Warren de la triangulation, et par l'explication du rôle de la proprioception proposée par Gapenne.

Briscoe cite les études expérimentales menées autour du phénomène de l'adaptation au prisme ; ce phénomène désigne la capacité des individus à s'adapter au port de prismes qui

⁴⁶ Le pic d'activation dans le colliculus supérieur – c'est-à-dire l'endroit du cerveau où est codé le mouvement de l'œil – a lieu 20 ms avant la saccade.

renversent, inversent ou déplacent latéralement l'image rétinienne (pour une revue, voir Rock, 1966 ; Welch, 1978). Or, pour que l'adaptation ait lieu, il a été avancé l'hypothèse que le mouvement est nécessaire. Held et Hein (Held & Hein, 1958 ; Hein & Held, 1962 ; Held, 1965) ont comparé le port des prismes dans des conditions passives ou actives des participants. Dans la condition active le sujet déplace lui-même sa main, tandis que dans la condition passive la main du sujet est déplacée (selon la même trajectoire que dans la condition active) par un expérimentateur. L'adaptation aux prismes n'est reportée que dans la condition active, c'est-à-dire dans la condition où les participants s'engagent dans des mouvements qu'ils produisent eux-mêmes. Held et Hein réfèrent à ces analyses pour défendre la « théorie de la réafférence » (« *reafference theory* ») : “according to the reafference theory, subjects exhibit stable adapt to optical rearrangement only when they receive visual feedback from self-produced bodily movement, i.e., reafferent visual stimulation” (Briscoe, forthcoming, p.7). Le concept de réafférence est un exemple d'application de la copie efférente. Lorsque le message sensoriel (message afférent) est comparé à la copie efférente et que les deux informations concordent, la copie est « annulée » ; c'est ce phénomène qui est appelé « réafférence ». Or, pour Held et Hein, l'action est nécessaire dans la mesure où elle fournit un feedback proprioceptif *via* des mouvements. En ce sens, les mouvements ne peuvent être alors qu'auto-générés, puisque sans eux il n'y a pas de retour proprioceptif. Le feedback proprioceptif permet la réafférence dans la mesure où il est responsable de la comparaison entre les informations sensorielles reçues et celles qui avaient été prédites (i.e la copie efférente).

Néanmoins, à la suite de ces auteurs d'autres études (Singer & Day, 1966 ; Templeton, Howard, & Lowman, 1966 ; Fishkin, 1969) ont montré que l'adaptation au prisme pouvait en fait avoir lieu sans que le participant ne s'engage dans des mouvements et même sans aucune action motrice (Howard, Craske, & Templeton, 1965 ; Kravitz & Wallach, 1969). L'adaptation au prisme est notamment possible quand est fourni aux participants un feedback visuel généré par un indicateur passif. Ainsi, les informations nécessaires à l'adaptation du prisme ne sont pas des informations de réafférence, mais des informations concernant le réarrangement optique : c'est ce que Briscoe appelle « l'hypothèse de l'information ».

In general, the extent to which adaptation occurs seems to depend not on the availability of reafferent stimulation from motor actions, as Held proposed, but rather on the presence of either of two related kinds of information concerning 'the presence and

nature of the optical rearrangement' (Welch, 1978). Following Welch, I shall refer to this alternative to the reafference theory as the *information hypothesis*. (*Ibid.*, pp.9-10)

Il existe deux types d'informations propres au réarrangement optique. La première porte sur la direction des objets par rapport à l'observateur (Rock, 1966 ; chapitres 2-4). Elle repose sur le fait qu'un mouvement vers l'avant laisse intacte la perception d'un objet situé en face de soi, contrairement à la perception des objets en périphérie – il s'agit donc d'une source stable d'information spatiale. La seconde information consiste en l'écart enregistré entre la position visuellement perçue des membres et la position ressentie par la proprioception (Wallach, 1968) – il s'agit autrement dit d'une information concernant la différence entre la vue et le toucher.

De là, Briscoe conclut que le mouvement n'est pas en soi nécessaire : les informations concernant la distance des objets par rapport à l'individu et la position du corps de l'individu par rapport aux objets (soit les deux informations nécessaires à l'adaptation de la perception) peuvent être en principe apportées autrement. Si le mouvement a été autant mis en avant, c'est qu'il a un rôle facilitateur dans la mesure où il est la source la plus commune et la plus précise pour ces informations.

The information hypothesis [...] predicts that action will *facilitate* adaptation when it generates information either about the world (in particular, the real radial directions of objects from the perceiver) or about the perceiver's body (in particular, the real positions of her limbs) that conflicts with the way things look as a result of prismatic displacement. According to this view', Rock writes, '[active] movement is important only because it allows for certain kinds of information to be registered, not because movement *per se* is necessary' (1966: 42). (*Ibid.*, p.10)

Briscoe applique cette hypothèse de l'information à l'acquisition de la perception distale dans le TVSS. Le contrôle actif de la caméra *facilite* selon lui l'attribution distale en tant que générateur d'informations proprioceptives et propres à la copie efférente concernant la manière donc la caméra change d'inputs en fonction des positions du corps.

Active control over camera movement facilitates distal attribution in TVSS not because it enables subjects to master the laws of sensorimotor contingency governing use of the

device, but rather because it generates proprioceptive and efference-copy based information about the camera's changing body-relative position. (*Ibid.*)

Cette approche est selon Briscoe alternative à l'approche sensorimotrice : le mouvement n'est pas nécessaire à l'acquisition d'une perception distale en tant que partie des contingences sensorimotrices, mais en tant que générateur d'informations proprioceptives et de la copie efférente.

3. Une remise en cause de l'approche sensorimotrice pour expliquer l'attribution distale dans la substitution sensorielle ?

L'hypothèse de l'information proposée par Briscoe est-elle véritablement conflictuelle avec l'interprétation sensorimotrice ? Pour nous, elle serait plutôt un apport conséquent, un complément à cette interprétation.

L'argument de Briscoe est que l'hypothèse de l'information contredit l'hypothèse sensorimotrice car le mouvement *en soi* n'est pas nécessaire dans l'acquisition de la perception distale ; seules le sont les informations qu'il apporte. L'idée est alors que ces informations pourraient être transmises par une autre source que le corps, rendant le rôle du mouvement contingent. Mais le fait que les informations proprioceptives puissent être théoriquement apportées par une autre source que le corps ne veut pas dire qu'elles le soient : on peut éventuellement envisager que des informations de type proprioceptives puissent être délivrées autrement que par le mouvement dans un contexte expérimental de laboratoire, mais dans un contexte écologique le corps reste nécessaire et primordial pour l'acquisition de ces informations. Surtout, il est nécessaire et primordial pour l'acquisition de ces informations *au niveau du développement de l'individu* : les informations de type proprioceptives qui peuvent être générées dans un contexte de laboratoire par une autre source que le mouvement sont interprétables en ces termes *uniquement parce que l'individu a acquis des expériences sensorimotrices qui lui permettent d'interpréter ces informations*. Comme le sujet de Molyneux – qui a besoin d'apprendre les mots correspondant à ses (nouvelles) sensations pour distinguer le cube de la sphère – sera capable de distinguer ces deux objets une fois les mots acquis, les individus ayant une expérience sensorimotrice de la proprioception (le couplage action-proprioception mentionné par Gapenne) seront capables de « reconnaître »

une information apportée habituellement par le corps si celle-ci vient d'une autre source. Mais de même que les mots « cube » et « sphère » n'ont aucune signification visuelle pour le sujet de Molyneux avant que celui-ci ne retrouve la vue, les informations proprioceptives n'ont de sens pour l'individu que parce qu'il a un corps capable de mouvement. Le mouvement, en tant que générateur d'expériences sensorimotrices, n'est donc pas contingent mais absolument nécessaire.⁴⁷ Ce que l'hypothèse de l'information nous permet, c'est de préciser un apport essentiel à la définition du mouvement : *le mouvement est nécessaire et constitutif de l'attribution distale en tant que générateur, contenant et contenu de l'information proprioceptive et de l'information concernant la copie efférente.*

