



HAL
open science

Influence des sensations corporelles dans l'anticipation de l'action

Guillaume Thébault

► **To cite this version:**

Guillaume Thébault. Influence des sensations corporelles dans l'anticipation de l'action. Psychologie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2019. Français. NNT : 2019MON30100 . tel-03009793

HAL Id: tel-03009793

<https://theses.hal.science/tel-03009793>

Submitted on 17 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivrée par l'**Université Paul Valéry – Montpellier III**

Préparée au sein de l'école doctorale 60
« **Territoires, Temps, Sociétés, Développement** »
Et de l'unité de recherche
EA 4556 « Laboratoire Epsilon »

Spécialité : **Psychologie Cognitive**

Présentée par **Guillaume Thébault**

Influence des sensations corporelles dans l'anticipation de l'action

Soutenue le 24 juin 2019 devant le jury composé de

Mme Michèle Molina, PU, Université de Caen
Mr François Osiurak, PU, Université de Lyon
Mme Sophie Martin, Mcf HDR, Université de Montpellier
Mme Christel Bidet-Ildei, Mcf HDR, Université de Poitiers
Mr Roland Pfister, AP, Université de Würzburg
Mr Christophe Gernigon, PU, Université de Montpellier
Mr Denis Brouillet, PU, Université de Montpellier

Rapportrice
Rapporteur
Examinatrice
Examinatrice
Examinateur
Examinateur
Directeur



L'important, pour moi, est de partir, d'aller au mieux de ses possibilités et de chercher à les améliorer.

Altius.

On m'a dit, « l'important c'est de ne pas s'arrêter », j'ai essayé de retenir la leçon.

Un sage

Remerciements

Cette thèse a été une aventure scientifique et humaine.

Je voudrais remercier ici tous les chercheurs qui m'ont guidé vers l'établissement de mes propres recherches.

En premier lieu, je remercie Denis Brouillet, directeur de cette thèse.

Je remercie également toutes les personnes ayant participé à mes travaux de recherche relatifs à cette thèse : Sophie Martin, Satya Lancel, Stéphane Chabrier, Vincent Dérozier, Arthur Michalland, et Roland Pfister.

Je remercie Christel Bidet-Ildei, Sophie Martin, Michèle Molina, Christophe Gernigon, François Osiurak et Roland Pfister d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

En espérant être exhaustif, je tiens à remercier tous les collègues chercheurs et étudiants, principalement l'équipe d'Epsilon à Montpellier et l'équipe du réseau AVCnn, particulièrement l'équipe de Saint-Etienne, qui m'ont accompagné d'une manière ou d'une autre dans ce parcours :

Julie Boiché, Pom Charras, Clara, Gimenez, Adeline Gomez, Anne-Claire Large, Pascale Maury, Clémence Mazzocco, Audrey Milhau, Caroline Vagnot, Johan Briglia, Thibaut Brouillet, Lionel Brunel, Thomas Camus, Fabrice Da Silva, Gérard Dray, Vincent Gautheron, Romàn Josa, Philippe Servajean, Raphaël Trouillet.

Enfin, je remercie ma famille pour leur soutien indéfectible : Cécile, Maëlle, Elouan, Gaëlle, Michèle, Xavier, Yves, ainsi que tous mes amis.

Table des matières

Introduction	4
I – CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES.....	6
CHAPITRE 1 – La théorie idéomotrice	6
1.1. Origines de la théorie idéomotrice	6
1.2. La théorie idéomotrice de James	9
1.3. Expérimentations du principe idéomoteur	10
1.4. Anticipation des effets reliés au corps	15
1.5. Synthèse	19
CHAPITRE 2 – Les sensations corporelles	20
2.1. La peau et le toucher	21
2.1.1. Mécanorécepteurs de la peau.....	21
2.1.2. Le toucher.....	21
2.1.3. Le toucher sensuel	22
2.2. Les tendons, les muscles et le mouvement.....	23
2.2.1. Propriocepteurs et mouvement	23
2.2.2. Le mouvement	23
2.3. Intégration des sensations corporelles.....	25
2.3.1. Voies lemniscales	25
2.3.2. L'intéroception	26
2.4. Couplages perception - action.....	28
2.4.1. Couplage sensori-moteur.....	28
2.4.2. Développement et couplage somato-moteur	29
2.4.3. La simulation somato-sensorielle	31
2.4.4. Couplages et contraintes corporelles	32
2.5. Synthèse	34
CHAPITRE 3 – L'expérience des sensations corporelles	35
3.1. L'énaction.....	35
3.2. Expérience du corps, sensation et perception.....	38
3.3. Synthèse.....	41

II – EXPÉRIMENTATIONS	42
CHAPITRE 1 – Problématique et hypothèses	42
CHAPITRE 2 – Une extension de Pfister et al. (2014)	46
2.1. Introduction	46
2.2. Synthèse.....	47
CHAPITRE 3 – Une extension de Kunde et al. (2004)	53
3.1. Introduction	53
3.2. Synthèse.....	54
CHAPITRE 4 – Anticiper la fluence motrice	74
4.1. Introduction	74
4.2. Synthèse.....	76
CHAPITRE 5 – Extensions	90
5.1. Anticiper la pression de l'éponge	90
5.1.1. Introduction	90
5.1.2. Méthode.....	91
5.1.3. Discussion	93
5.2. Conséquences de l'action sur la perception de l'effet	94
5.2.1. Introduction	94
5.2.2. Méthode.....	97
5.2.3. Discussion	98
CHAPITRE 6 – Applications	102
6.1. Action et développement.....	102
6.2. Anticipation et déficience motrice.....	105
III – DISCUSSION GÉNÉRALE	113
1. Rappels des principaux résultats	113
2. L'unité de l'action et sa temporalité.....	117
2.1. La temporalité de l'effet	118
2.2. La temporalité de l'action.....	120
3. La clinique à l'épreuve de la théorie idéomotrice	123
3.1. Anticiper des changements corporels.....	123
3.2. Accident vasculaire cérébral néonatal : un modèle d'étude de l'effet d'une contrainte subie à la naissance.....	126

4. Conclusion générale	129
Bibliographie.....	131
ANNEXE 1	142
ANNEXE 2	143
ANNEXE 3	144
RÉSUMÉ.....	146

Introduction

Le travail de thèse que nous présentons avait pour objet l'étude de l'anticipation des effets reliés au corps. Nous avons ancré ce travail autour de l'action idéomotrice telle qu'elle est définie par James (1890), c'est-à-dire tenant compte des effets du mouvement, tactiles et proprioceptifs. Cette approche n'avait pas été abordée de manière approfondie par la littérature et de nombreuses interrogations perduraient. En effet, les quelques travaux récents sur le sujet (*cf.* Pfister, 2019) n'explorent pas toute la complexité liée au mouvement, au toucher, et, plus globalement, à l'expérience phénoménologique de l'action. Les résultats que nous avons obtenus suggèrent que les sensations corporelles perçues à différentes échelles de temps sont anticipées et que ces prédictions façonnent les sensations corporelles elles-mêmes.

Ce document est organisé en trois parties.

La première présente les considérations théoriques relatives à notre sujet. Ainsi, cette partie se compose d'un premier chapitre sur l'action idéomotrice, suivi d'un second qui aborde les sensations corporelles, enfin le troisième chapitre concerne l'expérience de ces sensations corporelles.

La deuxième partie est consacrée aux expérimentations. La première expérience met en exergue qu'un effet tactile est anticipé lorsqu'il partage une intensité commune avec la réponse. La deuxième expérience aborde la question de l'influence de l'effet tactile sur la production de la réponse. Elle montre que l'effet proprioceptif produit au cours de la réponse est modulé en fonction des effets anticipés. Une troisième expérience s'intéresse plus particulièrement au mouvement, et introduit le concept de fluence motrice. Elle met en évidence que la perception de facilité avec laquelle nous réalisons un mouvement, comprise comme un effet proprioceptif, est anticipée. Nous continuons cette partie expérimentale par une étude sur l'anticipation d'un effet tactile concomitant avec la réponse motrice. Cette expérience montre un effet de contingence sensori-motrice associé à l'anticipation de l'effet tactile. La cinquième expérience portant sur le jugement perceptif de l'effet corporel indique que la perception des effets tactiles est atténuée. Pour clore cette partie, viennent deux travaux qui appliquent les précédentes expériences dans le contexte du développement et de la déficience motrice suite à une lésion cérébrale. Le premier présente une expérience sur l'anticipation d'un effet tactile auprès d'enfants de 4 et 9 mois. Le deuxième montre

qu'anticiper une action suite à un changement corporel nécessite une intégration de l'effet relié au corps.

La troisième partie est une discussion où est tout d'abord rappelé l'objectif de la thèse. Nous présentons ensuite les résultats expérimentaux obtenus. Cette discussion se poursuit autour de la question de la temporalité de l'action et de l'effet. Des considérations théoriques récentes viennent étayer et éclairer d'un regard nouveau nos résultats. Pris ensemble, ces données théoriques et empiriques nous permettent de conclure cette discussion sur des perspectives cliniques.

I – CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

CHAPITRE 1 – La théorie idéomotrice

Pour Berthoz (2015), l'anticipation est une des propriétés les plus importantes du vivant car elle permet d'atteindre un but. Chaque activité déterminée nécessite un pouvoir d'anticipation et donc une prédiction de l'avenir. Si le chat attrape sa proie en plein vol c'est qu'il a déterminé avec précision les conséquences de ses mouvements et ceux de sa proie. L'animal qui ne peut anticiper les conséquences de ses actions ne pourra pas survivre longtemps.

Sans qu'il soit question de survie, quoique, l'homme procède évidemment selon les mêmes mécanismes. Nos activités nous montrent combien nous sommes en permanence dans ce processus d'anticipation. Dans la vie quotidienne les exemples sont nombreux : appuyer sur un interrupteur pour allumer une lumière, sortir de la douche pour s'habiller, augmenter le chauffage pour avoir chaud, etc. Les buts recherchés vont ainsi de conséquences orientées sur l'environnement (*i.e.* allumer une lumière) à des conséquences portées sur des sensations corporelles (*i.e.* avoir chaud). On peut également distinguer dans ces quelques exemples des actes plus ou moins automatiques (*i.e.* appuyer sur un interrupteur) ou volontaires (*i.e.* augmenter le chauffage).

La théorie idéomotrice a pour objet d'expliquer l'ensemble de ces phénomènes sous un prisme commun qui peut se résumer à un mécanisme anticipatoire des effets de l'action. Néanmoins, cette définition consensuelle, qui est celle de James (1890), s'origine à partir de deux approches distinctes du principe idéomoteur, l'une médicale, l'autre philosophique. Par ailleurs, la théorie moderne du principe idéomoteur tend à éclipser une partie, celle automatique, des actions réalisées dans la vie quotidienne.

1.1. Origines de la théorie idéomotrice

Les précurseurs au principe idéomoteur décrit par James (1890) sont deux écoles de pensées distinctes, l'une britannique et médicale, impulsée par Laycock (1845) et l'autre, germanique et philosophique, inspirée par les travaux d'Herbart (1825). Cette double

influence a été décrite en détail par Stock et Stock (2004). Nous en relatons ici un bref aperçu auquel il convient d'ajouter les travaux de Bain (1855) car il a fortement influencé James dans ses principes (1890).

De la route britannique, pour reprendre le terme de Stock et Stock (2004), émerge le terme idéo-moteur. Plus précisément, la description qu'une *idée* peut déclencher un réflexe excito-moteur est formulée par Laycock en 1845. Ces travaux se rapportent à l'hydrophobie liée à la contraction de la rage. Un symptôme chez les malades atteints de la rage est le spasme hydrophobique qui correspond au déclenchement d'un spasme laryngé lors de la vue de l'eau. Ce premier type de réflexe est qualifié pour Laycock (1845, cité par Stock et Stock, 2004) comme un réflexe déclenché par un stimulus sensoriel proximal direct. Laycock retient également deux autres déclenchements possibles : par un stimulus sensoriel distal indirect (par exemple le son de l'eau) ; par un stimulus imaginé indirect, c'est-à-dire que la simple idée de l'eau conduit au déclenchement du spasme hydrophobique. L'interprétation de Laycock est basée sur un réflexe cérébral indépendant d'un contrôle volontaire du comportement. En effet, il suggère que ce mécanisme s'opère par une sorte de boucle d'interaction amorcée par des excitations cérébrales. Celles-ci provoquent des changements idéogènes (à comprendre comme des zones corporelles, voir par exemple Ribot, 1896 au sujet de l'hystérie) qui eux-mêmes déclenchent des excitations cérébrales des muscles combinées dans l'action avec ces zones corporelles. Il est intéressant de noter qu'aujourd'hui le spasme hydrophobique n'est pas considéré comme un réflexe conditionné étant donné que les premiers signes peuvent apparaître lorsque les patients prennent un bain (Hemachudha et al., 2002) ; or, selon la classification de Laycock, cela pourrait résulter d'un stimulus sensoriel distal indirect, soit d'une forme de conditionnement – ici interprété au regard du mécanisme idéo-moteur.

Sur ces prémices, Carpenter (1852, cité par Stock et Stock, 2004) introduit le terme *ideo-moteur* : « ... *the ideo-motor principle of action finds its appropriate place in the physiological scale [...] it may be applied to the explanation of numerous phenomena* ». Il intervient, selon Carpenter, lors d'une interruption de la conscience et de la volonté menant à un état où les muscles sont entièrement guidés par les idées. Ainsi, il argumente certains phénomènes difficilement expliqués à cette époque comme les états hypnotiques *via* un principe idéo-moteur.

Contrairement à la route britannique, qui a mis l'accent sur le caractère non-intentionnel des comportements, la route germanique met l'accent sur le contrôle volontaire des actions.

Un des points communs aux auteurs de la route germanique (Harleß, 1861 ; Herbart, 1825 ; Lotze, 1852 ; cités par Stock & Stock, 2004), est l'enracinement développemental de leur approche. Les mouvements effectués dans la vie utérine ou néonataux vont procurer à l'enfant des sensations, Harleß (1861, cité par Stock & Stock, 2004) parle même d'image sensorielle du mouvement. Ces sensations entraînent des changements dans l'environnement. Ce sont les effets du mouvement, au niveau des muscles et des articulations, associés au mouvement précédent qui serviront de base à la réalisation du futur mouvement. Toutefois, le déclenchement du mouvement repose sur l'implication de processus mentaux tels que la motivation, l'âme ou la volonté selon les auteurs. Cette conception est relativement proche de certaines théories développementales actuelles (e.g. Thelen & Smith, 1996, voir aussi Jouen & Molina, 2007 ; Molina & Jouen, 2014).

À l'inverse de la route britannique, la démarche théorique empruntée par la route germanique était de décrire les processus intentionnels du comportement et donc des mouvements volontaires. Par ailleurs, comme le stipulent Stock et Stock (2004), un des enjeux était de résoudre le problème de la séparation de corps et de l'esprit posé par Descartes. Dès lors, pour eux, le corps, l'action, les pensées sont réunies au sein d'une théorie... idéomotrice qui ne porte pas encore son nom.