Il est donc possible de replacer l'hypothèse de l'information dans le contexte d'une théorie sensorimotrice : dans ce cas, on peut alors dire que le mouvement *est* l'information permettant à l'individu de faire la distinction entre ses sensations, ses actions et les conséquences de ses actions. Le contrôle actif de la caméra dans la substitution sensorielle n'a pas qu'un rôle de facilitation dans l'attribution distale, pour la raison qu'il génère des informations basées sur la proprioception et sur la copie efférente concernant le changement de la position de la caméra en fonction de la position relative du corps (“Active control over camera movement facilitates distal attribution in TVSS [...] because it generates proprioceptive and efference-copy based information about the camera's changing body-relative position.” Briscoe, forthcoming, p.1) : le contrôle actif de la caméra est nécessaire car il *est* ces informations.

L'hypothèse de l'information, en plus de permettre de préciser la définition et le rôle du mouvement dans l'attribution distale, nous invite à nuancer l'approche sensorimotrice. Nous avons déjà évoqué l'importance de distinguer la théorie des invariants sensorimoteurs de Gibson et la théorie sensorimotrice d'O'Regan et Noë. Nous définissons les contingences sensorimotrices comme des invariants sensorimoteurs définis à un niveau incarné, concret : un processus automatique non-conscient mettant en lien les mouvements de l'observateur et les invariants dans la structure des stimulations reçues. En accord avec Gibson, ce qui importe

⁴⁷ Un autre argument pourrait être développé : dans le domaine de la robotique et de l'intelligence artificielle, on pourrait faire l'hypothèse que des informations de type proprioceptives soient délivrées (au niveau du programme et/ou de la machine) sans mouvement et que le robot ou le programme soit capable d'acquérir une expérience de type sensorimotrice sans mouvement. Dans ce cas, l'hypothèse de l'information serait effectivement en contradiction avec la théorie sensorimotrice. Or, la modélisation des expériences motrices est le domaine le moins avancé et le plus complexe de la robotique. Depuis ces dernières années, la robotique d'attache justement à intégrer le mouvement chez les robots pour que ceux-ci acquièrent une certaine expérience de la motricité (et pour leur délivrer des informations s'apparentant à la proprioception et à la copie efférente).

n'est donc pas la manière dont les mouvements font varier les sensations, mais au contraire la manière dont les mouvements révèlent *ce qui ne change pas*.

Bibliographie

Briscoe, R. (Forthcoming). Bodily action and distal attribution in sensory substitution. Dans F. Macpherson, *Sensory substitution and augmentation*. Proceedings of the British Academy.

Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36, 181-253.

Fishkin, S. (1969). Passive vs. active exposure and other variables related to the occurrence of hand adaptation to lateral displacement. *Perceptual and Motor Skills*, 29, 291-297.

Hein, A., & Held, R. (1962). A neural model for labile sensorimotor coordinations. Dans E. Bernard, & M. Kare, *Biological Prototypes and Synthetic Systems* (Vol. 1, pp. 71-74). New York: Plenum Press.

Held, R. (1965). Plasticity in sensory-motor systems. *Scientific American*, 213, 84-94.

Held, R., & Hein, A. (1958). Adaptation of disarranged hand-eye coordination contingent upon re-afferent stimulation. *Perceptual and Motor Skills*, 8, 87-90.

Hohwy, J. (2013). *The Predictive Brain*. Oxford: Oxford University Press.

Howard, I., Craske, B., & Templeton, W. (1965). Visuomotor adaptation to discordant exafferent stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 70, 189-191.

Kersten, D., & Yuille, A. (2003). Bayesian models of object perception. *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 263-275.

Kravitz, J., & Wallach, H. (1966). Adaptation to displaced vision contingent upon vibrating stimulation. *Psychonomic Science*, 6, 465-466.

- Mamassian, P., Landy, M., & Maloney, L. T. (2002). Bayesian modeling of visual perception. Dans R. Rao, B. Olshausen, & M. Lewicki, *Probabilistic Models of the Brain*. Cambridge: MIT Press.
- Rescorla, M. (2015). Bayesian Perceptual Psychology. To appear in . Dans M. Matthen, *The Oxford handbook of philosophy of perception*. Oxford: Oxford University Press.
- Rock, I. (1966). *The Nature of Perceptual Adaptation*. New York: Basic
- Shams, L., & Beierholm, U. (2010). Causal inference in perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 425-432.
- Singer, G., & Day, R. (1966). Spatial adaptation and aftereffect with optically transformed vision. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 725-731.
- Templeton, W., Howard, I., & Lowman, A. (1966). Passively generated adaptation to prismatic distortion. *Perceptual and Motor Skills*, 22, 140-142.
- Wallach, H. (1968). Informational discrepancy as a basis of perceptual adaptation. Dans S. Friedman, *The Neuropsychology of Spatially Oriented Behaviour* (pp. 209-230). Homewood, Illinois: Dorsey Press.
- Welch, R. (1978). *Perceptual Modification: Adapting to Altered Sensory Environments*. New York: Academic Press.

Perspectives neuroscientifiques sur la coordination perception-action (PAC)

PAC (Perception-Action Coordination) est un cadre théorique proposé par Ridderinkhof (2014). Ce cadre – bien qu’assez large – a l’intérêt de présenter des principes communs à notre approche pour rendre compte du lien perception-action et permet l’intégration des théories sensorimotrices et idéomotrices. Il permet de replacer notre approche dans une perspective neuroscientifique. Ce rapprochement nous paraît important en ce qu’il a souvent été reproché aux théories de la cognition incarnée et située leur incompatibilité avec les découvertes des neurosciences – considérées comme étant davantage valides scientifiquement notamment par l’autorité médiatique acquise par les images du cerveau (IRM, EEG...). Cette version des neurosciences profondément cognitiviste s’inscrit dans un dualisme cerveau-corps où priment les métaphores de la machine (cerveau comme ordinateur, mémoire comme données stockées, esprit comme logiciel...) et le découpage fonctionnel en aires cérébrales d’un encéphale toujours considéré pour lui-même et jamais dans le corps qui l’accompagne. PAC nous intéresse pour trois raisons :

(1) PAC incorpore la notion selon laquelle la perception est un processus construit qui sculpte les entrées sensorielles de manière à engendrer des affordances pour l’action, en accord avec Gibson. Elle distingue la perception du flux sensoriel et l’action du mouvement, ce qui permet d’affirmer que « la perception est la conséquence de l’action autant que sa cause ».