Enfin, Bain (1855) a également porté un intérêt à la question de l'image et du mouvement. Il a influencé aussi bien James (1890) pour la formulation de l'action idéomotrice, que Piaget (1937) dans le développement de l'action chez l'enfant. En marge de la séparation du corps et de l'esprit, il bâtit une théorie liant sensations et esprit. Plus particulièrement, Bain soutient l'hypothèse que les « *Actions, Sensations, and States of Feeling, occurring together or in close succession, tend to grow together or cohere, in such a way that, when any one of them is afterwards presented to the mind, the others are apt to be brought up in idea* » (1902, p.341). L'accent est ainsi mis sur l'ensemble des sensations mais particulièrement celles associées au mouvement, qu'il nomme les sentiments musculaires. L'intérêt de Bain pour l'existence d'idées est présent dès 1855 où il explique que des idées permanentes occupent l'esprit. La plupart sont sujettes à la volonté mais certaines la dépassent et s'accomplissent réellement. Par ailleurs, tout comme le fait Lotze (1852, cité par James, 1890) il emploie l'exemple du pianiste qui anticipe les sons qu'il devra produire.

En résumé, la route britannique et la route germanique se distinguent par leur approche. La première innove avec le terme idéomoteur pour lui attribuer une fonction réflexe et non-intentionnelle dans des états corporels spécifiques ; la seconde tente d'expliquer les mécanismes de la volonté intentionnelle à travers l'idée des effets du mouvement.

1.2. La théorie idéomotrice de James

James (1890) emprunte le terme idéomoteur à Carpenter et s'inspire de Lotze (*cf.* § précédent) et Bain (1855) pour formaliser l'action idéomotrice dans ses fameux principes. L'action idéomotrice est une forme d'action volontaire. Elle se caractérise par son mécanisme et se dissocie des actions précédées de délibération.

Tout comme Herbart (1825) et Lotze (1852, *cf.* Stock & Stock, 2004) James (1890) s'inscrit dans une approche développementale pour considérer les mouvements volontaires. Ainsi, pour James « *les mouvements volontaires sont nécessairement des fonctions secondaires de l'organisme* » (p.473, 1909) dans la mesure où ils ont été appris. La première exposition à un événement déclenche des mouvements involontaires puisque nous ne pouvons pas prévoir, dans ce cas, les sensations qui seront éprouvées. Ces mouvements involontaires sont le prérequis à la vie volontaire d'où est fondée notre expérience, laquelle fournira les idées des mouvements possibles.

Selon James (1890) ces expériences multiples des mouvements mènent à des effets éloignés ou locaux (« *remote effects* » vs. « *resident effects* »). Les effets éloignés sont, par exemple, ceux produits par quelqu'un d'autre, nous voyons, nous sentons ou entendons les effets des mouvements produits. Les effets locaux sont ceux ressentis par nos propres mouvements, ce sont les impressions kinesthésiques fournies par les articulations, les muscles, et tactiles par la peau.

La structure de la théorie de l'acte volontaire de James (1890) est posée ; son cœur se résume à cette phrase : « *It is the anticipation of the movement's sensible effects, resident, or remote, and sometimes very remote indeed* » (p.521). Pour James la simple idée des sensations d'un mouvement, déclenchée par un stimulus par exemple, suffit à produire un mouvement volontaire par anticipation des effets de l'action. Il s'écarte ainsi des propositions de Carpenter (cité par James, 1890) et rejoint, comme le soulignent Stock et Stock (2004), les suppositions de Herbart (1825) et comme nous l'avons souligné, les travaux de Bain (1855).

Il est intéressant de noter qu'une insistance particulière est mise sur le caractère « furtif » de l'acte idéomoteur : « *Whenever movement follows unhesitatingly and immediately the notion of it in the mind, we have ideo-motor action* » (p.522). Ce fait est largement agrémenté par de nombreux exemples de la vie courante, dont certains tirés de Lotze. Si furtif qu'il est bien difficile, comme le dit James (p.523), d'en voir des actes volontaires car aucun but explicite – ou même verbalisé – ne survient, aucune décision n'est prise, mais uniquement des images des effets de l'action qui déclenchent les mouvements. En somme, l'acte idéo-

moteur constitue pour James (1890) le phénomène normal et courant des comportements de la vie quotidienne. Cet éclairage permet d’embrasser les influences historiques britanniques et germaniques. Il apparaît clair que, dans l’esprit de James (1890), l’acte volontaire revêt à la fois un caractère automatique (on le voit dans l’exemple du repas où les effets gustatifs sont anticipés sans intention explicite) autant qu’il peut se décliner dans un acte plus intentionnel (l’exemple pour sortir du lit).

Cette description du mécanisme idéomoteur peut paraître sommaire au regard du nombre des travaux actuels se référant aux postulats de James (1890), ou vis-à-vis du nombre d’expérimentations conduites à la lumière de ce mécanisme. L’explication simple est que James (1890) ne développe pas davantage l’acte idéomoteur, ou plus vraisemblablement – même si c’est assez péremptoire de dire cela – ça ne semblerait pas être utile devant l’évidence du mécanisme, en effet, comme il l’écrit : « *Mais pourquoi cette vérité n'est-elle pas de celles qui crèvent les yeux ?* » (p.567, 1909) ! Par ailleurs, ces pensées évoluent dans une psychologie débutante où l’expérimentation est relativement absente, notamment dans un contexte introspectif comme c’est le cas pour le mécanisme idéo-moteur tel qu’il est présenté par James (1980).

1.3. Expérimentations du principe idéomoteur

L’ensemble de ces travaux, notamment le concept d’« *idée* », a été enseveli par le courant behavioriste au début du vingtième siècle puis remis à l’ordre du jour par Greenwald (1970). L’ambition de Greenwald était d’apporter un éclairage expérimental sur le mécanisme idéo-moteur notamment par l’apport des travaux sur le conditionnement, ou plus largement les associations entre un stimulus et une réponse. Pour ce faire, il considère que l’on puisse rendre compte du principe idéomoteur par l’association entre un stimulus, une réponse et un effet sensoriel (« *sensorial feedback* » pour Greenwald). Le mécanisme se déroulerait en quatre étapes de conditionnement. La première est la production d’un effet suite à une association classique entre stimulus et une réponse. Puis, la répétition de ces expériences conduit à des images anticipatives conditionnées des effets sensoriels qui, troisième phase, modifient les performances globales. Enfin, dernière étape, les images des effets sensoriels anticipés exercent une influence sur les réponses d’une manière discriminée.

Cependant, comme il le souligne, le caractère *automatique* entre l’idée et l’action correspondante est loin d’être acquis, alors qu’il est indispensable pour James (1890).

Quoiqu'il en soit, Greenwald (1970) suggère d'expérimenter le mécanisme idéomoteur en deux phases : « *An experimental demonstration of the ideo-motor principle requires two phases. In the training phase, a response (R_A) is practiced to a specific stimulus (S_I) and distinctive sensory consequences (S_A) are experienced following the response. The purpose of the second, or test, phase is to demonstrate that conditioning of R_A to S_A ¹ [...] has occurred as a result of the S_I - R_A - S_A practice* » (p.88). Les résultats obtenus ultérieurement sont venus valider sa proposition.

En effet, cette séquence a été reprise plus récemment par Hommel (1996) puis par Elsner et Hommel (2001) dans le contexte du contrôle des actions. Dans la phase d'acquisition (« training phase »), un rectangle apparaissait sur un écran d'ordinateur (S_I) ; les participants devaient répondre sur une touche placée à droite ou une touche placée à gauche (R_A - R_B) entraînant un son fort ou faible (S_A - S_B). Dans la phase test, S_A ou S_B étaient délivrés. Les participants devaient appuyer sur la touche correspondante (respectivement R_A ou R_B), ou répondre selon un schéma inverse (soit R_A pour S_B et R_B pour S_A). Les résultats ont montré des temps de réponses plus courts pour les participants ayant répondu selon l'ordre correspond à la phase d'acquisition (*i.e.* S_A - R_A) que dans l'ordre inverse (*i.e.* S_A - R_B). De nombreux travaux construits sur ce paradigme ont trouvé des résultats similaires (Badets & Pesenti, 2011 ; Herwig & Waszak, 2012 ; Hoffmann et al., 2009 ; Pfister et al., 2011 ; Wolfensteller & Ruge, 2011 ; Ziessler & Nattkemper, 2011).

Pour Hommel et al. (2001), et dans la lignée de Greenwald (1970), ces résultats appuient l'idée que les actions sont contrôlées par l'anticipation de leurs effets. Ils proposent par la suite une théorie dite du codage des événements, TEC (pour « *Theory of Events Coding* ») dont le point central est un système commun qui résulte du couplage entre action et perception. Ce couplage, qui s'opère à partir des systèmes sensoriels (*e.g.* un son) et moteurs (*e.g.* un mouvement), code des événements dont l'activation facilitera la production des actions futures (*cf.* figure 1, p.12).

¹ S_A correspond à l'effet sensoriel produit par la réponse.

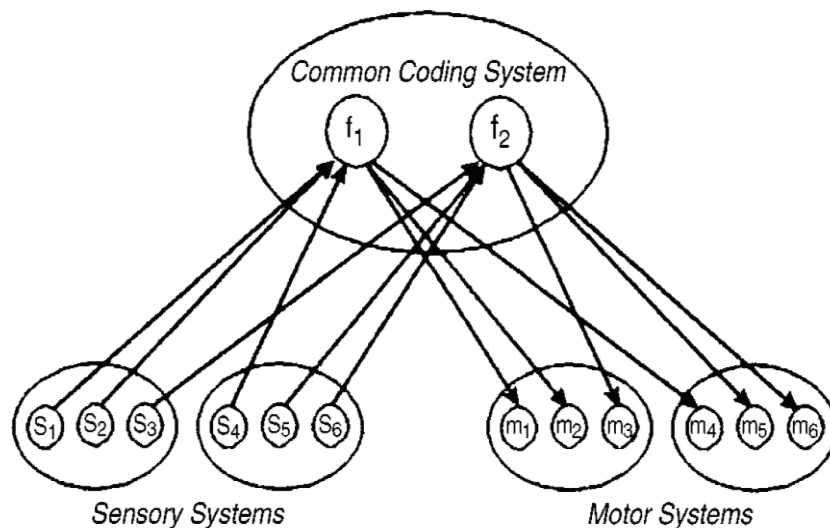


Figure 1 : la théorie du codage des événements (Hommel et al., 2001) repose sur un système de codage d'événement qui s'effectue lors d'un couplage de la perception et de l'action. Plus précisément, le codage distal s'effectue par l'association des caractéristiques communes des systèmes sensoriels et des systèmes moteurs qui surviennent lors d'un événement. Les systèmes sensoriels (ici s1, s2, etc.) représentent les caractéristiques sensorielles de l'événement qui se produit. Elles peuvent contenir des informations proximales (*cf.* p.11) ou d'autres modalités sensorielles, couplées à des systèmes moteurs (ici m1, m2, etc.), par exemple un mouvement de la main. Comme ces informations ne sont pas spécifiques à un événement, elles peuvent conduire à plusieurs codes distaux (f1 et f2).

Selon Hommel et al. (2001), les codes réfèrent aux événements distaux et non pas aux effets proximaux. Cela leur permet de s'affranchir, selon eux, d'une contrainte forte de la théorie idéomotrice de James basée essentiellement sur les informations proximales du mouvement. Ainsi, la TEC faciliterait le codage de notions abstraites à l'inverse de la théorie idéomotrice princeps (*cf.* par exemple Badets & Pesenti, 2011 ; Badets & Rensonnet, 2015). Ce codage distal permet au contenu informationnel de l'événement de ne pas tenir compte des spécificités de l'une ou l'autre modalité sensorielle. C'est-à-dire que pour la TEC il existe une incommensurabilité entre les contenus des systèmes sensoriels et moteurs (Prinz, 1992).

En effet, pour justifier ce codage distal représentationnel, Hommel et al. (2001) se rapportent à la propriété de référence distale des événements et des actions décrites par Prinz (1992). Lors d'événements et lors d'actions sont mis en jeu respectivement des codes sensoriels sous forme de schémas de stimulation, et des codes moteurs sous forme de schémas d'excitation, c'est-à-dire de façon proximale. Par contre, ces événements et ces actions sont codés en relation avec l'environnement, c'est-à-dire d'une manière distale rendant possible dans ce cas précis de lier, de comparer, événements et actions. Cela paraît plutôt évident lorsque Prinz (1992) prend l'exemple de la vision car, dans ce cas, nous percevons des stimuli ou des événements et non nos propres organes (*i.e.* les yeux ou les muscles oculaires). Par contre, c'est de moindre évidence dans l'exemple qui suit : la vue d'un visage triste. En effet, en même temps que voir un visage triste comme un événement à distance, nous *sentons* corporellement cet état (*e.g.* Niedenthal et al., 2010). Par ailleurs, le sens du toucher, point crucial de la théorie idéomotrice, n'est pas abordé par Prinz (1992). Ainsi, dans cette perspective, la référence distale s'oppose à la négligence proximale qui caractérise des percepts et des actions destitués au fonctionnement des organes sensoriels. Cela peut s'expliquer par le fait que Prinz (1992) conserve dans son modèle deux niveaux cognitifs : un haut-niveau pour le contrôle des actions et un bas-niveau pour les interactions sensorimotrices, consentant ainsi à s'écarter d'une approche plus radicale confondant sensations et actions.

Il existe un autre point de divergence entre la TEC et la théorie idéomotrice princeps, celui de la question de l'intention. En effet, James (1890) décrivait l'action idéomotrice comme un fait sans intervention expresse de la volonté. Carpenter (1852) suggérait également que l'action idéomotrice était un comportement réflexe. Or, dans la TEC (Hommel et al., 2001), l'accent est davantage mis sur le côté volontaire et conscient du contrôle de l'action (*cf.* Shin et al., 2012).

À ce propos, Greenwald (1970) notait dans le cadre de l'expérimentation de son paradigme que les participants devaient être hautement motivés pour produire la réponse, et que l'instruction devait être explicitement formulée et dirigée sur la réponse. On retrouve cela dans l'étude d'Elsner et Hommel (2001) où il est demandé explicitement aux participants d'appuyer sur une touche. Dès lors, d'une part le but de l'action consiste à produire une réponse plutôt qu'à produire un effet et d'autre part, l'action est volontaire et consciente.

En outre, comme Greenwald le remarquait, la présentation de l'effet dans la phase test peut constituer un biais dans la mesure où cet effet peut fournir une « illusion » d'avoir déjà été réalisé. Comme le dit Kunde (2001), on ne presse pas l'interrupteur quand la lumière apparaît. Pour pallier aux limites du paradigme Réponse-Effet d'Hommel et al. (2001) au regard de la théorie idéomotrice initiale, Kunde (2001) propose un paradigme basé sur la compatibilité entre la réponse et l'effet (« *Response-Effect Compatibility* », REC).

Le paradigme REC oppose une situation dite de compatibilité entre un stimulus et une réponse, et une situation, dite d'incompatibilité, où, inversement, le stimulus et la réponse sont supposés ne pas survenir ensemble dans nos comportements. Pour ce faire, Kunde (2001, expérience 2, cf. figure 2, p.17) a proposé à des participants d'appuyer sur une touche suite à la présentation de deux stimuli visuels, un rectangle rouge (S1) ou vert (S2), apparaissant sur un écran. Dans un premier groupe, les participants devaient appuyer fortement (R1) et le plus rapidement possible suite à la présentation de S1 ; dans le deuxième groupe, les participants appuyaient faiblement (R2) et le plus rapidement possible suite à la présentation de S2. L'effet était un son, supposé compatible avec les réponses produites, soit un son fort (s1) pour R1 et un son faible (s2) pour R2. L'hypothèse de Kunde (2001), sur la base de la théorie idéomotrice, est que la sélection de la réponse sera davantage facilitée par l'effet produit dans la situation compatible que dans la situation incompatible.

Les résultats montrent effectivement que les réponses des participants sont plus rapides dans la situation compatible qu'incompatible. Plus précisément, les analyses temporelles ont montré que l'effet de compatibilité était d'autant plus grand pour les réponses les plus longues, c'est-à-dire pour les derniers quintiles. Cet effet dans les quintiles élevés serait la caractéristique d'une activation endogène, coûteuse en temps, des codes des effets (Kunde, 2001). Toutefois, cela n'explique pas la présence de cet effet dans les quintiles les plus bas. Kunde (2001) suggère que les réponses les plus rapides ne seraient pas toutes sélectionnées par les effets mais parfois préparées par avance, et donc uniquement en lien avec la réponse à produire. Par conséquent, si la REC a été une proposition pour redonner son statut à l'effet, contrairement à la TEC, elle souffre elle aussi d'être contingente à la consigne

de la tâche (*i.e.* l'intention donnée à la tâche) qui influence, voire biaise, le comportement et l'action à réaliser.

Quoiqu'il en soit, les résultats de Kunde (2001, expérience 2) ont fourni un intéressant complément aux études antérieures (Hommel, 1996 ; Elsner et Hommel, 2001 ; Kunde, 2001, expérience 1) car le lien qui unit la réponse et l'effet ne repose plus sur une dimension spatiale partagée ou non (espace droit, espace gauche), mais une dimension d'intensité (fort, faible). Par ailleurs, un point non signalé par Kunde (2001) et qui nous semble crucial dans le contexte de cette thèse est que les réponses motrices fournissent également des effets proximaux distincts des effets produits (s1 et s2) par l'appui exercé sur les touches. Cela constitue ainsi un événement sensoriel proprioceptif additif perçu au cours de l'action.

Kunde et al. (2004) ont d'ailleurs montré que les effets sensoriels influencent non seulement la sélection de la réponse mais aussi l'exécution de la réponse car la force exercée sur les touches dépend de l'intensité des effets produits. En effet, le pic de force est plus faible lorsque le son (*i.e.* l'effet) est fort que lorsque le son est faible, quel que soit la force d'appui (*i.e.* fort/faible). Il y aurait donc un ajustement – un moyennage – des retours sensoriels tactiles et auditifs dont l'explication s'appuie sur les résultats obtenus dans des tâches de synchronisation sensorielle (*cf.* Aschersleben & Prinz, 1997). Les résultats de Kunde et al. (2004) questionnent ainsi l'influence des effets proximaux sans toutefois y répondre directement car les effets tactiles (*i.e.* proximaux) sont associés à des effets auditifs (*i.e.* distaux).

1.4. Anticipation des effets reliés au corps²

L'étude des effets reliés au corps n'a présenté un intérêt que récemment (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016) malgré la relative importance attribuée à ces effets par James (1890). Ce faible intérêt interroge car, en dehors des travaux sur le contrôle de l'action, de nombreuses recherches ont montré à la même période des recoupements entre cognition et action et plus largement entre corps et cognition, introduisant la notion de cognition incarnée (*e.g.* Barsalou, 1999 ; Rizzolatti et al., 2001 ; Varela et al., 1991). C'est-à-dire d'une cognition directement issue des contingences sensorielles et motrices liées à nos interactions avec l'environnement (*e.g.* Thelen & Smith, 1995 ; O'Regan & Noë, 2001 ; Varela et al., 1991).

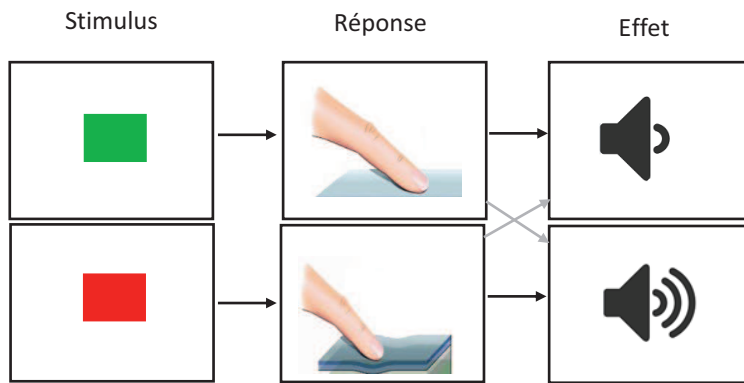
² A chaque fois que cela sera possible, nous parlerons d'effets reliés au corps plutôt qu'effets proximaux, et d'effets reliés à l'environnement plutôt qu'effets distaux, pour reprendre la terminologie utilisés par Pfister et al. (2014), Wirth et al. (2016) et Pfister (2019).

Ces propositions, sans forcément y référer, sont proches de celles de James (1890). Elles réinterrogent alors la question des effets liés aux corps dans l'anticipation de l'action.

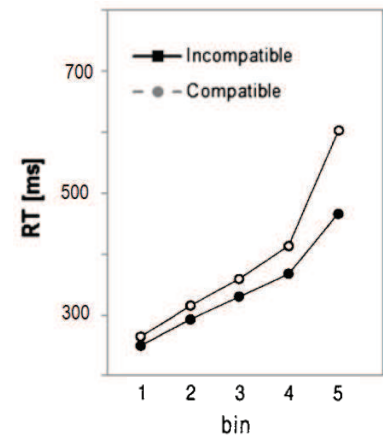
Cette question a donc été récemment explorée par Pfister et al. (2014). Ces auteurs ont adapté le paradigme de Kunde (2001) pour y introduire un effet tactile plutôt qu'auditif. En l'occurrence, l'effet tactile est une vibration délivrée au niveau de l'index du participant. L'expérience (expérience 1) débute par un stimulus visuel, des lettres, X (S1) ou H (S2), apparaissant sur un écran. Le participant doit appuyer, librement, sur une touche réponse placée à droite avec sa main droite (R1) ou sur une touche placée à gauche avec sa main gauche (R2). Les index du participant sont en permanence posés sur les touches. Suite à la réponse, une vibration survient soit du même côté que la réponse (condition compatible), soit du côté opposé à la réponse (condition incompatible). Concrètement, quand le participant appuie sur la touche de droite, dans la condition compatible, cette même touche va vibrer entraînant un effet tactile sur le doigt droit, alors que dans la condition incompatible, c'est la touche de gauche qui va vibrer entraînant un effet tactile sur le doigt gauche.

Les résultats sont globalement similaires à ceux de Kunde (2001). L'analyse par quintiles a montré un effet de compatibilité : les réponses des participants sont plus rapides dans la condition compatible que dans la condition incompatible. Toutefois, les effets de compatibilité sont moindres que pour l'étude de Kunde (2001) et apparaissent seulement au cinquième quintile (*i.e.* les temps les plus lents). Outre les raisons évoquées plus haut pour expliquer l'augmentation des effets pour les quintiles les plus élevés, Pfister et al. (2014) suggèrent que la méthodologie utilisée nuise au codage spatial. En effet, la tâche implique une contingence spatiale avec la vibration. Lors de l'appui sur la touche de droite par exemple, la condition compatible consiste précisément en un effet tactile + espace droit ce qui constitue une information distale. Et inversement pour la condition incompatible, on trouve un effet tactile + espace gauche. Ainsi, comme le soulignent d'ailleurs Pfister et al. (2014) cette tâche est loin d'être écologique dans la mesure où nous ne ressentons que rarement des sensations corporelles au niveau de la main droite après un mouvement de la main gauche dans la vie courante, et vice-versa. Par conséquent, les résultats obtenus pourraient être seulement imputables à cette incongruence et non au facteur manipulé (*i.e.*, une information proximale : la vibration).

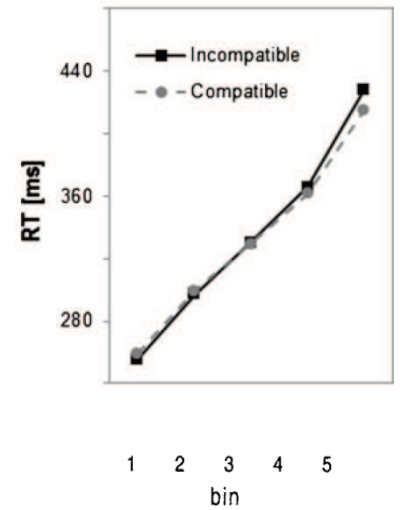
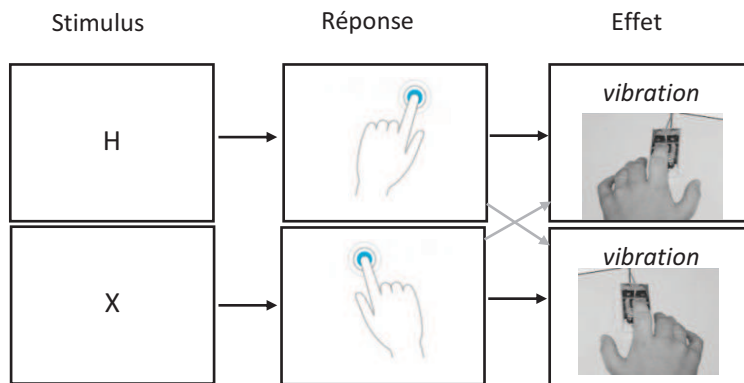
Kunde (2001, expérience 2)



RESULTATS



Pfister et al. (2014, expérience 1)



Wirth et al. (2016, expérience 1)

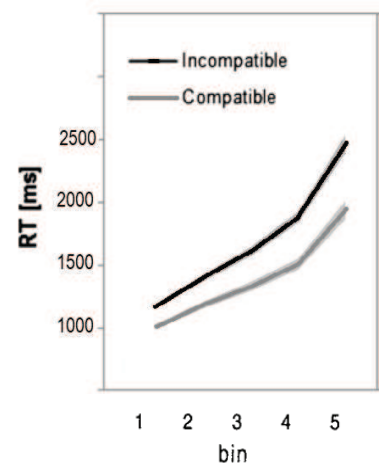
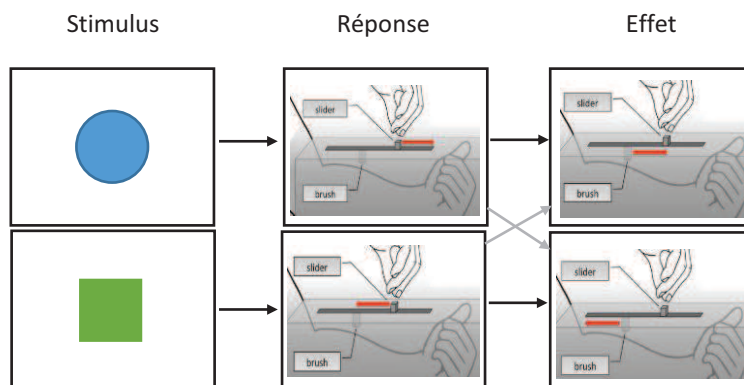


Figure 2 : résultats principaux des effets reliés à l'environnement (Kunde et al., 2001) et reliés au corps (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016) à partir du paradigme de compatibilité entre la réponse et l'effet. À partir des données temporelles analysées par quintiles (« bin »), ces travaux indiquent que dans la condition compatible (flèches noires) les participants répondent plus rapidement que dans une condition incompatible (flèches grises). Autrement dit, les participants anticipent plus rapidement les effets de l'action lorsque ceux-ci sont reliés à la réponse (voir le texte pour le détail des expériences).

Pour autant, le codage spatial est-il indispensable ?

Wirth et al. (2016) ont mis en place un autre dispositif dans le but d'obtenir des résultats moins enclins à des critiques sur la réalité de l'anticipation des effets tactiles. Les participants devaient déplacer un curseur avec leur main dominante. Ce curseur était placé sur une boîte rectangulaire recouvrant l'avant-bras opposé à la main dominante (*cf.* figure 2, p.17). Après l'apparition d'un stimulus visuel variant en forme (rond – S1 – ou carré – S2) et en couleur (vert ou bleu), les participants avaient pour consigne de déplacer le curseur vers la main (R1) ou le coude (R2), soit en avant ou en arrière de la position initiale. Le déplacement était donc déterminé par la forme du stimulus. Le déplacement du curseur actionnait une brosse aménagée à l'intérieur de la boîte. Cette brosse stimulait tactilement l'avant-bras. La stimulation tactile était soit effectuée dans le même sens que le mouvement (s1), correspondant à la condition compatible, soit de manière opposée, correspondant à la condition incompatible (s2). La couleur indiquait la condition selon laquelle allait se dérouler l'expérience. Cette procédure respecte le paradigme REC (Kunde, 2001). Néanmoins, ici, l'effet tactile survient *en même temps* que le mouvement – et de la même manière puisque la vitesse du mouvement de la brosse était identique au déplacement du curseur. 500 ms séparent la réponse de l'effet dans les études antérieures (Kunde, 2001 ; Kunde et al., 2004 ; Pfister et al., 2014).

Wirth et al. (2016) observent les mêmes résultats que Kunde (2001) et Pfister et al. (2014). L'effet de la compatibilité s'observe dès les premiers quintiles démontrant une plus grande évidence de l'anticipation des actions par des effets tactiles que les résultats, statistiquement faibles, obtenus par Pfister et al. (2014). Ce qui ressort de cette expérience, eu égard à la théorie idéomotrice princeps, c'est le « *en même temps* » qui nous paraît décisif pour l'étude de l'anticipation des effets tactiles. Observer ce qui se passe dans la vie courante suffit pour s'en persuader. C'est au moment où j'exerce l'appui sur l'interrupteur – la réponse – que je perçois les sensations corporelles associées à l'appui et que s'allume la lumière – les effets. Sur ce point, nous verrons que physiologiquement, les mécanorécepteurs de la peau sont particulièrement sensibles aux changements d'excitation (*i.e.* de pression) (*cf.* chapitre 2, p.20). Nous verrons également que les connaissances émergent à partir de nos sensations (*cf.* chapitre 3, p.35).

1.5. Synthèse

Les hypothèses de James (1890) et de ses prédécesseurs (Harleß, 1861 ; Herbart, 1825 ; Lotze, 1852 ; cités par Stock & Stock, 2004) sur l'action idéomotrice reposent sur l'idée que les effets sensoriels qui suivent l'action sont anticipés, par une idée qui précède l'action. En fait, il s'agit plutôt d'une idée qui précède non pas l'action mais les effets sensoriels. Il s'agit ici de ne pas dissocier dans le concept d'action ce qui serait de l'ordre d'un niveau conceptuel (*i.e.* une idée mentale) et d'un niveau de production (*i.e.* l'acte moteur), les deux constituant justement l'action idéomotrice.

Nous avons vu que les effets sensoriels étudiés étaient principalement auditifs et visuels ; James (1890) les définissait sous le terme de « *remote effects* », les dissociant des « *resident effects* » caractérisant les effets proprioceptifs liés au mouvement. Ceux-ci ont longtemps été négligés jusque récemment (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016). Toutefois, ces travaux concernent le toucher, non le mouvement. Par ailleurs, ils reposent exclusivement sur une contingence spatiale posant la question du rôle de l'attention (*cf.* Kunde, 2001, expérience 1).

Afin d'aller plus loin dans la compréhension de l'anticipation des sensations corporelles, un éclaircissement sur la manière dont nous percevons est nécessaire, partant de la physiologie à l'intégration des informations sensorielles.

CHAPITRE 2 – Les sensations corporelles

Le corps – ou plutôt l’enveloppe corporelle – a souvent été pris comme modèle pour expliquer les comportements et les phénomènes de notre vie psychique, affective et cognitive. En psychanalyse, Anzieu (1974) attribue à la peau un rôle de contenant, d’interface avec l’extérieur et de relations signifiantes, la peau est « *une surface d’inscription des traces* » (p.62) laissées par les relations avec l’environnement. Dans une autre approche de l’étude de la pensée, la théorie des marqueurs somatiques de Damasio (1995) s’inscrit dans une thèse similaire. Les sensations somatiques vont guider nos prises de décisions futures sur la base des sensations éprouvées antérieurement. Les marqueurs sont des traces laissées par le soma, c’est-à-dire tout « *ce qui appartient au corps* » comme le stipule Damasio (p.225, 1995) incluant donc l’ensemble des perceptions somatiques.