Our view on PAC must also incorporate the notion that perception is a constructive process that sculpts sensory inputs such as to engender some affordance for action (Gibson, 1979). A major function of perception is the guidance of action directed at satisfying one’s needs and attaining one’s goals. Perception is thus distinguishable from mere sensory flux, and action is distinguishable from mere movement, by virtue of a coordination that is ingrained in the individual’s experience, expertise, and preferences, and aimed at accomplishing desirable ends or avoiding undesirable ones. [...] Perception is the consequence of action just as much as it is its cause. Thus, as a blueprint for PAC, interactive coordination will serve us better than a one-way stream of transformations from input to output. (Ridderinkhof, 2014, p.5)

(2) Cette distinction entre flux sensoriel et mouvements, ainsi que l'inscription de la notion de la causalité dans l'idée de circularité vont ici de pair avec un mécanisme idéomoteur – comme le montre notamment la NOTION d'« images anticipatoires » du mouvement.

PAC must entail some anticipatory image of the movements that may occur, together with their respective outcomes. Such images are reflections of how the brain's reaction to the environment will affect the organism. (*Ibid.*)

(3) PAC met en avant l'enracinement du lien perception-action dans l'expérience

In order to predict action outcomes, PAC must be rooted in learning from experience. We are confronted with environmental challenges that incur an overwhelming variety of fickle opportunities, perils, and demands for action. Such interactive behavior is guided by pragmatic processes that embed sensorimotor coordination in prior knowledge and experiences (Gibson, 1979). [...] Our view on PAC must accommodate processes of predicting action effects based on learning from experience, as well as action affordances resulting from such prediction learning. (*Ibid.*)

Ridderinkhof fait notamment référence à Engel (2010) pour expliciter le tournant neuroscientifique permettant de réconcilier la cognition incarnée et située avec les études sur le cerveau – appelé « tournant pragmatique ». En effet, les neurosciences sont particulièrement ancrées dans une approche cognitiviste où les études sont focalisées sur des structures particulières du cerveau, elles-mêmes associées à des fonctions compartimentées. Le tournant qu'Engel qualifie de « pragmatique » des neurosciences doit donc redéfinir son niveau d'explication et les pré-conceptions sur lesquelles elles reposent. D'un cerveau-« miroir » et machine qui reflète le monde, il faut passer à une approche qui considère les processus cérébraux comme des « véhicules de construction du monde », qui supportent l'expérience et l'action.

If we decide to go for a pragmatic turn in cognitive science, our view of the brain and its function seem to be changing profoundly. The conceptual premises of the pragmatic stance can be mapped to the neuroscientific level of description, and thus lead us to redefining at least some of the neurobiologist's explananda. What neuroscience, then, has to explain is not how brains act as world-mirroring devices, but how they can serve as “vehicles of world-making” that support, based on individual learning history, the

construction of the experienced world and the guidance of action. (Ridderinkhof, 2014, p.226)

Les patterns neuronaux sont alors considérés non plus comme les véhicules abstraits d'images internes d'un monde externe, mais bien comme le support de « savoir-faire » (par opposition à connaissance) d'actions potentielles. Les activités neuronales sont redéfinies dans ce contexte comme supports de possibilités d'actions sur le monde, versus des descriptions objectives et universelles d'états du monde extérieur. Si ce retournement théorique peut sembler à première vue contre-intuitif, il prend tout son sens par l'analogie suivante : les activités neuronales sont comme toute activité du corps sur le monde. De même que les activités du corps sur un objet sont définies par rapport à l'ensemble des possibilités offertes par l'objet (par exemple, une chaise offre la possibilité de s'asseoir, de grimper, d'être déplacée, etc.) et non par la représentation de l'objet lui-même (la chaise n'est pas synonyme de l'action de s'asseoir), les activités cérébrales « prescrivent » un ensemble de possibilités plutôt que ne « décrivent » un état du monde.

Neural patterns do not carry “images” of the external world. What these patterns support are not abstract structural descriptions of objects and scenes but, rather, kinds of know-how about sets of possible actions that produce viable segmentations of the scene. Neural activity patterns, on this account, support the organisms capacity of structuring situational contexts; they “prescribe” possible actions, rather than “describing” states of the outside world. (Ridderinkhof, 2014, p.228)

Afin d'accompagner concrètement le tournant des neurosciences, Engel propose les prémisses suivantes :

- L'objet d'étude des neurosciences ne devrait plus être focalisé sur la relation entre stimuli et patterns neuronaux, mais sur les actions engagées par le sujet et la situation à laquelle il est soumis dans le cadre de l'étude menée.
- Les études des fonctions des circuits neuronaux doivent prendre en compte le caractère profondément actif, sélectif et s'inscrivant dans un processus de construction de la cognition.
- Tout processus sensoriel doit être considéré dans une perspective holistique, comme un processus à l'origine de prédictions sur des événements sensoriels à venir et reflétant des contraintes sur les actions qui lui sont rattachées.

- La fonction des neurones et des modules neuronaux doit être considérée non plus isolément, mais comme liée à d'autres sous-systèmes du système cognitif et nerveux.
- Les neurosciences doivent tourner leurs investigations autour des dynamiques intrinsèques en jeu dans le cerveau – ce sont les interactions entre les différents mouvements du cerveau qui constituent l'ensemble du système cognitif.

Expérimentalement, des études ont démontré le rôle de l'activité exploratoire et des interactions sensorimotrices pour le développement neural et la plasticité. C'est le cas de la substitution sensorielle – même si les résultats ne sont pas nécessairement formulés en ces termes – où la plasticité cérébrale appariée à l'apprentissage des appareils est conjointe à la nécessité des mouvements exploratoires et des retours sensoriels. D'autres études (Held, 1965 ; Majewska & Sur, 2006) montrent la dépendance du développement des circuits neuronaux dans le système visuel au contexte de l'action et de l'attention. Cette dépendance de la plasticité par rapport au contexte est inscrite dans la coordination perception-action. En effet, le dynamisme des connexions cérébrales est le reflet du mécanisme idéomoteur, où des mouvements qui activent au départ un pattern spécifique de neurones se trouvent associés par répétitions à des sensations qui activent un autre pattern spécifique pour former un pattern émergent propre à cette relation et propre à la perception. On observe ainsi chez les musiciens entraînés des changements fonctionnels et structurels propres aux actions nécessaires pour maîtriser leur instrument (Münste, Altenmüller, & Jäncke, 2002).

Engel mentionne également la décharge corollaire comme support empirique d'une approche énonciviste des neurosciences. La décharge corollaire est le mécanisme neuronal permettant à un organisme de distinguer des signaux auto-générés par des changements sensoriels internes des signaux générés par un monde « externe ». Néanmoins, pour que la notion de décharge corollaire s'inscrive bien dans une approche énonciviste de la cognition, cette distinction entre signaux auto-générés et signaux extérieurs ne doit pas être préalable mais construite par l'organisme. Autrement dit, si un « monde extérieur » est préalable à la décharge corollaire, celle-ci n'est plus que le récepteur passif de ce monde et équivaut à la glande pinéale de Descartes permettant de faire le lien entre un monde intérieur et un monde extérieur réel et objectif. En revanche si la décharge corollaire est considérée comme structure émergente de l'organisme en phase avec son développement sensorimoteur, alors celle-ci construit le monde extérieur autant qu'elle est construite par lui – ce qui est en accord avec une approche intégrée et incarnée. Toutes les investigations expérimentales s'intéressant à la

décharge corollaire (e.g : Desmurget et Grafton, 2000 ; Crapse et Sommer, 2008 ; Wilson et Knoblich, 2005) révèlent que des activités motrices semblent impliquées dans la genèse de prédictions concernant des évènements sensoriels (Christensen, Lundbye-Jensen, Geertsen, Petersen, Paulson, & Nielsen, 2007).