En premier lieu, quand nous pensons au « sens du corps » nous pensons à la peau. Elle revêt une place privilégiée tout simplement car sa surface recouvre l’ensemble de notre corps, ce qui se traduit également par une imposante représentation corticale (homonculus somesthésique). Toutefois, la peau n’est pas la seule source des sensations somatiques, ou corporelles. Il faut y ajouter les voies afférentes provenant de l’appareil locomoteur, au niveau ostéo-tendineux, participant au contrôle du mouvement. Cette physiologie somatique s’étend des récepteurs sensoriels jusqu’au cortex. Enfin, des sensations viscérales proviennent des organes internes, mais nous excluons de cette thèse la description physiologique, ainsi que l’étude, de ce type de sensations somatiques.

Stock et Stock (2004) mentionnent qu’Herbart admettait que l’esprit n’a aucune idée de cette physiologie corporelle. À l’inverse, nous pouvons aussi concevoir que chaque élément de la nature se développe selon des règles précises (Gottlieb, 1992 ; Waddington, 1957) et que, donc, l’ensemble des pièces physiques de notre corps à un rôle spécifique dans le maintien de notre autonomie ou de notre équilibre (Piaget, 1967 ; Varela et al., 1991). D’ailleurs, nos récepteurs cutanés sont représentés dans notre cortex et leurs liens sont organisés, flexibles, et dépendants de l’activité ou de contraintes corporelles (Bear et al., 2002).

Décrire la physiologie de ces récepteurs et des voies cortico-somatiques nous permettra de comprendre la manière dont leur activation conduit à nos sensations.

2.1. La peau et le toucher

2.1.1. Mécanorécepteurs de la peau

On distingue quatre récepteurs sensoriels de la peau³ (*cf.* figure 3, p.24), appelés mécanorécepteurs car ils sont sensibles aux stimulations mécaniques (comme les autres récepteurs présents aux niveaux des organes, des articulations, des dents, etc.) : les corpuscules de Pacini, les corpuscules de Meissner, les corpuscules de Ruffini et les récepteurs de Merkel. Chacun de ces récepteurs répondent différemment aux stimuli exercés sur la peau. Ces différentes réponses tiennent aux spécificités de leur membrane (Bears et al., 2002). Les corpuscules de Pacini et de Meissner répondent rapidement aux stimulations mais cessent leur activité en cas de prolongement de celles-ci. À l'inverse, les deux autres récepteurs ont une réponse plus lente mais en cas de stimulations maintenues leur activité persiste. Ainsi, lors de vibrations, ce sont principalement les récepteurs à réponse rapide qui réagiront. On peut également distinguer au sein des deux récepteurs à réponse rapide des activités différentes en fonction de la zone de la peau stimulée et des fréquences de vibration (Johansson & Valbo, 1984). Les corpuscules de Pacini sont sensibles aux fréquences élevées sur de petites zones cutanées à l'inverse des corpuscules de Meissner.

2.1.2. Le toucher

Le toucher avec le doigt, la face palmaire de la main, ou plus globalement celui de la peau glabre, stimule ces récepteurs qui diffusent l'information au niveau des fibres myélinisées⁴ appelés A β . Ces stimulations peuvent donc être engendrées par des explorations tactiles d'objets de textures différentes (Manfredi et al. 2014). Des travaux récents indiquent que le mode d'interaction avec des objets entraîne des intensités de vibration distinctes, et notamment que la force exercée sur l'objet augmente l'activation des mécanorécepteurs (Shao et al., 2016). Ces activations ne sont d'ailleurs pas focalisées uniquement sur le site de vibration puisqu'il diffuse spatialement autour de la stimulation. Ce phénomène s'étend jusqu'aux avant-bras. En effet, des vibrations ont été mesurées au niveau des tendons fléchisseurs du poignet lors d'une exploration tactile de textures (Delhaye et al., 2012).

³ On en compte 5 en ajoutant les bulbes de Krause, mécanorécepteurs situés au niveau des régions de la peau sèche ou des muqueuses (Bears et al., 2002).

⁴ La myéline est une membrane située sur la fibre nerveuse. Elle permet d'accélérer la vitesse de propagation des impulsions nerveuses.

À propos de la perception des textures, ajoutons pour introduire le prochain chapitre, qu'il a été montré que les afférences provenant des récepteurs cutanés devaient être associées à celle issues du mouvement (Yoshioka et al., 2007, 2011). Bien avant ces études, Gibson (1962) avait obtenu les mêmes résultats avec des expériences assez proches : toucher activement des formes géométriques ou les toucher par l'intermédiaire d'un tiers entraîne des performances significativement en faveur du toucher actif (respectivement de 95% et de 49% de bonnes réponses). Selon lui, le toucher actif permet « *de découvrir les composants extérosécifics dans le flux de la stimulation* » (1962, p.488). Autrement dit, au mécanisme physiologique, que nous résumons très brièvement, et à la perception, doit s'adjoindre *a minima* un troisième facteur qu'est l'action.

2.1.3. Le toucher sensuel

À partir des années 1990 certains travaux ont mis en évidence que certaines fibres (fibres C – ou C-Tactile) dont on pensait qu'elle relayait exclusivement les sensations nociceptives, étaient impliquées dans certaines formes de toucher (Vallbo et al., 1999). Ces fibres, également issus de mécanorécepteurs de bas seuil, diffèrent par le fait qu'elles sont totalement amyélinisées, et donc de conduction lente. Ces mécanorécepteurs, uniquement présents sur la peau velue, sur les avant-bras et le dos, jouent un rôle lors du toucher affectif ou toucher sensuel, lors d'une étreinte par exemple (Björnsdotter et al., 2010 ; Olausson et al., 2007). Leurs afférences empruntent les mêmes voies que celles de la thermorégulation (fibres A δ) ou des sensations viscérales (McGlone et al., 2007).

Cette découverte relativement récente a également été mise en évidence chez des patients atteints de troubles sensoriels (Cole et al., 2006 ; Olausson et al., 2002, 2010). Par exemple, Olausson et al. (2010) ont étudiés deux cas atteints de neuropathie sensorielle qui avaient déjà fait l'objet d'études antérieures (*cf.* Liljencrantz & Olausson, 2014). Leur maladie a affecté leurs fibres afférentes myélinisées si bien qu'ils ne ressentent aucune sensation tactile, hormis au-dessus du cou pour l'un et du nez pour l'autre. Comme attendu, les tests tactiles ont montré qu'aucune vibration n'était détectée puisque, comme nous l'avons vu, les vibrations stimulent les fibres A β myélinisées. Ces résultats sont identiques sur les zones de la peau glabre où les fibres CT sont absentes. Par contre, lorsqu'un pinceau est appliqué sur une large surface de l'avant-bras (10-15 cm) les deux patients détectent les stimulations comme le font des participants sans pathologie. Cette étude confirme l'existence de récepteurs

spécifiques (C-Tactiles) empruntant une voie différente de celle des mécanorécepteurs situés sur la peau de la face palmaire de la main.

2.2. Les tendons, les muscles et le mouvement

2.2.1. Propriocepteurs et mouvement

Le mouvement met en jeu trois mécanorécepteurs, appelés également propriocepteurs dans le sens où ils nous renseignent sur la position de notre corps dans l'espace. Ils sont situés au niveau des muscles, des tendons et des articulations (Tuthill & Azim, 2018, *cf.* figure 4, p.24). Au niveau du muscle, un fuseau neuromusculaire s'enroule autour de certaines fibres musculaires. Du fuseau neuromusculaire résulte deux types d'afférences qui ont pour rôle d'informer sur la longueur (fibres Ia et II) et la vitesse de changement du muscle (fibres Ia). Au niveau tendineux, l'organe tendineux de Golgi transmet des informations sur la tension du muscle (fibres Ib). Enfin, des propriocepteurs, principalement des corpuscules de Pacini et de Ruffini (*cf.* § 2.1. Mécanorécepteurs de la peau), sont aussi présents au niveau de l'articulation ; ils informent sur les positions extrêmes de l'articulation. L'ensemble de ces fibres prolongent sur des axones sensoriels (fibre A α), très myélinisés.

2.2.2. Le mouvement

Les mouvements entraînent également une activité de nombreux mécanorécepteurs situés sur la peau. Par exemple, un mouvement du genou active les fibres d'adaptation lente, permettant d'informer le système nerveux central de la position du membre (Edin, 2001). Inversement, stimuler des récepteurs cutanés par étirement de la peau ou vibrations au niveau du doigt, du coude ou du genou contribue à donner une illusion de mouvement (Collins et al., 2005). Toutefois, dans notre vie quotidienne, la perception de nos mouvements n'est pour ainsi dire pas consciente.

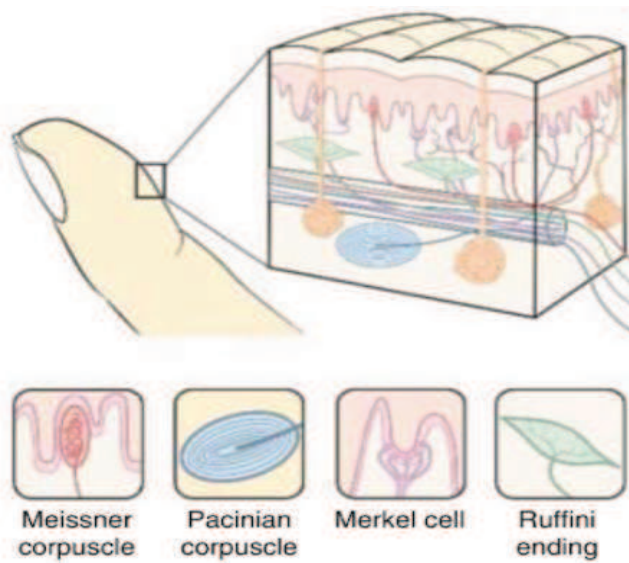


Figure 3 : Mécanorécepteurs de la peau (Tiré de Goodman & Bensaïa, 2018).

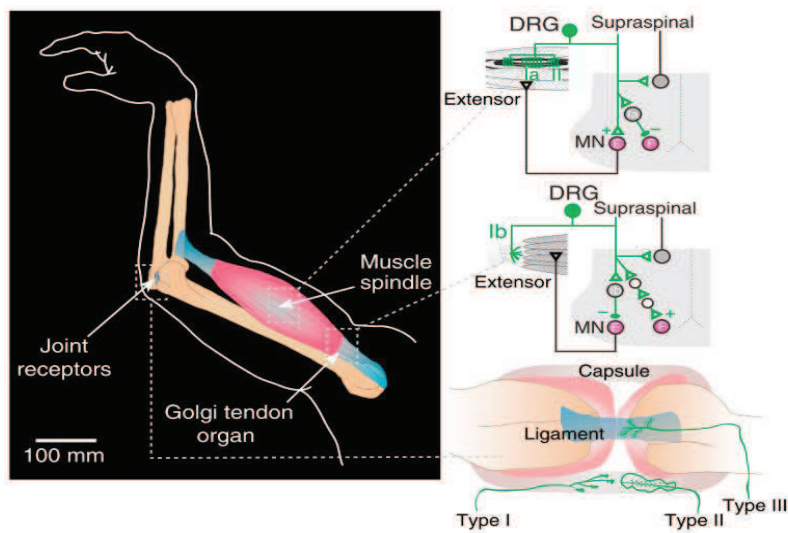


Figure 4 : Mécanorécepteurs mis en jeu lors du mouvement (Tiré de Tuthill & Azim, 2018).

Ce mystère proprioceptif (Proske & Gandevia, 2012) tient au fait que nous percevons davantage les afférences qui proviennent de l'environnement (*i.e.* exafférences) de celles issues de nos propres actions (*i.e.* réafférences). Il est assez difficile de se chatouiller par exemple (Blakemore et al., 2000). Une hypothèse pour expliquer ce fait⁵ est qu'une copie efférente est produite lors de la commande motrice (*cf.* Wolpert & Ghahramani, 2000). Cette copie prédit les conséquences sensorielles de la commande motrice. Un phénomène d'atténuation survient si l'écart entre la prédiction sensorielle et les sensations auto-générées est faible, ou nul. Cette copie étant effective lors de la commande motrice, ce modèle ne tient pas lors d'une exafférence (quelqu'un qui vous chatouille). Dans ce cas, on assiste, à l'inverse, à une augmentation des sensations. Cette hypothèse permet d'expliquer pourquoi l'intensité des perceptions diminue lors de la production de mouvement (Milne et al., 1988). Nous pourrions toutefois émettre une autre hypothèse basée sur les entrées proprioceptives produites par le mouvement lui-même en s'appuyant sur les travaux de Yoshioka et al. (2008) précédemment cités. En effet, un mouvement généré par autrui (« pseudo-actif »), rend compte des mêmes perceptions de la texture qu'un mouvement auto-généré. Ces mouvements entraînant des sensations proprioceptives, totalement indépendantes des prédictions sensorielles, doivent sans doute être prises en compte dans les phénomènes d'atténuation/accentuation des perceptions sensorielles.

2.3. Intégration des sensations corporelles

2.3.1. Voies lemniscales

Les afférences provenant de la peau et des articulations (fibres A α et A β) forment une voie neuronale appelée voie des colonnes dorsales et du lemnisque médian (Bears et al., 2002). À chaque niveau intervertébral, les fibres émanant des récepteurs cutanés (*i.e.* la sensibilité tactile de la main s'organise au niveau des vertèbres cervicales, celle du pied au niveau lombaire et sacrée) se regroupent sous la forme d'axones de gros diamètre qui pénètrent dans la corne dorsale de la moelle épinière. Ces axones sont fortement myélinisés de façon à transmettre rapidement l'information sensorielle. Cette vitesse repose également sur le fait qu'il n'y a aucune synapse de la corne dorsale de la moelle épinière jusqu'au bulbe

⁵ Ici le chatouillement concerne le sens tactile, il est gardé à titre d'exemple illustratif. Le principe décrit s'applique également à la proprioception. Wolpert et Ghahramani (2000) utilisent l'exemple de l'ajustement proprioceptif du contrôle moteur lors de la prise d'une brique de lait que l'on prédit pleine (*i.e.* lourde) mais qui est vide (*i.e.* légère) générant un écart entre prédiction et perception sensorielles.

rachidien qui correspond à la partie la plus haute de la moelle épinière. Au niveau du bulbe, les fibres qui se trouvent toujours du côté ipsilatéral aux récepteurs cutanés se dirigent dans la partie ventrale de la moelle épinière puis croisent pour atteindre le thalamus. Le thalamus est essentiel car il joue un rôle dans toutes les informations sensorielles corporelles (Bears et al., 2002). Puis, les neurones du thalamus, précisément ceux du noyau ventral postérolatéral, vont projeter sur le cortex somatosensoriel en fonction d'un territoire défini représentant l'homonculus.

Comme nous l'avons souligné précédemment, les fibres CT n'empruntent pas cette voie, mais celle commune à la douleur, à la thermorégulation et aux sensations viscérales. Cette voie, appelée spinothalamique, voit ces fibres croiser immédiatement au niveau de la moelle épinière pour se rendre directement au niveau du thalamus rejoindre le cortex somatosensoriel.