Le pas des neurosciences vers une approche incarnée de la cognition est tributaire de la prise en compte des signaux corporels, et donc d'une émancipation du réductionnisme cerveau-esprit : « le cerveau n'est pas à lui seul responsable de l'esprit, bien qu'il soit un organe nécessaire à sa manifestation. En fait, un cerveau isolé est un non-sens biologique, aussi dépourvu de sens qu'un individu isolé. » (Huxley, 1959) (*"The brain alone is not responsible for the mind, even though it is a necessary organ for its manifestation. Indeed an isolated brain is a piece of biological nonsense as meaningless as an isolated individual"*.) Ceci implique notamment la prise en compte des signaux neuronaux dans leur globalité corporelle plus large, par exemple, en intégrant les signaux d'organes comme le cœur ou l'estomac. C'est ce que fait le groupe « Visual Cognition » du Laboratoire de Neurosciences Cognitives (Inserm U960, ENS, Paris) : voir par exemple Park & Tallon-Baudry (2014) ; Babo-Rebelo, Richter, and Tallon-Baudry (2016) ; Richter, Babo-Rebelo, Schwartz, and Tallon-Baudry (2017) ; Park et al. (2017) ; et Tallon-Baudry, Campana, Park, & Babo-Rebelo (2017). « Sortir du cerveau » a également permis la découverte de neurones présents dans l'estomac (le système nerveux entérique), ayant donné naissance au nouveau domaine médical prometteur de la « neurogastroentérologie » (voir Gershon, 1998).

Pour résumer, la plasticité cérébrale exhibée par la substitution sensorielle ainsi que nos suggestions pour une approche incarnée du mécanisme idéomoteur et sensorimoteur, où les caractéristiques des mouvements influencent la perception spatiale tridimensionnelle, sont en accord avec l'approche de la coordination Perception-Action (PAC). Celle-ci ouvre une voie prometteuse pour les neurosciences et appelle à refonder le fonctionnalisme modulaire cérébral en prenant en compte le cerveau dans sa dynamique corporelle. PAC est également en accord avec une approche constructiviste de la cognition.

Bibliographie

- Babo-Rebelo, M., Richter, C., & Tallon-Baudry, C. (2016). Neural responses to heartbeats in the default network encode the self in spontaneous thoughts. *Journal of Neuroscience*, *36*, 7829-7840.
- Christensen, M. S., Lundbye-Jensen, J., Geertsen, S. S., Petersen, T. H., Paulson, O., & Nielsen, J. B. (2007). Premotor cortex modulates somatosensory cortex during voluntary movement without proprioceptive feedback. *Nature Neuroscience*, *10*, 417-419.
- Crapse, T. B., & Sommer, M. A. (2008). Corollary discharge across the animal kingdom. *Nature Reviews. Neuroscience*, *9*, 587-600.
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modelling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 423-431.
- Engel, A. K. (2010). Directive Minds: How Dynamics Shapes Cognition. Dans J. Stewart, O. Gapenne, & E. Di Paolo, *Enaction: towards a new paradigm for cognitive science* (pp. 219-243). Cambridge: MIT Press.
- Gherson, M. D. (1998). *The second brain*. New York: Harper Paperbacks.
- Huxley, J. (1959). Introduction to The phenomenon of man. Dans P. Teilhard de Chardin, *The phenomenon of man* (B. Wall, Trad.). New York: Harper.
- Majewska, A. K., & Sur, M. (2006). Plasticity and specificity of cortical processing networks. *Trends in Neurosciences*, *29*, 323-329.
- Münte, T. F., Altenmüller, F., & Jäncke, I. (2002). The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature reviews: Neurosciences*, *3*, 473-478.
- Park, H., & Tallon-Baudry, C. (2014). The neural subjective frame: from bodily signals to perceptual consciousness. *Philosophical Transactions Royal Society B*, *369*.
- Park, H., Bernasconi, F., Salomon, R., Tallon-Baudry, C., Spinelli, L., Seeck, M., et al. (2017). Neural sources and underlying mechanisms of neural responses to heartbeats,

and their role in bodily self-consciousness : an intracranial EEG study. *Cerebral Cortex* , 1-14.

Richter, C., Babo-Rebelo, M., Schwartz, D., & Tallon-Baudry, C. (2017). Phase-amplitude coupling at the organism level: the amplitude of spontaneous alpha rhythm fluctuations varies with the phase of the infra-slow gastric basal rhythm. *NeuroImage* , 146, 951-958.

Ridderinkhof, R. (2014). Neurocognitive mechanisms of perception–action coordination: A review and theoretical integration. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* , 46, 3-29.

Tallon-Baudry, C., Campana, F., Park, H. D., & Babo-Rebelo, M. (2017). The neural monitoring of visceral inputs, rather than attention, accounts for first-person perspective in conscious vision. *Cortex*.

Wilson, M., & Knoblich, G. (2005). The case for motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychological Bulletin* , 131, 460-473.

TABLEAUX EXCEL DES DONNES BRUTS POUR CHAQUE EXPERIENCE

Pré-expérience : blocs Training, 2, 3, 4, 5 et 6

Pré-expérience : blocs 7 à 12

Etude 1, expérience 1, condition 1 : avec mouvements et avec effets

Etude 1, expérience 1, condition 2 : sans mouvements et avec effets

Etude 1, expérience 1, condition 3 : avec mouvements et sans effets

Etude 1, expérience 2, condition 1 : mouvements horizontaux extérieurs

Etude 1, expérience 2, condition 2 : mouvements vers l'avant et vers l'arrière

Etude 2, condition 1 : mouvements horizontaux extérieurs courts ou longs

Etude 2, condition 2 : mouvements vers l'avant et vers l'arrière courts ou longs

Pré-expérience : blocs Training, 2, 3, 4, 5 et 6

C = Corresponding

NC = Non-Corresponding

Subject		Bloc					
		Training	2	3	4	5	6
1	C	635,75	666,50	501,75	495,75	529,50	489,75
2	C	743,77	983,50	852,67	935,25	866,75	889,50
3	C	695,67	544,25	447,50	492,50	495,50	500,67
4	C	848,50	789,50	765,00	728,50	764,25	737,50
5	C	707,75	627,75	640,00	676,50	674,50	656,00
6	C	692,00	490,33	477,75	391,25	384,75	354,75
7	C	704,00	557,25	489,25	508,75	479,25	446,50
8	C	794,50	495,25	496,75	560,00	452,75	384,75
9	C	521,00	559,00	478,75	444,50	522,00	501,25
10	C	681,25	620,25	655,25	601,50	660,50	599,00
11	C	1128,00	1047,25	946,25	755,25	850,25	738,50
12	C	979,00	817,75	705,25	865,75	699,50	700,25
13	C	822,50	787,25	689,75	752,25	679,75	677,50
14	C	715,75	619,75	632,25	661,50	673,75	594,25
15	C	647,00	764,33	710,25	639,00	568,50	566,25
16	C	842,75	739,50	710,25	763,33	819,25	761,00
17	C	620,75	535,00	516,00	631,25	490,75	470,00
18	C	722,25	730,00	734,00	656,25	694,00	686,25
19	C	906,33	769,50	716,67	637,50	789,50	601,25
20	C	669,00	554,00	603,75	602,25	765,75	587,00
<i>Moyenne =</i>		753,88	684,90	638,45	639,94	643,04	597,10
<i>Ecart-type =</i>		137,90	154,82	136,62	137,34	143,71	136,56
21	NC	845,25	747,50	787,75	782,75	797,50	901,75
22	NC	984,50	955,75	996,00	871,75	971,75	949,75
23	NC	938,67	945,00	859,75	667,00	802,25	857,00
24	NC	1511,00	1104,25	1120,00	1123,50	1420,75	1362,25
25	NC	1087,75	1136,00	1129,50	1064,50	1482,00	1007,00
26	NC	1127,25	939,00	944,67	1019,25	990,25	900,00
27	NC	858,00	720,50	716,75	725,00	650,75	608,25
28	NC	933,50	679,33	779,33	792,50	720,00	605,25
29	NC	942,50	795,75	831,00	885,25	787,00	769,00
30	NC	954,75	1027,25	1033,00	966,00	960,00	898,25
31	NC	872,75	760,00	821,50	838,00	787,75	771,50
32	NC	1017,75	941,00	1098,25	817,50	867,00	912,50
33	NC	1312,33	1018,00	1012,33	1068,25	1078,50	1148,75
34	NC	1072,25	993,00	937,25	922,50	878,25	768,00
35	NC	745,50	682,00	655,25	611,50	565,50	594,75
36	NC	1070,75	945,25	885,75	807,75	796,00	749,00