2.3.2. L'intéroception

Toutes les sensations que nous avons décrites ne sont pas dissociées au cours de nos actions. Les récepteurs sont plus ou moins stimulés, conduisant à une certaine perception consciente des sensations corporelles. Par exemple, au cours d'une prise d'un objet nous stimulons principalement les fibres A α par les mouvements effectués pour prendre l'objet, les fibres A β par les pressions exercées sur l'objet, mais les fibres A δ sont également activées dans une moindre mesure pour indiquer la température de l'objet (*e.g.* objet avec une surface métallique) ou tout simplement pour renseigner sur la température de l'air ambiant. Voir, au cours de cette prise d'objet, il est tout à fait possible de mesurer l'activité conjointe des types de corpuscules (*cf.* Johansson & Flanagan, 2009). On peut donc supposer que la perception de ces diverses sensations s'articule autour d'un même phénomène : l'intéroception.

L'intéroception est définie comme la perception subjective des changements des états corporels (Ceunen et al., 2016). Ce terme semble donc à même de généraliser l'ensemble des sensations que nous avons décrites. Il convient néanmoins de préciser les contours de l'intéroception en s'appuyant notamment sur les aspects physiologiques et psychologiques communs tout autant que de l'unicité des perceptions corporelles.

Historiquement, le terme intéroception avancé par Sherrington (1906) désignait l'ensemble des sensations liées à la surface interne du corps, par opposition à l'extéroception qui désignait la surface externe en relation directe avec l'environnement (Ceunen et al., 2016). À cela s'ajoutent d'autres termes comme la proprioception correspondant aux sensations liées

à la position des membres (Craig, 2002). Selon cette définition les sensations relatives au toucher sont considérées comme extéroceptives, tout comme celles liées à la douleur. Par contre, l'intéroception définit précisément les sensations viscérales. Jusqu'à nos jours, de nombreux autres termes sont venus décrire ses sensations (*cf.* Ceunen et al., 2016) sans permettre de clarifications. La solution, selon Ceunen et al. (2016) consiste à considérer le terme intéroception comme un concept global sans exclure les particularités définies par les autres termes. Par exemple, le terme proprioceptif, définit par la perception liée au mouvement (Craig, 2002 ; Gapenne, 2014 ; Proske & Gandevia, 2012), à tout lieu d'être, même s'il est lié à l'intéroception.

Par l'analyse physiologique des voies des colonnes dorsales et du lemnisque médian et des voies spino-thalamiques (*cf.* § Des récepteurs au cortex), outre la convergence vers le thalamus, Craig (2002, 2003, 2009) a mis en évidence l'implication du cortex insulaire dans les sensations corporelles, le qualifiant de cortex intéroceptif. Par ses relations avec l'hypothalamus (*i.e.* système nerveux autonome), l'amygdale (*i.e.* émotions), le thalamus ainsi que d'autres structures (*cf.* Craig, 2009), l'insula joue un rôle d'intégration multisensorielle aboutissant à une perception corporelle globale (Ceunen et al., 2016). Enfin, il a été montré que la perception consciente correspondait précisément à une activation du cortex antérieur de l'insula.

Pour résumer, en s'appuyant sur cette approche et sur ces bases neuro-physiologiques, il semblerait que l'intéroception est un concept qui englobe la perception consciente de l'état corporel dont l'origine physiologique peut être viscérale, comme le stipulait Sherrington (1906), du toucher-sensuel, *via* les afférences C-tactiles car elles sont impliquées dans l'état corporel de bien-être (McGlone et al., 2007 ; Craig, 2002, 2003, 2009 ; Herbert & Pollatos, 2014 ; Ceunen et al., 2016 ; Björnsdotter et al., 2009, 2010).

Malgré cette approche inclusive, le toucher (par les fibres A β) et la proprioception (par les fibres A α) restent absents de l'équation intéroceptive. Concernant le toucher, ce positionnement est assez surprenant dans la mesure où il a été montré que des stimulations émotionnellement neutres pratiquées sur la paume de la main activaient des structures cérébrales dévolues aux émotions (Francis et al., 1999). Comme le stipulaient McGlone et al. (2007), des investigations supplémentaires sont nécessaires ; depuis, il n'y a, à notre connaissance, aucun travail infirmant ou confirmant que le toucher a un fonctionnement similaire aux autres sensations corporelles. C'est la même interrogation concernant la proprioception, terme bien définit dans une conception exclusive (*cf.* Gapenne, 2014). Ceci dit, selon une approche intégrée et incarnée de la cognition (*e.g.* Varela et al., 1991, *cf.* § 3.

L'expérience de nos sensations corporelles) il est difficile de concevoir que réaliser un mouvement n'implique pas les émotions (Brouillet et al., 2015 ; Cannon et al., 2010 ; Milhau et al., 2015). Pris ensemble, par les interactions entre toucher/proprioception et émotions ainsi que par leur intégration dans l'ensemble des composantes cognitives, il est difficile de ne pas considérer le toucher et la proprioception comme relevant de l'intéroception.

Outre cette unité somatique, nous allons voir que les sensations corporelles que nous venons de décrire se lient avec d'autres systèmes sensoriels et moteurs, ce lien est aussi appelé couplage sensori-moteur.

2.4. Couplages perception - action

2.4.1. Couplage sensori-moteur

Nos comportements dans notre vie quotidienne sont ponctués, quasiment en permanence, de prises d'objets quotidiens. Régulièrement, ces actions sont réalisées d'une certaine façon et dans un espace donné.

Par exemple, nous attrapons bien souvent, une casserole avec la main droite lorsqu'elle se trouve sur la droite (et inversement avec la main gauche si elle se trouve dans l'espace gauche). De plus, nous tenons, généralement, cette casserole par l'anse. À partir de la notion d'affordance (Gibson, 1979), Tucker et Ellis (1998) ont montré que l'action (*i.e.* prendre la casserole) et la perception (*i.e.* voir la casserole) étaient couplées puisque la simple perception de l'objet modifiait des réponses motrices. En effet, les participants appuyaient plus rapidement avec la main droite sur une touche située à droite lorsqu'ils percevaient un objet dont l'anse était tournée sur la droite que si l'anse était tournée vers la gauche. Des résultats similaires ont été retrouvés à partir d'informations perceptives et verbales (Glenberg & Kaschak, 2002 ; Zwaan et al., 2002).

Ces travaux indiquent que percevoir un objet, ou entendre prononcer le mot d'un objet, déclenche automatiquement des mécanismes moteurs liés à l'action elle-même. Autrement dit entendre le mot « balle » simule⁶ les expériences motrices et perceptives produites avec une balle. Ceci est vrai à partir du moment où l'action a été expérimentée au

⁶ Nous utilisons ici le terme « simulation » au sens donné par Gallese (2011), c'est à dire un processus fonctionnel permettant de percevoir les *sensations* sensorielles – Gallese (2011) parle de représentation – d'une action future. Cette définition s'applique à certains postulats dans le contrôle moteur (*e.g.* la Théorie de la Simulation Motrice, Jeannerod, 2001) ou à la cognition sociale (*e.g.* la Théorie de la Simulation de l'Esprit, Gallese & Goldman, 1998).

préalable. Par exemple, si la simulation du geste d'utilisation d'une raquette de tennis par des joueurs professionnels active le cortex cérébral comme s'ils effectuaient le geste, cette concordance n'est pas retrouvée si ces tennismen simulent un geste d'un autre sport (Fourkas et al., 2008).

Toutefois, si *voir* un objet simule les expériences motrices, nous pouvons supposer que *voir* un objet simule les expériences somatiques tout autant que *toucher* un objet devrait également simuler ces actions car ce couplage est justement lié aux expériences avec ces objets.

2.4.2. Développement et couplage somato-moteur

Nous avons vu dans la première partie que les premières formulations d'une idée motrice précédant l'action sont basées sur une approche développementale. Pour rappel, par exemple Herbart (1845, cité par Stock & Stock, 2004), décrivait un processus qui commençant à la naissance, se construisait à partir de mouvements automatiques générant des effets dans l'environnement. L'enfant cherchait par la suite à reproduire des effets à partir de mouvements coordonnés. Ces hypothèses sont toujours d'actualité, mais il a été montré que le processus commençait dès le développement intra-utérin.

En effet, des travaux récents effectués par ultrasonographie ont permis d'observer ce comportement chez des fœtus de 14 semaines et 21 semaines. À un moment si précoce du développement où nous pourrions nous attendre à des mouvements incoordonnés ou réflexes, ils semblent dépendre de buts précis. En effet, à 21 semaines les mouvements de la main du fœtus s'orientent pour moitié vers la bouche. Celle-ci, si elle fermée au moment du mouvement, est ouverte lorsque la main est au contact de la bouche (Myowa-Yamakoshi & Takeshita, 2006). Suivant ces résultats, il a été montré récemment que les mouvements de réaction d'ouverture de la bouche au contact de la main diminuaient au cours du développement (entre 24 et 36 semaines). Mais à l'inverse, l'*anticipation* du toucher augmentait puisque la bouche s'ouvrait avant même le toucher (Reissland et al. 2014). Au cours de cette même période, la vitesse des mouvements dépend de la cible d'atteinte (Zoia et al., 2006). Pris ensemble, ces travaux montrent que la motricité du fœtus s'organiserait en prenant en compte des sensations qui ne peuvent être en l'occurrence que des sensations somatiques. Celles-ci seraient d'ailleurs indispensables pour le développement et l'intégration des autres sens comme la vision ou l'audition (Cascio, 2010).

Les conséquences sur le développement cérébral sont difficiles à mesurer pour des raisons éthiques évidentes. Toutefois, un récent modèle computationnel a montré que les retours sensoriels somatiques, permis par les organes du toucher (corpuscules de Meissner) et proprioceptifs (fibres tendineuses et neuromusculaires), fournissent des régularités spécifiques facilitant l'apprentissage cortical (Yamada et al., 2016). Autrement dit, le couplage qui s'opèrerait entre le corps, l'environnement et le développement cérébral reposerait selon ce modèle sur des régularités fournies par les sensations perçues au cours des mouvements.

Par ailleurs, Held et Hein (1963) ont mis en place un dispositif permettant de mesurer l'effet d'une action sur la perception. L'expérience portait sur des chatons nouveau-nés. Pendant leurs premières semaines de vie, ils étaient soumis soit à un confinement en dehors de toute lumière, soit à la tâche expérimentale. Celle-ci consistait pour la moitié d'entre eux à marcher et voir leur environnement, alors que les autres chatons, placés dans des paniers, ne pouvaient avoir accès que visuellement à leur environnement. Leur déplacement spatial était identique puisque dans les deux cas les chatons marchaient – ou étaient déplacés dans une panier – par le biais du dispositif expérimental semblable à un carrousel. Il n'était donc pas possible pour ce deuxième groupe d'effectuer des mouvements. Les résultats ont montré que les chatons du deuxième groupe se comportent comme s'ils étaient aveugles, autant pour percevoir des objets ou l'inclinaison d'un plan que pour réagir à des mesures purement physiologiques comme le réflexe pupillaire. Les expériences sensori-motrices réalisées par le premier groupe de chatons au cours de leurs déplacements leur ont fourni des connaissances perceptives. Illustrant notre propos, le seul changement entre les deux groupes de chatons est les afférences tactiles et proprioceptives survenant lors du mouvement des pattes lorsque le carrousel tourne. Ce serait donc grâce au couplage somato-moteur qu'émergent des connaissances.

C'est sans nul doute par le jeu de ce couplage somato-moteur que l'on peut également expliquer certaines erreurs ou réussites dans certaines tâches expérimentales chez l'enfant, comme par exemple, la tâche A-B (Piaget, 1937) où l'enfant doit trouver un objet caché dans deux cachettes (A et B). Au cours de cette tâche, dans une première phase, généralement répétée 10 fois, l'expérimentateur cache un objet sous la cache A, à la vue de l'enfant. Puis, au cours d'une seconde phase, l'objet est placé sous la cache B en montrant ce changement à l'enfant. À 10 mois, l'enfant ne vient pas chercher l'objet sous A, mais sous B, c'est l'erreur A non B. Mais cette erreur ne survient pas si on modifie les sensations corporelles de l'enfant entre la première et deuxième phase, comme de passer l'enfant de la position assise à debout (Smith et al., 1999) ou en lui lestant les bras (*cf.* Smith, 2005a).

Ce processus est développemental et, par définition, applicable à tous les âges de la vie (Loeffler et al., 2016). Le corps se modifie, les perceptions changent, entraînant des relations au monde distinctes.

2.4.3. La simulation somato-sensorielle

Que le couplage somato-moteur soit responsable de l'acquisition des connaissances dans l'expérience de Held et Hein (1963) ou dans la tâche A-B (Piaget, 1937) est une hypothèse. À notre connaissance, il n'existe pas de travaux montrant ce type de couplage où une perception tactile ou proprioceptive simule ou déclenche des actions comme nous l'avons présenté auparavant avec la modalité visuelle (Tucker & Ellis, 1998 ; Glenberg & Kaschak, 2002 ; Zwaan et al., 2002). Cependant, quelques études se sont intéressées aux couplages somato-sensoriels.

Anema et al. (2012) ont utilisé une tâche d'imagerie afin de mesurer l'influence d'une sensation tactile imaginée sur la perception tactile. Ce type de tâche est habituellement utilisé dans le cadre de l'imagerie mentale ou l'imagerie motrice pour simuler mentalement des concepts ou des objets (*i.e.* imagerie mentale) ou des mouvements (*i.e.* imagerie motrice). En ce qui concerne l'imagerie motrice, il a été montré qu'imaginer un mouvement met en jeu les mêmes activations corticales que le mouvement lui-même (Jeannerod, 2001, voir également Bidet-Ildei, 2011). De tels chevauchements existent également lors de l'imagerie tactile qui active le cortex somato-sensoriel (Yoo et al., 2003). Dans leur expérience, Anema et al. (2012) proposent une tâche d'imagerie tactile et une tâche d'imagerie auditive. Lors de l'imagerie tactile, les participants devaient imaginer les sensations sur la peau et sur les doigts à partir d'une image présentée à l'écran (*i.e.* du gravier ou des billes). À partir des mêmes images, les participants étaient amenés à imaginer les sons que produisaient les objets, par exemple les billes. Puis, après chaque tâche d'imagerie associée à une image, les participants devaient discriminer si un son ou une sensation tactile étaient délivrée au niveau du côté gauche ou droit. Les résultats ont montré que les participants étaient plus rapides pour discriminer la sensation tactile après une tâche d'imagerie tactile. Celle-ci amorçait une sensation future. Ainsi, cette étude semble montrer que « penser une sensation » anticipe la sensation elle-même.

Récemment, cet effet d'amorçage tactile a été retrouvé lors de la perception d'objets (Ekstrand et al. 2017). Le postulat initial de cette étude est que les objets sont associés tactilement au membre avec lequel ils sont habituellement expérimentés. Un ballon de

football est associé à des sensations tactiles du pied, alors que la balle de tennis est associée à la main. Pour éprouver l'hypothèse que ces objets activaient le système somato-sensoriel, Ekstrand et al. (2017) ont présenté à des participants des images d'objets (ballon de football vs. balle de tennis). Juste après la présentation de ces images, une vibration était déclenchée au niveau de la main ou du pied. Les participants devaient indiquer le plus rapidement possible où était délivrée cette vibration. Les résultats ont montré que la détection de la vibration au niveau de la main était plus rapide lors de la présentation d'images associées à la main qu'associées au pied. Lors d'images associées à la main, la détection était également plus rapide lorsqu'elle était délivrée au niveau de la main qu'au niveau du pied. Ceci valide donc l'hypothèse de départ : la vue d'un objet facilite la perception tactile.