37	NC	752,00	780,00	755,75	665,25	593,00	666,25
38	NC	1110,00	925,25	883,50	775,25	709,25	744,00
39	NC	932,25	846,50	758,75	750,75	673,50	693,00
40	NC	721,75	631,00	991,00	690,25	554,50	647,50
	<i>Moyenne =</i>	989,53	878,62	899,85	842,23	854,28	827,69
	<i>Ecart-type =</i>	189,93	146,87	138,79	146,58	249,46	193,52

Pré-expérience : blocs 7 à 12

C = Corresponding

NC = Non-Corresponding

Subject		Bloc					
		7	8	9	10	11	12
1	C	494,50	452,67	424,00	457,75	485,50	367,50
2	C	914,75	805,25	884,00	825,33	755,25	876,75
3	C	493,00	509,00	446,00	510,00	472,50	531,25
4	C	675,00	665,25	609,75	741,75	636,00	662,25
5	C	664,25	567,75	581,00	595,75	516,50	483,75
6	C	383,75	346,00	368,75	296,33	307,67	320,75
7	C	442,50	519,00	502,00	523,25	571,50	521,00
8	C	416,25	359,25	330,50	356,00	423,75	374,67
9	C	556,75	490,00	546,75	737,33	713,00	655,25
10	C	706,25	728,75	668,33	658,50	739,25	679,50
11	C	726,50	707,00	824,25	870,50	822,00	822,25
12	C	730,75	664,25	732,50	797,25	765,50	830,50
13	C	666,50	713,00	614,50	606,75	601,00	625,50
14	C	521,50	582,75	578,75	544,50	545,00	589,50
15	C	584,25	574,75	637,00	561,25	595,50	580,00
16	C	863,75	873,25	765,00	791,25	694,50	697,25
17	C	558,75	475,00	493,75	410,50	473,50	542,50
18	C	639,75	681,00	661,75	656,50	600,25	633,75
19	C	657,75	539,25	542,00	623,25	502,50	504,00
20	C	727,75	612,25	610,50	688,33	683,75	667,00
	<i>Moyenne =</i>	621,21	593,27	591,05	612,60	595,22	598,25
	<i>Ecart-type =</i>	140,92	138,45	143,84	158,40	132,18	150,15
21	N	800,25	915,33	909,75	979,75	969,25	861,50
22	N	877,67	861,50	775,00	778,75	788,50	826,33
23	N	923,25	759,00	723,50	926,50	831,50	823,50
24	N	1013,00	820,75	988,00	1019,00	999,00	1277,25
25	N	967,75	1003,50	1028,75	1025,25	921,75	1042,00
26	N	883,75	1038,50	909,50	1271,50	1238,25	1023,00

27	N	610,75	619,75	661,25	789,00	740,75	682,25
28	N	542,00	464,67	498,00	667,00	537,00	784,00
29	N	697,75	709,25	771,50	719,50	708,25	718,25
30	N	1007,25	874,50	819,25	974,50	860,25	860,75
31	N	759,75	795,25	741,50	864,00	856,75	860,50
32	N	992,75	816,33	887,00	1047,25	1102,75	1045,50
33	N	945,00	924,33	998,50	1261,75	1013,50	1034,25
34	N	779,25	728,00	744,50	737,75	691,25	755,50
35	N	567,00	622,50	600,75	589,50	652,75	564,50
36	N	865,50	822,00	1047,25	918,00	901,50	838,00
37	N	731,25	541,67	645,00	825,25	687,75	803,00
38	N	791,67	850,50	757,75	722,25	771,25	656,50
39	N	829,25	734,33	655,25	739,50	837,25	840,00
40	N	756,67	465,75	569,33	785,25	677,75	684,33
<i>Moyenne =</i>		817,08	768,37	786,57	882,06	839,35	849,05
<i>Ecart-type =</i>		141,06	161,32	159,02	183,67	169,22	167,13

Etude 1, expérience 1, condition 1 : avec mouvements et avec effets

Subject	Discrepancies in cm		Absolute positions of crosses in cm			
	X-Axis	Y-Axis	Pre-test		Post-test	
			X-Axis	Y-Axis	X-Axis	Y-Axis
1	1,06	0,58	7,24	2,81	8,30	3,39
2	0,38	1,04	5,83	4,05	6,20	5,09
3	0,21	-0,35	11,76	7,75	11,98	7,40
4	0,83	-0,11	6,46	3,83	7,29	3,71
5	1,93	0,61	8,55	5,85	10,48	6,46
6	1,11	0,34	9,68	7,13	10,79	7,46
7	-0,75	-0,35	5,59	4,43	4,84	4,08
8	1,59	0,16	8,38	6,30	9,96	6,46
9	0,55	0,36	6,88	4,61	7,43	4,98
10	0,03	-0,55	8,28	5,14	8,30	4,59
11	0,45	-0,01	5,86	6,41	6,31	6,40
12	1,55	0,58	9,13	7,20	10,68	7,78
13	-0,10	1,24	8,64	5,44	8,54	6,68
14	1,53	0,88	8,55	5,95	10,08	6,83
15	0,28	0,58	6,13	4,85	6,40	5,43
16	0,60	0,58	6,83	5,33	7,43	5,90
17	0,65	-0,20	6,90	5,58	7,55	5,38
18	2,78	0,88	9,50	6,90	12,28	7,78
19	0,75	0,13	8,43	7,15	9,18	7,28
20	1,80	-0,05	7,23	6,13	9,03	6,08
21	0,17	-0,25	6,68	4,83	6,85	4,58
22	0,43	-0,23	10,40	7,15	10,83	6,93
23	0,38	0,13	7,95	6,40	8,33	6,53
24	2,13	-0,23	5,48	5,83	7,60	5,60
25	0,78	-0,28	5,93	5,75	6,70	5,48
26	0,68	-0,05	5,28	5,65	5,95	5,60
27	1,55	1,20	6,70	4,03	8,25	5,23
28	0,41	1,15	11,51	4,23	11,93	5,38
29	0,65	0,65	4,70	3,78	5,35	4,43
30	1,95	1,28	7,38	5,20	9,33	6,48
31	3,03	1,20	4,78	4,98	7,80	6,18
32	1,00	0,33	6,85	4,90	7,85	5,23
33	0,00	-0,20	9,40	7,15	9,40	6,95
34	1,70	0,58	8,03	6,15	9,73	6,73
35	0,90	0,30	4,53	5,43	5,43	5,73
36	2,00	0,40	6,53	5,23	8,53	5,63
Moyenne =	0,97	0,34	7,44	5,54	8,41	5,88
Ecart-type =	0,83	0,53	1,82	1,16	1,94	1,11