Ces résultats vont dans le sens d'un processus de simulation qui ne se limiterait pas aux aspects moteurs mais embrasserait toutes les modalités sensorielles (Barsalou, 2008). Ainsi, allant dans ce sens, il est assez logique que nous ressentions une sensation perçue chez autrui puisque voir une action effectuée par autrui active les mêmes zones cérébrales que de la réaliser physiquement (Rizzolatti et al., 2001). Cette analogie, appelée référence sensorielle, consiste en l'activation du système somato-sensoriel lors de l'observation du toucher chez un autre individu (*cf.* Case et al., 2015). L'illusion de la main en caoutchouc est une expérience illustrant également cette simulation (Botvinick & Cohen, 1998). Lorsque les expérimentateurs touchent simultanément la main en caoutchouc et leur main, les participants ont parfois l'illusion que la main en caoutchouc est leur propre main. Outre l'illusion tactile, cette procédure semble également perturber la proprioception.

Ces études portant sur la modalité tactile ou proprioceptive sont rares comparativement à celles portant sur les autres modalités. Pris ensemble, elles soulignent que les sensations tactiles et proprioceptives sont couplées entre elles, et mettent en jeu les mêmes processus (*e.g.* simulation) que lors de couplages sensori-moteurs.

2.4.4. Couplages et contraintes corporelles

Imaginons à présent que ces couplages somato-moteurs s'opèrent lors des actions. C'est-à-dire qu'une relation bidirectionnelle existe entre le toucher et la proprioception et les actions, par exemple, qu'une sensation tactile sur mon bras soit couplée à des mouvements particuliers. Dans ce contexte, nous devrions pouvoir établir une correspondance entre un corps physique et des comportements (perception et/ou action), comme nous l'avons évoqué à propos du développement (*cf.* p.29).

C'est ce que semble montrer quelques expériences portant principalement sur des participants avec des contraintes corporelles provoquées par l'expérimentation ou consécutives de pathologies.

Ainsi, Morisson et al. (2011) ont montré qu'il existait une relation entre la présence de récepteurs sensoriels et la capacité à ressentir le toucher agréable sur soi et sur autrui. Plus précisément, cette étude était conduite auprès de personnes atteintes d'une neuropathie héréditaire ayant pour conséquence une réduction de la densité des fibres C-tactiles (*cf.* 1.1.3. Le toucher sensuel). Parmi d'autres, deux tâches successives nous intéressent particulièrement. La première consistait à juger du caractère agréable de stimulations tactiles reçues. Puis, la deuxième consistait à juger du caractère agréable de stimulations tactiles vues sur une vidéo. Les stimulations reçues et vues présentaient les mêmes particularités en termes de vitesse. Les résultats ont montré que les personnes jugent moins agréables les stimulations tactiles reçues et vues qu'un groupe contrôle. Toutefois, les stimulations tactiles ressenties et vues sont jugées équivalentes par les deux groupes. En un mot, les expériences tactiles reçues ont probablement influencé celles vues par la suite. Comme le disent Morisson et al. (2011), c'est la première expérience tactile qui fait référence. Autrement dit cette expérience met en lumière que nos perceptions corporelles reposent sur certains de nos caractères physiologiques. Notons par contre que chez ces personnes, leur propension à l'empathie est identique à celle du groupe contrôle, indiquant la mise en jeu d'autres processus.

Dans un tout autre domaine, mais selon cette même logique d'une relation entre le corps et les couplages perception-action, Kühn et al. (2014) ont mis en évidence une modification des affordances lors d'une immobilisation d'un membre. Cette tâche était basée sur celle de Tucker et Ellis (1998, *cf.* p.28). Pour rappel, ceux-ci ont montré que l'orientation d'un caractère préhensible d'un objet (*i.e.* la poignée d'une casserole) active automatiquement la main correspondante à cette orientation. Lors d'une immobilisation de la main droite, l'affordance, qui est une relation entre un individu et un environnement, est impossible entre la poignée de l'objet tournée vers la droite et la main. Ceci se traduit lors de l'analyse de l'activité cérébrale des participants puisque le cortex prémoteur droit était plus fortement activé lorsque la poignée d'un objet était orientée vers la main gauche alors que la main droite était immobilisée par rapport à une situation où la main n'était pas immobilisée (Kühn et al., 2014). L'immobilisation d'un membre, chez des sujets hémiplésiques ou suite à une immobilisation de quelques minutes, a également des effets sur le jugement hédonique d'objets (Casasanto & Chrysikou, 2011).

Ces effets sont observés immédiatement après l'immobilisation, ce qui semble montrer que nos relations avec l'environnement, ici par le biais de l'affordance, ne dépendent pas uniquement de nos expériences visuelles ou même de notre « stock » d'actions, mais plutôt sur nos possibilités d'actions corporelles. Celles-ci pourraient émerger des sensations tactiles et proprioceptives que nous percevons.

2.5. Synthèse

Notre peau recouvre l'ensemble de notre corps et nos membres sont en permanence en mouvement. La peau et les articulations possèdent un système sensoriel complexe nécessaire pour interagir avec l'environnement. Le recoupement avec l'intéroception n'est pas établi, et peu discuté. Mais nous pouvons supposer que le toucher et la proprioception ont des liens neurophysiologiques étroits avec les autres systèmes somatiques, tel le système somatique viscéral. C'est tout du moins cette idée que nous avons défendue dans ce chapitre. Ce n'est pas qu'une question théorique puisque cette hypothèse sous-entend que le toucher et la proprioception seraient intégrés en permanence lors de nos interactions avec l'environnement.

Ce système somatique s'organise également avec les autres systèmes sensoriels par des couplages sensori-moteurs. Ces couplages ont pour conséquence une proximité consubstantielle entre les percepts qui se traduit par des simulations sensorielles et motrices.

Cependant, ce vaste réseau sensori-moteur, la simulation et l'intégration ne disent pas comment cette intégration est phénoménologiquement perçue lors d'une action. C'est ce que nous allons développer dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 3 – L’expérience des sensations corporelles

Avec Hommel et al. (2001, p.10), nous avons décrit un cadre théorique du contrôle de l’action. Ce cadre s’inscrit dans le champ de la cognition incarnée. C’est-à-dire qu’il prend en compte les perceptions et les actions du corps pour définir la cognition et expliquer les comportements. Ceci est une définition extrêmement large du champ de la cognition incarnée. Par exemple, chez Hommel et al. (2001), perception et action sont codées sous une représentation commune. Cette proposition suppose donc que l’esprit se représente le monde et, par voie de conséquence, dissocie ce qui provient de la cognition (interne) et de l’environnement (externe). Par ailleurs, la théorie dissocie les effets (distal vs. proximal) alors que, comme le rappelle Pfister (2019) aucune action ne peut se concevoir sans les deux types d’effets.

Pour intégrer intrinsèquement les sensations corporelles que nous avons décrites dans le chapitre 2 (p.17) en suivant l’approche idéomotrice de James (*cf.* § 1 La théorie idéomotrice) au sein d’une théorie de la volition, nous pouvons opter pour une autre approche de la cognition incarnée : l’énaction (Varela et al., 1991).

3.1. L’énaction

La théorie de l’énaction (Varela et al., 1991, néologisme associant action et *to enact* : faire advenir) place le corps, et plus largement la structure de l’organisme, comme le pilier des couplages sensori-moteurs nécessaire à son autonomie et ses interactions avec son environnement.

Plus précisément, l’énaction repose sur cinq idées clés (Thompson, 2005). La première idée est que chaque organisme vivant possède une autonomie générant et maintenant son identité propre. Maturana et Varela (1980) introduisent le néologisme d’*autopoïèse* pour caractériser cette autonomie qui est une particularité du monde vivant. L’*autopoïèse* est la base de l’organisation de tout organisme vivant, du plus simple comme la bactérie aux plus complexes. Ainsi, l’identité d’un organisme vivant se caractérise par un système auto-organisé unique qui se produit (« *poièsis* ») et se maintient de lui-même (« *auto* »). La deuxième idée est que le système nerveux est un système autonome qui crée du sens, et non des informations comme le suggèrent les modèles computo-symboliques. Notre système

nerveux est clos dans la mesure où il repose sur des interconnexions neuronales limitées mais aussi ouvert puisque son activité repose sur une auto-organisation propre constituant de larges réseaux ou groupes neuronaux (Edelman, 1992 ; Varela et al., 2001). Selon le principe de l'énaction, l'organisation du système neuronal est incarnée et dépend donc de la structure de l'organisme, c'est-à-dire du corps. Ainsi, par le jeu de couplages sensori-moteurs l'organisation des réseaux structurels se modifie (*i.e.* Byrge et al., 2014). La troisième idée, sans doute la plus représentative de la théorie, est que la cognition est une *action incarnée*. Par action, Varela et al. (1991) soulignent le caractère indissociable des processus sensori-moteurs. La perception et l'action sont inséparables et co-évoluent au cours du développement (*cf.* également Piaget, 1937). Par *incarné*, Varela et al. (1991) invoquent toutes les expériences provenant des capacités sensorimotrices du sujet, expériences acquises dans un contexte biologique, culturel ou psychologique. De l'action incarnée découle la quatrième idée, également centrale, qui consiste à mettre au premier plan la manière avec laquelle le sujet modifie son action à partir de ses expériences sensori-motrices. Pour Varela et al. (1991) il n'existe ni monde, ni perception pré-donnés, c'est de l'activité de perception que prend forme ce monde perceptif. Varela et al. stipulent ainsi que « *the enactive approach consists of two points: (1) perception consists in perceptually guided action and (2) cognitive structures emerge from the recurrent sensorimotor patterns that enable action to be perceptually guided* » (1991, p.173). L'expérience de Held et Hein (1963, *cf.* p.30) est l'exemple caractéristique de l'action perceptivement guidée : les chats perçoivent visuellement lorsque cette perception est guidée par leur action. Puis, dernière idée, toujours en suivant Thompson (2005), est que cette expérience phénoménologique mise en avant dans l'énaction nécessite une approche phénoménologique couplée aux sciences cognitives afin de comprendre ce que nous entendons par « Cognition ».

Varela et al. (1991) illustrent l'énaction à partir de la perception visuelle, prenant comme exemple la perception de la couleur. À première vue le système visuel peut paraître simple et circonscrit. La couleur verte sera perçue par des différences entre l'excitation et l'inhibition de cônes rétiniens d'ondes longues et moyennes alors que l'excitation d'autres cônes sera neutre. Toutefois, le spectre lumineux d'une scène dont le contenu est vert, sera toujours perçu de la même manière même si ce contenu sera intégré dans une scène plus complexe alors que celle-ci réfléchit davantage des ondes courtes. Pour comprendre comment nous percevons les couleurs il est donc nécessaire d'aborder la perception sous un angle plus large qu'une correspondance entre un organe et l'environnement. Ceci comprend également l'activité cérébrale car percevoir la couleur implique un large réseau neuronal non circonscrit

au cortex occipital. Ainsi, la perception de la couleur concourt à d'autres modalités sensorielles, autant qu'elle dépend de celles-ci. Par ailleurs, la perception de la couleur repose sur les capacités perceptives, la culture ou le langage du percevant. Les objets n'ont pas une couleur ou une texture prédonnées, elles dépendent du percevant et de son activité : « *We see must be located not in a pregiven world but rather in the perceived world brought forth from our structural coupling* » (Varela et al., 1991, p.165).

Dans « *l'inscription corporelle de l'esprit* », Varela et al. (1991) apportent des arguments qui étayent l'idée que la perception est guidée par l'action, mettant l'accent sur le corps par l'action incarnée. Ils n'ont toutefois pas discuté du rôle de ces actions dans la perception du corps lui-même⁷. En fait, ces auteurs font largement référence à l'œuvre de Merleau-Ponty (1976) qui a insisté sur ce point. Une réflexion développée par Merleau-Ponty (1976) est de savoir comment distinguer à la fois le toucher et le produit de ce toucher. Il prend l'exemple des mains qui se joignent et se serrent mutuellement. En l'occurrence, nous ne pouvons distinguer en même temps la sensation d'être touché(e) et de toucher, ces sensations sont, pour Merleau-Ponty (1976), perçues en alternance. Seule la main qui touche, connaît. Comme nous l'avons mentionné auparavant, seul le toucher actif permettrait de percevoir les différentes textures (*cf.* Gibson, 1962 ; Yoshioka et al., 2007, p.22) ; c'est exactement ce qu'avance Merleau-Ponty : « *Il y a des phénomènes tactiles, de prétendues qualités tactiles, comme le rude et le lisse, qui disparaissent absolument si l'on en soustrait le mouvement explorateur* » (1976, p.364). Toutefois, le corps possède une double fonction. Si la main qui touche a une fonction de sujet, celle qui est touchée a une fonction d'objet, il existe néanmoins une certaine synergie dans la mesure où lorsque ma main touche, elle fait également partie de mon corps objet.

Dans ce contexte, l'énaction suppose un couplage moto-proprioceptif permettant de distinguer le soi du monde extérieur (Gapenne, 2014). En effet, la proprioception est toujours associée à l'activité de l'individu. Toutefois, au cours de l'action, la proprioception n'est pas omniprésente car l'individu perçoit les effets sensoriels de ses actions (*i.e.* tactiles, visuelles, etc.). La proprioception pourrait donc avoir un rôle de filtre vis-à-vis des autres modalités sensorielles permettant à la fois la synergie et la distinction du corps objet et du corps sujet (Gapenne, 2014). Ces variations reposant sur l'expérience subjective impliquent donc une certaine forme d'intention et de conscience (Thompson, 2005 ; O'Regan, 2011).

⁷ L'ouvrage de Varela et al. (1991) peut être considéré comme une œuvre inachevée poursuivie par Thompson (2007).

L'énaction est donc une approche qui repose avant tout sur l'expérience corporelle de l'individu. En cela, elle offre d'intéressantes perspectives dans l'étude du toucher, et plus largement des sensations corporelles. En outre, l'énaction suggère que la perception tactile, et proprioceptive, se constitue tout au long de l'expérience subjective car il y a toujours synergie entre le corps comme objet et le corps comme énantant le monde. Décrire cette expérience subjective, objet du prochain chapitre, nous permettra d'aborder la question d'un point de vue phénoménologique des sensations du corps, ce qui implique également une extension sur la question de l'intentionnalité.

3.2. Expérience du corps, sensation et perception

Suivant l'approche phénoménologique, l'énaction propose de renouer avec le point de vue en « première personne » (Varela, 1996). Lorsque ma main touche un objet, à quel moment et surtout comment émerge la sensation et l'objet. C'est-à-dire que ce n'est pas l'objet en soi qui nous intéresse mais à la fois l'émergence d'un monde qui apparaît (il n'est pas pré-donné), et l'émergence d'une sensation consciente pour l'individu. Effectivement, il se joue dans cette expérience une conscience vécue qui suppose un processus de prise de conscience tout en étant en même temps dans l'acte lui-même supposant une action, c'est-à-dire notre histoire de couplage moto-proprioceptif. Ainsi, l'expérience d'un objet implique des composantes internes et externes (Despraz, 2006) mais le défi n'est pas de décrire – ou dissocier – l'une ou l'autre de ces composantes, comme on dirait que l'objet (externe) est représenté (interne), mais plutôt de savoir comment l'activité crée cette distinction (Petitmengin, 2006).

Selon Petitmengin (2006), l'expérience subjective possède une structure précise même lorsqu'il s'agit d'une idée ou d'une image. En premier lieu, l'expérience est transmodale. Elle donne lieu à une unité des perceptions. La transmodalité de l'expérience s'accompagne d'une transformation de l'identité comme si l'idée ou l'image n'appartenait plus à l'individu : « *la personne décrivant l'expérience ne dit pas "j'ai une idée, je vois une image", mais "une idée me vient, une image m'apparaît" [...]. L'idée, la sensation, émergent dans un espace qui n'est ni subjectif ni objectif* » (Petitmengin, 2006, p.89). Cet état est constitutif d'une intention dont l'acteur est le corps (Varela, 1992 ; Merleau-Ponty, 1976).

Concernant les sensations corporelles, puisque nous adressons un intérêt particulier dans cette thèse à ce type de sensation, il s'agit, pour la théorie de l'énaction, d'apporter une réponse sur comment nous pouvons faire l'expérience subjective de ces sensations corporelles

tout en faisant l'expérience, en même temps, de l'environnement avec notre corps. Thompson nomme ce problème le « *body-body problem* » (Thompson, 2005). Legrand (2005), pose le problème comme un être-avoir un corps et un soi qu'il s'agit de comprendre à travers l'expérience corporelle.

Afin d'illustrer cette double expérience, nous pouvons reprendre l'expérience corporelle vécue dans les recherches sur le mécanisme idéomoteur dont les effets sont relatifs au corps (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016, *cf.* § 1.4. Anticipation des sensations corporelles). En effet, le participant perçoit une sensation corporelle (*i.e.* vibration) tout en percevant les sensations corporelles proprioceptives et tactiles, et également intéroceptives, continues et plus précisément lors de l'appui (voir également Kunde et al., 2014). Selon la perspective énative, ces sensations sont considérées « *véhicule de l'être du monde* » (Merleau-Ponty, 1962, p.139) dans la mesure où elles représentent toute l'intention et la conscience du sujet. Notre corps est ainsi la pièce maîtresse pour être présent dans le monde ; Thompson parle de « *zéro point* » (2005, p.4) à partir duquel nous percevons, *énactons*, le monde.

Donc, dans l'expérimentation de Pfister et al. (2014) par exemple, le sujet *utilise* son corps (*i.e.* sa main) afin d'appuyer sur la touche, c'est le corps-objet, par opposition au corps-sujet, qui correspondrait au corps *sentant* la vibration (Legrand, 2005 ; Thompson, 2005). Une conscience corporelle d'un corps physique est indispensable dans ce processus (corps-objet), tout autant qu'une conscience corporelle d'un corps vécu (corps-sujet). Cette dernière ne peut être qu'une expérimentation corporelle intentionnelle, ce qui conduit Legrand à poser la « *notion de conscience non intentionnelle du corps intentionnel* » (2005, p.715). Ainsi, la sensation de l'appui, *via* la proprioception, couplée à l'acte d'appui est une activité que l'on peut qualifier de préreflexive.

Considérons l'exemple fourni par O'Regan (2011) : l'expérience subjective de la sensation de la dureté d'une éponge ou d'une mousse (*cf.* figure 5, p.40). Tenant cette mousse dans la main sans faire d'action, il n'y a pas de sensation, ni de perception de la dureté de la mousse. Pour cela, il est nécessaire de faire une action avec le corps-objet afin d'exercer une pression sur la mousse et percevoir, à toutes les étapes de cette action, les sensations corporelles du corps-sujet d'où émerge la perception de la dureté de la mousse et la propre expérience corporelle de cette action.



Figure 5 : La sensation de la mousse émerge de l'action. Elle n'est pas contenue dans le cerveau, ni dans une représentation mentale. Cette image tirée d'O'Regan (2011) souligne à la fois comment le couplage sensori-moteur (l'action) énonce la sensation de la dureté de la mousse, et comment le système somato-sensoriel (*i.e.* le corps) constitue la base de ce couplage et des connaissances sur le monde.

Plutôt que distinguer sensation et perception, O'Regan et Noë (2001) ont recours à deux niveaux de contingences sensori-motrices. Ces contingences sont à comprendre comme des dépendances du sensoriel et du moteur formalisées sous forme de lois de contingence (*cf.* Visetti & Rosenthal, 2006, pour une critique du concept comme continuité de l'énaction).

Le premier niveau de contingences sensori-motrices est spécifique d'une modalité (*i.e.* proprioceptive, visuelle, etc.), et correspond à ce qui est appelé classiquement la sensation ; le second niveau est celui qui est pertinent pour les attributs sensoriels d'un objet permettant sa perception. Toutefois, ces deux types d'expériences posent question (voir le commentaire d'Humphrey p.987 dans O'Regan et Noë, 2001) car ils ne correspondent pas à ce que nous venons de décrire sur le plan de l'expérience subjective.

O'Regan, en 2011, opte pour une définition de la sensation en termes d'interaction sensorimotrice, ce qui correspond davantage à notre propos. En effet, comme nous l'avons souligné, les sensations ne peuvent se constituer qu'à partir des interactions entre un corps et l'environnement, et inversement. Pour O'Regan (2011), la sensation possède quatre caractéristiques : la richesse (*Richness*), la corporalité (*Bodiliness*), l'insubordination partielle, (*Partial Insubordinateness*) et l'accaparement (*Grabbiness*). Il souligne que le mouvement du corps est indispensable aux sensations mais qu'elles peuvent également provenir de modifications sensorielles issues de changement de l'environnement. Par exemple, la sensation de la mousse est subordonnée au mouvement du corps mais partiellement car la mousse peut être projetée sur notre corps, puis sentie, sans que nous bougions.

3.3. Synthèse

Dans ce dernier chapitre théorique, notre propos a été de montrer que faire l'expérience de notre environnement revient à avoir une double expérience de notre corps : celle qui consiste à percevoir l'environnement grâce aux sensations corporelles ; celle qui consiste à percevoir notre corps *via* nos récepteurs lors des interactions avec l'environnement.

L'énaction (Varela et al., 1991) est un cadre conceptuel qui est à même de considérer cette double expérience née de couplages sensori-moteurs lors des interactions avec l'environnement. De plus, l'énaction met l'accent sur l'expérience phénoménologique qui se construit au cours de l'action.

C'est en nous appuyant sur ce point que nous allons reconsidérer l'anticipation des effets reliés au corps de l'action dans le contexte du principe idéomoteur.

II – EXPÉRIMENTATIONS

CHAPITRE 1 – Problématique et hypothèses

La théorie idéomotrice stipule qu'une action est anticipée par les effets sensoriels que produit cette action. Ce principe formulé par James (1890) a été éprouvé expérimentalement à partir de deux paradigmes distincts (Elsner & Hommel, 2001 ; Kunde, 2001). S'attachant principalement à explorer les effets sensoriels distaux (*i.e.* auditifs, visuels) sur la base d'un codage distal des événements (Hommel et al., 2001), ces expérimentations n'ont pas tenu compte, premièrement, du postulat initial que les effets reliés au corps (*i.e.* tactiles, proprioceptifs) jouaient un rôle dans l'action idéomotrice (James, 1890) et, deuxièmement, que ces effets reliés au corps étaient concomitants aux effets reliés à l'environnement, au moins lors de l'activation des réponses (Kunde et al., 2004).

L'étude récente des effets reliés au corps dans l'action idéomotrice a montré que des effets tactiles, vibratoires et cutanés, étaient anticipés tout comme le sont les effets des autres modalités sensorielles (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016).

Ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes. Plutôt, ils interrogent plus profondément sur le rôle du corps, par le toucher et le mouvement, dans l'action. Ils permettent de repositionner au premier plan dans la théorie de l'action la pensée de James (1890) sur l'action idéomotrice.

Celui-ci mettait l'emphase sur :

- le fait que l'action idéomotrice est l'action habituelle de la vie courante,
- le mouvement, comme nous l'avons évoqué ci-dessus, et donc plus largement sur le rôle du corps dans l'action. D'ailleurs, il stipule bien que c'est l'anticipation des effets du mouvement qui déclenche l'action englobant effets distaux et proximaux : « *It is the anticipation of the movement's sensible effects, resident, or remote* » (James, 1890, p.521),
- l'immédiateté du mécanisme idéomoteur,
- le caractère volontaire et intentionnel de l'action idéomotrice tout en soulignant sa quasi-automaticité et son caractère reflexe.

Outre la théorie idéomotrice, nous avons vu que le corps n'est pas qu'un réceptacle physique pour percevoir le monde. La physiologie des organes du toucher et de la proprioception, et plus largement de tous les organes somatiques, montre les liens qu'ils entretiennent entre eux et avec les autres organes sensoriels, par des couplages, et avec une grande partie du cortex, par des mécanismes d'intégration (*e.g.* la notion d'intéroception).

Le corps est donc central dans nos comportements.

Le paradigme de l'énaction (Varela et al., 1991) offre un cadre théorique idoine pour unifier le mouvement du corps et les sensations du mouvement du corps qui impliquent à la fois proprioception et toucher, c'est-à-dire qu'une action repose toujours sur un couplage somato-moteur. Mais l'énaction est également un paradigme qui replace ces perceptions dans une expérience subjective. Autrement dit, c'est de l'expérience corporelle (d'être et d'avoir un corps) qu'émerge l'action.

Pris ensemble, ces arguments théoriques questionnent le rôle des effets reliés au corps dans l'anticipation de l'action (*i.e.* action idéomotrice). En effet, comment un effet tactile influence-t-il l'anticipation de l'action dans la mesure où il se retrouve totalement immergé au sein d'un flux d'autres sensations corporelles ?

Cette thèse a un double objectif.

Le premier est de montrer que l'anticipation des effets reliés au corps procède de manière équivalente que l'anticipation des effets reliés à l'environnement. Il n'est pas forcément question d'unité de la perception comme nous l'avons évoqué plus haut, mais il s'agit de mettre en évidence qu'au cours de l'action il n'y a ni frontière conceptuelle ni frontière empirique entre ces deux types d'effets.

Le deuxième objectif est d'illustrer le paradigme énonactif en montrant que loin d'être un effet distinct du moteur, l'effet de sensations corporelles en est un des constituants indissociables et corrélatifs. Ainsi, suivant Varela et al. (1991), la théorie de l'énaction et également James (1890) ainsi que ces précurseurs, nous avons pour objectif de développer l'idée selon laquelle des effets liés au corps-objet et corps-sujet, continus dans l'action, sont anticipés montrant ainsi que le mécanisme idéomoteur s'applique à des comportements intentionnels et non intentionnels et donc à des actions quasi-automatiques comme c'est le cas dans les activités quotidiennes.

Notre hypothèse générale est que les effets tactiles et proprioceptifs anticipés au cours de l'action guident l'action par le jeu des couplages moto-proprioceptifs corrélatifs de l'action.

Nos hypothèses de travail sont :

1/ L'action est anticipée par les effets reliés au corps qui l'accompagnent. En nous appuyant sur les travaux antérieurs (Kunde et al., 2001 ; Pfister et al., 2014), nous pouvons nous attendre à ce que ces effets surviennent en dehors de toute contingence spatiale. Plus précisément, nous pouvons prédire qu'une réponse sera plus rapidement produite si l'effet tactile qui y est associée est compatible avec celle-ci que lorsque l'effet tactile associée est incompatible avec cette réponse.

2/ Les effets tactiles d'une action influencent la production de la réponse. Illustrant également la concomitance des différents effets de l'action et par le jeu de couplages moto-proprioceptifs, nous pouvons nous attendre à observer que les effets tactiles modifient la réponse de l'action dans une procédure de compatibilité réponse-effet. Autrement dit, nous pouvons prédire que la force de pression exercée sur une touche réponse repose sur un principe de moyennage en fonction de la force de réponse et de l'intensité de l'effet tactile comme cela a été retrouvé chez Kunde et al. (2004).

3/ La sensation tactile et proprioceptive perçue *online* lors du mouvement est anticipée. Chaque mouvement implique le sens tactile et proprioceptif. Il fournit par ailleurs une fluence qui correspond à l'expérience subjective de facilité qui accompagne le geste (Casasanto, 2009). Nous pensons que cette expérience subjective sera anticipée en fonction du niveau de facilité. C'est-à-dire que nous pouvons prédire que les temps de réponse pour anticiper un geste fluent seront plus précoces que pour un geste non fluent.

4/ Ces mécanismes idéomoteurs sont applicables cliniquement et offrent des pistes de travail dans des champs interventionnels variés, comme en neurologie ou dans le développement.

Les trois premières hypothèses font l'objet d'un travail expérimental présenté sous forme d'article (chapitre 2, chapitre 3 et chapitre 4). Émergeant de ces travaux, deux études supplémentaires portant sur l'anticipation d'une expérience tactile et sur le jugement des effets de l'action compléteront ces résultats (chapitre 5). Ces travaux sont également présentés sous la forme d'un article court. Puis, anticipant sur la discussion générale de cette thèse, nous présenterons dans un chapitre spécifique certaines perspectives et travaux expérimentaux supplémentaires menés au cours de la thèse (chapitre 6).

CHAPITRE 2 – Une extension de Pfister et al. (2014)

2.1. Introduction

En utilisant le paradigme basé sur la compatibilité entre la réponse et l'effet (« *Response-Effect Compatibility* », REC) de Kunde (2001), Pfister et al. (2014) et Wirth et al. (2016) ont mis en évidence que des effets liés au corps étaient anticipés lors de l'action. Ces deux travaux montrent un allongement des temps de réponse dans le dernier quintile dans une condition compatible par rapport à la condition incompatible. La condition compatible consiste chez Pfister et al. (2014) à faire vibrer un capteur sous une touche réponse du même côté que la réponse. Inversement, la condition incompatible consiste en une vibration du côté opposé à la réponse. Bien que la procédure de Wirth et al. (2016) diffère quelque peu, on retrouve néanmoins, dans ces deux travaux, une contingence spatiale associée à l'effet tactile.

La problématique de l'effet de cette contingence spatiale avait été discutée par Kunde (2001) à la suite d'une première expérience puis levée après une seconde expérience portant sur les effets reliés à l'environnement.

Dans le but d'établir la réciprocité des effets reliés à l'environnement et reliés au corps, nous avons publié un article s'appuyant sur le paradigme de Kunde (2001) et la procédure de Pfister et al. (2014).



When the vibrations allow for anticipating the force to be produced: an extend to Pfister et al. (2014)

Guillaume Thébault^{1,2} · Arthur-Henri Michalland^{2,3} · Vincent Derozier⁴ · Stéphane Chabrier^{1,5} · Denis Brouillet²Received: 9 December 2017 / Accepted: 24 January 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

According to the ideomotor theory, action selection is done by the mental anticipation of its perceptual consequences. If the distal information processed mainly by vision and hearing are considered essential for the representation of the action, the proximal information processed by the sense of touch and proprioception is of less importance. Recent works seem to show the opposite. Nevertheless, it is necessary to complete these results by offering a situation, more ecological, where response and effect can occur on the same effector. So, the goal of our work was to implement a more relevant spatial correspondence because to touch is not the same action that to hear or to see. To do so, participants pressed a specific key after the presentation of a stimulus. The key vibrated depending on the pressure exerted on it. In a compatible condition, high pressure on a key triggered a high vibration, while in an incompatible condition high pressure triggered a low vibration on the same effectors. As expected, the response times were faster in the compatible condition than the incompatible condition. This means that proximal information participates actively in the selection of action.

Keywords Action · Anticipation · Tactile effects · Body · Ideomotor theory

Introduction

Every action we perform causes specific effects in the environment. For instance, pressing a doorbell triggers a ring and consequences for inhabitant behaviour: opening the door. If you know that a baby sleeps in this home, you will delicately press the doorbell with your hand hoping that it will not wake up the baby. Schematically, a stimulus (the doorbell) is associated with a perceptual effect (bell ringing) and a response (to press). Similarly, ideomotor theory postulates that an idea, or an image, based on perceptual and body effects of actions, is enough to activate action representations (James 1890; Lotze 1852).