Etude 1, expérience 1, condition 2 : sans mouvements et avec effets

Subject	Discrepancies in cm		Absolute positions of crosses in cm			
	X-Axis	Y-Axis	Pre-test		Post-test	
			X-Axis	Y-Axis	X-Axis	Y-Axis
1	0,73	-0,18	10,63	7,10	11,35	6,93
2	0,15	-0,05	13,10	8,88	13,25	8,83
3	0,65	0,50	7,20	5,50	7,85	6,00
4	0,28	0,45	7,70	5,60	7,98	6,05
5	0,50	0,13	9,18	3,20	9,68	3,33
6	-1,73	0,07	6,00	2,15	4,28	2,23
7	0,25	-0,75	9,63	5,20	9,88	4,45
8	-0,17	0,15	14,10	9,55	13,93	9,70
9	-0,40	-0,13	5,08	3,55	4,68	3,43
10	0,85	0,13	7,10	3,50	7,95	3,63
11	0,37	-0,10	7,70	3,38	8,08	3,28
12	1,33	1,13	5,18	3,45	6,50	4,58
13	0,42	0,10	12,35	8,68	12,78	8,78
14	-0,53	-0,63	6,93	4,40	6,40	3,78
15	1,05	0,05	9,25	6,90	10,30	6,95
16	-0,18	0,80	7,63	4,65	7,45	5,45
17	0,20	0,70	8,65	4,98	8,85	5,68
18	-0,30	0,65	7,48	3,78	7,18	4,43
19	0,55	0,43	6,23	4,30	6,78	4,73
20	-0,82	0,70	7,38	4,58	6,55	5,28
21	-0,05	0,05	13,73	9,45	13,68	9,50
22	1,43	0,35	9,90	6,73	11,33	7,08
23	0,50	0,83	8,15	5,23	8,65	6,05
24	0,25	-0,15	11,20	7,08	11,45	6,93
25	-0,28	0,22	6,78	4,30	6,50	4,53
26	-1,13	-0,73	5,88	3,88	4,75	3,15
27	-0,63	0,25	6,83	3,70	6,20	3,95
28	0,03	-0,68	5,38	3,63	5,40	2,95
29	-1,38	0,80	6,35	3,23	4,98	4,03
30	-1,60	-1,05	7,30	5,00	5,70	3,95
31	-1,58	0,18	9,55	5,93	7,98	6,10
32	0,25	0,97	5,05	2,88	5,30	3,85
33	0,30	-0,58	6,65	4,68	6,95	4,10
34	-0,20	-0,55	9,00	4,20	8,80	3,65
35	0,00	0,13	5,00	2,90	5,00	3,03
36	-0,23	0,15	7,08	3,20	6,85	3,35

Moyenne =	-0,03	0,12	8,12	4,98	8,09	5,10
Ecart-type =	0,78	0,53	2,45	1,93	2,70	1,95

Etude 1, expérience 1, condition 3 : avec mouvements et sans effets

Subject	Discrepancies in cm		Absolute positions of crosses in cm			
	X-Axis	Y-Axis	Pre-test		Post-test	
			X-Axis	Y-Axis	X-Axis	Y-Axis
1	1,60	0,90	6,60	5,13	8,20	6,03
2	0,73	0,15	6,35	4,48	7,08	4,63
3	0,02	0,73	5,45	4,53	5,48	5,25
4	1,30	0,53	7,58	5,48	8,88	6,00
5	-0,50	0,33	6,75	4,08	6,25	4,40
6	1,10	0,75	8,20	4,83	9,30	5,58
7	0,43	0,80	8,58	5,63	9,00	6,43
8	1,25	0,50	7,00	3,98	8,25	4,48
9	0,30	0,58	9,15	5,65	9,45	6,23
10	0,40	0,93	6,18	4,65	6,58	5,58
11	-0,10	0,50	5,70	3,73	5,60	4,23
12	0,98	-0,38	5,40	4,68	6,38	4,30
13	0,13	1,15	9,53	5,75	9,65	6,90
14	0,73	0,65	11,60	6,65	12,33	7,30
15	0,73	0,58	7,58	4,43	8,30	5,00
16	0,85	0,02	7,40	4,55	8,25	4,58
17	-0,40	-0,90	12,13	7,83	11,73	6,93
18	0,35	0,80	8,28	4,78	8,63	5,58
19	-0,05	-0,05	10,83	6,33	10,78	6,28
20	0,93	0,65	8,33	6,45	9,25	7,10
21	-0,78	0,02	6,53	6,73	5,75	6,75
22	1,00	1,08	5,10	4,65	6,10	5,73
23	0,35	-0,45	4,65	3,93	5,00	3,48
24	-0,78	0,24	8,53	6,08	7,75	6,31
25	0,62	-0,05	8,10	6,38	8,73	6,33
26	3,05	1,20	7,38	5,63	10,43	6,83
27	0,43	0,63	8,43	6,03	8,85	6,65
28	-0,88	-0,60	10,40	6,63	9,53	6,03
29	0,85	0,65	11,05	6,80	11,90	7,45
30	1,08	1,23	8,53	5,83	9,60	7,05
31	0,33	0,28	10,58	7,65	10,90	7,93
32	-1,48	0,05	10,45	6,38	8,98	6,43
33	0,03	-0,30	8,50	6,65	8,53	6,35
34	0,05	1,15	11,55	6,85	11,60	8,00
35	0,63	0,23	11,78	8,38	12,40	8,60
36	-0,08	-0,50	8,58	3,43	8,50	2,93

	0,42	0,39	8,30	5,60	8,72	5,99
Moyenne =						
Ecart-type =	0,81	0,55	2,05	1,22	2,00	1,28

Etude 1, expérience 2, condition 1 : mouvements horizontaux extérieurs

Subject	Discrepancies in cm		Absolute positions of crosses in cm			
	X-Axis	Y-Axis	Pre-test		Post-test	
			X-Axis	Y-Axis	X-Axis	Y-Axis
1	1,65	1,15	11,00	6,95	12,65	8,10
2	1,63	1,38	10,35	6,85	11,98	8,23
3	0,70	0,50	7,65	6,15	8,35	6,65
4	1,65	-0,30	6,20	4,38	7,85	4,08
5	0,73	0,25	12,35	8,80	13,08	9,05
6	0,70	0,10	6,93	4,85	7,63	4,95
7	1,38	0,33	6,35	3,88	7,73	4,20
8	0,18	-0,48	5,33	3,98	5,50	3,50
9	0,45	0,40	7,20	6,95	7,65	7,35
10	1,03	0,07	8,23	5,85	9,25	5,93
11	1,20	1,10	12,08	8,05	13,28	9,15
12	-0,68	-0,58	9,23	6,63	8,55	6,05
13	0,23	0,60	5,45	4,10	5,68	4,70
14	1,00	0,45	6,23	3,50	7,23	3,95
15	0,65	1,33	5,53	4,48	6,18	5,80
16	0,08	-0,73	4,93	4,13	5,00	3,40
17	0,53	0,43	6,25	4,40	6,78	4,83
18	0,02	-0,28	9,55	6,78	9,58	6,50
19	2,25	0,88	8,33	6,03	10,58	6,90
20	-0,20	1,53	7,00	3,73	6,80	5,25
21	0,83	-0,10	4,35	3,78	5,18	3,68
22	0,23	-0,38	8,70	5,38	8,93	5,00
23	0,83	-0,05	10,60	6,18	11,43	6,13
24	1,88	0,55	4,38	3,78	6,25	4,33
25	1,93	0,40	8,50	6,95	10,43	7,35
26	0,23	0,30	7,43	5,33	7,65	5,63
27	4,18	-1,50	7,53	5,88	11,70	4,38
28	0,27	1,15	8,55	5,25	8,83	6,40
29	2,33	0,68	7,18	5,73	9,50	6,40
30	1,30	0,23	6,68	4,60	7,98	4,83
31	1,13	0,85	11,08	5,93	12,20	6,78
32	0,30	0,50	4,45	2,75	4,75	3,25
33	0,83	-0,25	6,63	5,15	7,45	4,90
34	1,45	0,68	8,00	5,10	9,45	5,78
35	1,53	1,18	6,30	2,90	7,83	4,08
36	0,80	0,30	8,58	5,20	9,38	5,50
37	3,48	1,58	7,53	5,80	11,00	7,38
38	2,98	1,03	8,43	6,00	11,40	7,03

39	-0,05	1,13	8,23	4,80	8,18	5,93
40	0,78	0,73	4,98	2,75	5,75	3,48
41	0,85	0,25	7,33	4,18	8,18	4,43
42	1,38	1,35	10,55	5,63	11,93	6,98
43	0,65	0,18	4,93	2,78	5,58	2,95
44	0,60	0,40	9,30	4,43	9,90	4,83
45	-0,60	0,28	10,78	5,33	10,18	5,60
46	1,00	0,33	9,08	4,45	10,08	4,78
47	-0,13	-0,13	9,95	5,13	9,83	5,00
48	0,83	0,45	8,73	4,58	9,55	5,03

Moyenne =	0,98	0,42		7,81	5,13	8,79	5,55
Ecart-type =	1,04	0,64		1,93	1,11	2,16	1,21

Etude 1, expérience 2, condition 2 : mouvements vers l'avant et vers l'arrière

Subject	Discrepancies in cm		Absolute positions of crosses in cm			
	X-Axis	Y-Axis	Pre-test		Post-test	
			X-Axis	Y-Axis	X-Axis	Y-Axis
1	0,18	0,25	6,65	6,15	6,83	6,40
2	0,93	-0,02	6,63	4,73	7,55	4,70
3	0,53	0,65	5,70	3,55	6,23	4,20
4	0,65	0,73	9,15	5,53	9,80	6,25
5	-0,25	-0,30	7,13	6,35	6,88	6,05
6	0,65	0,45	8,68	5,88	9,33	6,33
7	0,45	0,30	9,88	6,25	10,33	6,55
8	1,40	0,53	5,83	4,73	7,23	5,25
9	2,40	-0,05	8,83	5,10	11,23	5,05
10	2,00	2,58	6,63	4,68	8,63	7,25
11	1,33	0,65	7,15	6,23	8,48	6,88
12	-0,60	0,10	7,23	3,35	6,63	3,45
13	0,93	0,63	7,73	6,65	8,65	7,28
14	1,13	1,03	6,25	4,48	7,38	5,50
15	-0,63	3,13	5,93	4,98	5,30	8,10
16	1,03	0,63	10,48	7,05	11,50	7,68
17	0,20	0,88	10,68	6,38	10,88	7,25
18	0,98	1,38	6,85	5,75	7,83	7,13
19	0,00	1,28	8,48	5,38	8,48	6,65
20	1,38	2,08	5,90	3,45	7,28	5,53
21	0,83	0,55	5,55	4,60	6,38	5,15
22	-0,08	0,93	7,70	7,15	7,63	8,08
23	1,23	0,63	5,45	5,80	6,68	6,43
24	0,35	0,60	7,83	5,63	8,18	6,23
25	0,02	0,00	5,90	5,10	5,93	5,10
26	0,70	0,88	5,28	3,20	5,98	4,08
27	1,90	1,63	4,93	3,93	6,83	5,55
28	0,15	0,73	4,23	5,28	4,38	6,00
29	-0,50	0,63	4,60	4,45	4,10	5,08
30	0,27	1,40	7,13	4,78	7,40	6,18
31	0,18	0,08	6,25	5,58	6,43	5,65
32	0,83	0,50	7,18	5,38	8,00	5,88
33	0,47	0,45	11,73	8,28	12,20	8,73
34	0,08	0,68	6,80	5,55	6,88	6,23
35	-0,93	1,78	5,73	3,83	4,80	5,60
36	0,22	2,23	7,30	5,50	7,53	7,73
37	0,83	0,73	7,18	6,03	8,00	6,75
38	1,25	1,15	5,95	5,03	7,20	6,18

39	-0,43	0,30	6,85	3,30	6,43	3,60
40	-0,40	0,95	9,15	6,98	8,75	7,93
41	0,70	1,35	8,65	5,88	9,35	7,23
42	0,83	0,60	5,73	5,20	6,55	5,80
43	1,20	0,63	10,40	7,65	11,60	8,28
44	0,93	0,70	9,13	5,75	10,05	6,45
45	0,55	0,35	6,48	5,05	7,03	5,40
46	0,25	0,45	12,38	7,88	12,63	8,33
47	-0,02	0,53	6,35	4,98	6,33	5,50
48	-1,33	0,65	6,38	5,03	5,05	5,68

Moyenne =	0,52	0,81		7,29	5,40	7,80	6,21
Ecart-type =	0,70	0,63		1,98	1,23	2,13	1,22

Etude 2, condition 1 : mouvements horizontaux extérieurs courts ou longs

Subject		Discrepancies in cm			
		X-Axis		Y-Axis	
		Long range	Short range	Long range	Short range
1	mapping 1	1,35	0,3	1,45	0,45
2	mapping 1	0,85	0,75	1,15	0,45
3	mapping 1	1,55	1,55	1,25	0,25
4	mapping 1	0,55	0,35	0,3	-0,3
5	mapping 1	1,55	1,6	-0,5	0,7
6	mapping 1	1,05	0,2	0,7	-0,55
7	mapping 1	1,55	1,1	-0,2	0,15
8	mapping 1	1,05	1,65	-0,05	1,3
9	mapping 1	0,6	-0,1	-0,3	0,75
10	mapping 1	1,2	0,3	0,35	0,2
11	mapping 1	1,15	0,3	0,05	0,55
12	mapping 1	0,75	1,05	1,3	0,05
13	mapping 1	1	0,3	-0,15	-1
14	mapping 1	0,85	1,5	-0,25	1
15	mapping 1	0,15	0,15	0,55	0,1
16	mapping 1	0,7	0,95	-0,35	-0,3
17	mapping 1	1,55	0,3	1,3	-1,1
18	mapping 1	0,35	0,1	-1,05	-0,1
19	mapping 1	1,1	1,25	0,5	-0,3
20	mapping 1	1,3	-0,75	-0,5	-0,8
21	mapping 1	0,2	-0,75	0,65	0,05
22	mapping 1	0,45	-1,1	0,35	-0,9
23	mapping 1	1	0,65	0,7	-0,3
24	mapping 1	0,1	0	0,15	0,75
25	mapping 2	1,65	0,65	0,1	-0,55
26	mapping 2	1,45	0,05	-1,2	0,45
27	mapping 2	1,65	0,7	0,1	-0,6
28	mapping 2	1,25	1,55	-0,85	1,1
29	mapping 2	2,1	0,75	1,2	0,25
30	mapping 2	1,15	1,45	0,35	0,8
31	mapping 2	1,25	1,1	-0,05	0,15
32	mapping 2	0,75	0,55	-0,3	-1
33	mapping 2	2,15	1,3	0,85	0,55
34	mapping 2	0,15	-0,2	0,05	-0,75
35	mapping 2	1,25	0,55	0,65	0,8
36	mapping 2	0,8	0,25	-0,4	0,55
37	mapping 2	1,1	0,95	0,9	1,2
38	mapping 2	1,3	0	0,5	1

39	mapping 2	1,45	1,35	0,6	0,25
40	mapping 2	0,25	-0,75	0,25	-0,1
41	mapping 2	1,25	-0,3	-0,1	1,6
42	mapping 2	1,3	0,55	0,9	0,2
43	mapping 2	1,65	1,05	-0,05	0,65
44	mapping 2	1,2	-0,45	1,1	0,85
45	mapping 2	1,5	-0,05	0,8	0,9
46	mapping 2	1,4	1,5	0,8	0,2
47	mapping 2	1,4	1,7	0,95	0,55
48	mapping 2	0	-0,4	-1,25	0,1

Moyenne =
Ecart-type =

1,07	0,53	0,28	0,21
0,56	0,76	0,67	0,71

Etude 2, condition 2 : mouvements vers l'avant et vers l'arrière courts ou longs

Subject		Discrepancies in cm			
		X-Axis		Y-Axis	
		Long range	Short range	Long range	Short range
1	mapping 1	-1,15	-1,40	-0,35	0,70
2	mapping 1	0,30	-0,05	0,80	0,20
3	mapping 1	2,05	0,60	1,45	0,60
4	mapping 1	0,25	1,10	2,35	0,60
5	mapping 1	1,50	-0,05	0,75	-0,05
6	mapping 1	1,80	1,25	0,75	1,10
7	mapping 1	2,35	0,55	3,60	1,15
8	mapping 1	2,05	-1,20	2,00	0,70
9	mapping 1	1,25	0,20	0,90	0,90
10	mapping 1	0,10	0,35	0,75	0,15
11	mapping 1	-1,35	-0,10	0,30	-0,40
12	mapping 1	-0,60	0,55	0,10	-0,05
13	mapping 1	0,05	0,60	0,60	0,30
14	mapping 1	-0,05	0,40	0,65	0,50
15	mapping 1	-5,85	-1,40	1,05	-1,75
16	mapping 1	0,45	-0,70	0,55	0,25
17	mapping 1	0,15	1,05	0,75	0,05
18	mapping 1	-0,65	0,45	0,20	1,10
19	mapping 1	-0,40	0,95	1,35	0,35
20	mapping 1	-1,75	0,15	0,75	0,85
21	mapping 1	1,20	0,15	0,75	0,85
22	mapping 1	1,45	1,40	0,90	0,20
23	mapping 1	0,80	0,90	0,95	1,20
24	mapping 1	0,30	-0,40	-0,10	1,00
25	mapping 2	-1,10	0,20	2,80	0,10
26	mapping 2	0,05	-0,25	0,20	0,30
27	mapping 2	0,65	1,50	0,80	0,85
28	mapping 2	0,75	1,15	0,40	0,25
29	mapping 2	1,15	0,60	0,90	-0,40
30	mapping 2	-0,75	0,05	0,95	0,55
31	mapping 2	1,00	0,55	1,15	1,05
32	mapping 2	1,00	1,05	1,05	1,00
33	mapping 2	0,50	1,75	0,75	1,45
34	mapping 2	0,05	0,50	0,40	1,60
35	mapping 2	0,95	1,40	0,85	0,55
36	mapping 2	1,55	0,70	0,75	0,45
37	mapping 2	-0,10	0,80	0,15	-0,10
38	mapping 2	1,30	0,90	0,60	0,40

39	mapping 2	-0,55	-1,20	2,40	-0,40
40	mapping 2	1,05	0,50	1,75	1,00
41	mapping 2	1,55	1,25	1,80	1,40
42	mapping 2	2,70	-0,80	0,65	1,45
43	mapping 2	1,00	-1,90	1,85	0,75
44	mapping 2	0,25	-0,70	0,65	-0,50
45	mapping 2	1,05	-0,20	0,50	-0,25
46	mapping 2	1,10	-0,10	1,95	0,15
47	mapping 2	1,25	-0,90	1,30	0,70
48	mapping 2	-0,65	-0,10	0,15	1,05

Moyenne =

0,42	0,25	0,97	0,50
-------------	-------------	-------------	-------------

Ecart-type =

1,38	0,87	0,64	0,67
------	------	------	------

ABSTRACT

Distal attribution refers to the capacity to attribute localization to proximal sensations (light on the retina, sound waves, etc.) in the distal space. Works in sensory substitution allowed identifying and testing this process. This thesis aims to investigate distal attribution thanks to a joint and integrated approach of sensorimotor and ideomotor theories. In two studies, we use a classic ideomotor procedure consisting in associating proximal sensory consequences to movements. The first study shows that the attribution of distal characteristics to proximal sensations is determined by the bidirectional association sensations-movements. Moreover, we show that movement *orientation* is consubstantial with distal characteristics we confer to sensory consequences. The second study replicates these results and extends them to characteristics related to the *range* of movement. These experiments bring us to define distal attribution as an embodied process depending on an ideomotor mechanism, thus making our studies fall within a constructivist approach. Theoretical as well as experimental limits to our studies invite us to propose ideas for new experiments aiming to better define the importance of movement in perception.

Keywords: spatial perception, distal attribution, movement, ideomotor mechanism, sensorimotor contingencies, sensory substitution

RESUME

L'attribution distale réfère à notre capacité d'attribuer à nos sensations proximales (lumière sur la rétine, ondes sonores, etc.) une localisation dans l'espace distal. Les travaux issus de la substitution sensorielle ont permis d'identifier et de tester ce processus. L'objectif de cette thèse est d'investiguer l'attribution distale grâce à une approche conjointe et intégrée des théories sensorimotrices et idéomotrices. Dans deux études, nous utilisons une procédure idéomotrice classique consistant à associer des conséquences sensorielles proximales à des mouvements. La première étude montre que l'attribution de caractéristiques distales aux sensations proximales est déterminée par l'association bidirectionnelle sensations – mouvements. De plus, nous montrons que l'*orientation* du mouvement est consubstantielle des caractéristiques distales que nous conférons aux conséquences sensorielles. La seconde étude réplique ces résultats et les étend aux caractéristiques liées à l'*amplitude* du mouvement. Ces expériences nous amènent à définir l'attribution distale comme un processus sensori-moteur et relevant d'un mécanisme idéomoteur, inscrivant ainsi nos études dans une perspective constructiviste. Les limites théoriques et expérimentales de nos études nous conduisent alors à proposer de nouvelles expériences visant à mieux définir l'importance du mouvement dans la perception.

Mots clés: perception spatiale, attribution distale, mouvement, mécanisme idéomoteur, contingences sensorimotrices, substitution sensorielle