The modern conception of the ideomotor theory propose that actions are selected by their “auditory, visual, proprioceptive, kinesthetic and/or tactile” (Greenwald 1970, p. 51) consequences. However, the theoretical issue of what effects are coded in action is still open (Shin et al. 2010).

Specifically, tactile or proprioceptive effects are presupposed to be more marginal than auditory and visual effects (Osiurak and Badets 2014; Pfister and Kunde 2013). For instance, in the theory of event coding (TEC, Hommel et al. 2001) there is a distinction between the distal events related to objects of environment and proximal events than concern

✉ Guillaume Thébault
guillaume.thebault@univ-st-etienne.fr
Arthur-Henri Michalland
arthur-henri.michalland@univ-montp3.fr
Vincent Derozier
vincent.derozier@mines-ales.fr
Stéphane Chabrier
stephane.chabrier@univ-st-etienne.fr
Denis Brouillet
denis.brouillet@univ-montp3.fr

¹ INSERM, UMR1059 SAINBIOSE, Univ Jean-Monnet, Univ Lyon, 42023 Saint-Étienne, France

² Université Paul Valéry Montpellier III, Univ Montpellier, Laboratory Epsilon EA4556, 34000 Montpellier, France

³ CNRS-UM, LIRMM, Interactive Digital Humans, Montpellier, France

⁴ Institut Mines Télécom–Mines Alès–Euromov Université de Montpellier, Montpellier, France

⁵ CHU Saint-Étienne, French Centre for Paediatric Stroke/Paediatric Physical and Rehabilitation Medicine Department, INSERM CIC1408, 42055 Saint-Étienne, France

the physical perception such as body sensations. By drawing on the need to constantly refer on our kinaesthetic and tactile perceptions, the theory “assumes that action planning is based on distal representations” (Hommel 2009, p. 516). This position is also the one of James (1890).

Derived from the Greenwald paradigm, Hommel and collaborators (Elsner and Hommel 2001, 2004; Hommel et al. 2001) proposed a two-phase procedure to explore distal effects. In the first phase, participants pressed right or left keys after the presentation of a white rectangle. Each response key triggered a tone; for instance, the right key triggered a high tone, while the left key triggered a low tone. In the test phase, the tone was presented and participants pressed the key as quickly as possible. In one condition, the relations between tone and response key were similar to the acquisition phase; in another condition, the tone and response key were different. Elsner and Hommel (2001) showed that participants were faster to press the key in the similar condition than the non-similar condition. Recently, it has been showed that proprioceptive perceptions were integrated in the same representation as action (Camus et al. 2016, 2017). So, the proximal effects could be less marginal than what is mentioned in TEC.

These proximal effects were more specifically explored with the response-effect compatibility paradigm (Kunde 2001). Indeed, for Kunde (2001), the anticipation of action cannot be demonstrated if the effect precedes the participant's response as used in Elsner and Hommel's (2001) experiments. Thus, he proposed a procedure that does not require a test phase, and where effects always occur after responses. This procedure is simple and relatively similar to our example and other ecological learning situations. For instance, pressing a key triggers a tone. In one condition (compatible condition), the pressure exerted on the key is compatible with the intensity of the tone (i.e., high pressure triggers a high tone), while in the second condition (incompatible condition) the pressure exerted will be followed by an incompatible tone (i.e., low pressure triggers a high tone). Kunde (2001) found that response times were faster in the compatible condition than in the incompatible condition, showing the role of distal effects in the anticipation of action.

Recently, based on Kunde's paradigm, Pfister et al. (2014) and Wirth et al. (2016) specifically explored proximal effects (see also Ten Hoopen et al. 1982). They used a response-effect compatibility paradigm where participants answer to a stimulus and responses were followed by a tactile effect. For instance, in the first experiment of Pfister et al. (2014), after a stimulus presentation, participants pressed a response key which vibrated according to a spatial condition (i.e., compatible condition, the key pressed vibrates) or according to an incompatible spatial condition (i.e., the opposite key vibrates). The results showing faster

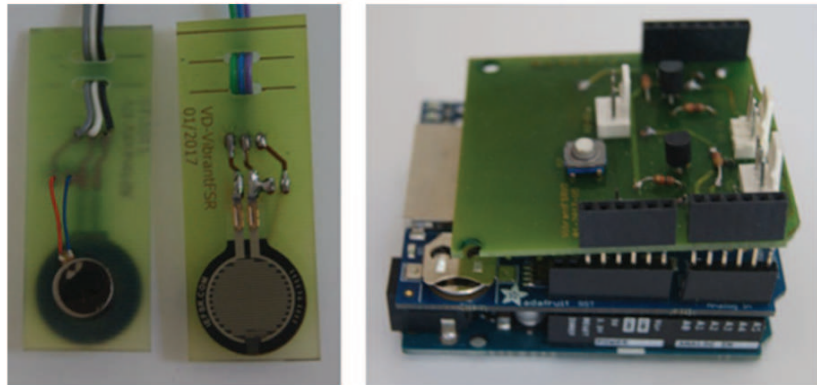
answers in the compatible than incompatible were only found in the fifth quintile, but indicated an anticipation of actions depending on body effects. Pfister et al. (2014) interpreted these small effects as being due to the methodology used. In fact, in ecological situations if actions performed by the right hand can trigger auditory or visual effects on the left, there are few activities where the right hand triggers a body effect in the left hand. For Wirth et al. (2016), the small effect found by Pfister et al. (2014) could also be task-relevant so they proposed a new task. After the presentation of a stimulus (stimulus), the participants moved a slider with one hand (response) connected to a brush stimulating the opposite forearm (effect). In one condition, the movement of the hand was similar to the movement of the brush on the skin of the opposite forearm (compatible condition), while in another condition, these movements were incompatible. Results showed a main effect of compatibility with response times being faster in the compatible condition than incompatible condition. These two studies appear to provide evidence in the favour of tactile effects in the anticipation of an action.

Nevertheless, if for distal information spatial correspondence between movement of hand and effects is probably always integrated during action, for proximal information it seems necessary to compare conditions which are which similar in ecological situations. Thus, it is quite unlikely in daily life to touch an object with left hand and to perceive consecutively a tactile effect with right hand (case of the study of Pfister et al. 2014). What is possible with auditory or visual effects is not appropriate with tactile effects.

To extend previous works on anticipation of action by tactile effects, we believe that it is crucial to match response, spatial compatibility and effect in the context of touch because an artificial compatibility could affect response times. In other words, we believe that response and effect must concern the same effector, that is to say the finger doing the action.

Building on Pfister et al.'s (2014) and Kunde's (2001) studies, we proposed an experiment without spatial compatibility between response and effect to be more similar to an ecological situation. Our introductory example is a typical situation where pressing a key needs tactile afferences of the same hand. Indeed, despite your best endeavours, if you feel your finger sinking into the doorbell, you will expect to hear the baby crying. In our study, we designed a procedure to measure in the same location the effects of compatibility of pressure and vibration effects. We expected faster answers when high pressure was associated with a high vibration effect or low pressure was associated with a low vibration effect (i.e., compatible condition) in comparison to answers where high pressure was associated with a low vibration effect or low pressure was associated with a high vibration (i.e., incompatible condition).

Fig. 1 The keys were composed on one face by a motor and on other face by a force sensitive resistor (a, on the left). These keys were controlled by an Arduino interface (b, on the right)



Methods

Participants

Thirty-two participants took part in the experiment. All were naïve about the experiment's purpose and gave their free consent after being informed about study. The number of participants was in accordance with results carried out by GPower software (Faul et al. 2007).

Materials

We created two specific response keys for our experiment (Fig. 1a). On one side of the key, we placed a Force Sensitive Resistor (FSR, FSR-402 from Interlink Electronics, Santa Barbara, CA, USA, cf. Fig. 1a on the right) with a round sensing area 0.5" in diameter. On the other side, we put a vibration motor like those used in a smartphone (cf. Fig. 1a on the left). These keys were controlled by an Arduino interface (Arduino Leonardo, Somerville, MA, USA) that creates keyboard responses from captors (Fig. 1b). We calculated two distinct forces of pressure needed to trigger a response. The force to trigger low pressure was up to 25 cN while the force needed to trigger high pressure was up to 77 cN. The vibrations oscillated in two different frequencies determined by the Arduino programme resulting in high or low vibrations. The frequencies of high vibrations were twice as high as low vibrations. Concretely, the key response vibrated according to two different levels as a function of the force of pressure exerted on the FSR by participants.

Stimuli and procedure

The experiment was conducted in an isolated room. The participants seated in front of a computer with forearms on the table. Hands were placed at a similar distance from the

middle of the screen. We instructed them to grasp a specific key (cf. Fig. 1a) between their thumb and their finger, as if they were grasping a key or a coin.

The stimuli, two capital letters (H and X, Droid sans mono, 60 pt), were presented for 250 ms in the centre of a 17" screen. The letters were in white on a black background. Participants were asked to press the response keys according to two levels of pressure depending on the stimuli (e.g., right key for H and left key for X). The participants had to exert strong pressure on one key and low pressure on the other key as quickly as possible when the letters appeared. The vibrations (low vs high) were triggered after a 200 ms delay once the level of pressure had been reached. The duration of the vibration was 250 ms. Participants had 1500 ms to respond after the presentation of stimuli. Then, the next trial started after an interval of 1000 ms. Participants completed ten blocks of 16 trials in the compatible and incompatible conditions. The order of presentation of experimental conditions was counterbalanced. Half of the participants used their right hand to exert high pressure.

Results

Errors produced by participants (6.25%) and responses under 150 ms and exceeding 1250 ms were removed from the statistical analysis. Then, for each participant, we applied a filter to exclude the responses at 2.5 SD above and below the mean in each condition of compatibility. We calculated quintiles of distributions for each participant and condition.

To examine the response times by quintiles in each condition, a 2×5 analysis of variance (ANOVA) was carried out to test the principal effects of compatibility and quintile, and then interaction effects. We found a significant effect of compatibility [$F(1, 31) = 4.74, p = .04, \eta_p^2 = 0.13$]; participants responded faster in the compatible condition than in the incompatible and a significant effect of quintile was found as expected [$F(31, 124) = 386, p < .001, \eta_p^2 = 0.96$].

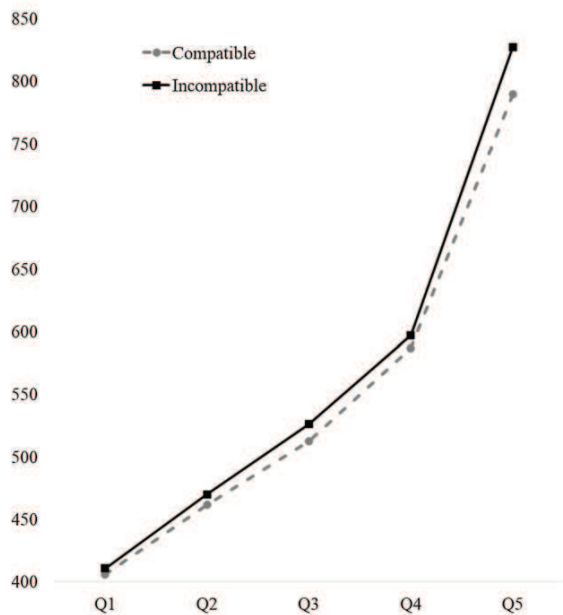


Fig. 2 Results by quintiles of compatible and incompatible conditions

As shown in Fig. 2, a significant interaction effect was found [$F(4, 24) = 6.41, p < .0001$]. Analysis of this interaction showed only a significant effect for the higher quintile ($p = .01, \eta_p^2 = 0.51$).

Discussion

The aim of this study was to provide evidence for the role of tactile effects in the anticipation of actions while the ideomotor theory implies that the proximal information processed by proprioception is of less importance for the representation of actions (Osiurak and Badets 2014; Pfister and Kunde 2013). If it is well established that distal effects (i.e., visual or auditory) are important for the anticipation of action (e.g., Elsner and Hommel 2001; Kunde 2001; Kunde et al. 2004), few studies have shown a similar role for proximal effects (Pfister et al. 2014; Wirth et al. 2016).

Unlike Pfister et al. (2014), in our study, response and effect concerned the same effector (i.e. the finger doing the action). Our results highlighted that response times were faster when strongly (or weakly) pressing the response key was followed by a strong (or weak) tactile vibration than when response and effects were presented in an incompatible condition. Furthermore, we also observed an interaction effect of compatibility and quintile. More precisely such as Kunde (2001), Pfister et al. (2014) and Wirth et al. (2016), a significant effect of compatibility was found only in the last

quintile of the distribution. So, as expected, tactile effects are well anticipated before response initiation.

If Pfister et al.'s (2014) results could be interpreted by the spatial coding brought about by tactile effects occurring during a task, our results were supported by tactile effects features. Thus, we strengthen the hypothesis that tactile effects play the same role as distal effects, highlighting the role of proximal effects in the ideomotor mechanism (James 1890; Badets et al. 2014; Pfister et al. 2014; Wirth et al. 2016).

Another explanation could take into account the origin of tactile stimulation. Indeed, we may wonder whether all the tactile vibrations really activate proximal effects whereas body sensations are either environment-related or related to the activity of the agent.¹ Thus, an assumption to be considered is that tactile effects following an action are distinguished by the subject as two distinct events by the source of sensation (Dijkerman and De Haan 2007). Tactile proximal effects would be the sensations perceived by the subject when acting; tactile distal effects would be the sensations perceived by the subject when triggered by an event in the environment. This argument is legitimate insofar as our results are very similar to others (Kunde 2001; Pfister et al. 2014; Wirth et al. 2016) highlighting the involvement of external stimuli (i.e., distal effects) and not those “internal to the body” (i.e., proximal effects). For instance, blind subject can perceive objects in the environment with sensory stimulations delivered via a specific device, but only if the subject is in an active exploration involving moto-sensory processes (Bach-y-Rita et al. 1969; Gapenne 2014; see also; Varela et al. 1991). Interestingly, the perception of tactile sensors from a device is sometimes abolished by sensation arising from the environment, generating confusion between internal and external bodily events (Auvray et al. 2005; Gapenne 2014).

This argument leads us to think that proximal–distal might not be relevant. Indeed, a tactile stimulus is both distal (i.e., its origin via proprioceptive sensations) and proximal (i.e., the sensation it triggers).

So, we could consider the role of touch such as another proximal effect grouping sensations and movements since movement is at the core of ideomotor mechanisms (James 1890). Previous research found a correspondence between force exerted with digits and perceptive effects allowing one to select and to initiate movement on the principle of bidirectional relations between motor and perceptual codes (Kunde 2001; Kunde et al. 2004). These relations reflect the integrative process during action (Blanchard et al. 2013; Camus et al. 2016, 2017). Taken together, anticipation of tactile and proprioceptive effects produced by movement, which encompasses motor control via the musculoskeletal

¹ Remote versus resident effects for Shin et al. (2010).

framework (Kavounoudias et al. 2008; Stillman 2002), still need to be explored.

Funding This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References

- Auvray M, Hannequin S, Lenay C, O'Regan JK (2005) There is something out there: distal attribution in sensory substitution, twenty years later. *J Integr Neurosci* 4:505–521
- Bach-y-Rita P, Collins C, Saunders F, White B, Scadden L (1969) Vision substitution by tactile image projection. *Nature* 221:963–964
- Badets A, Koch I, Philipp AM (2014) A review of ideomotor approaches to perception, cognition, action, and language: advancing a cultural recycling hypothesis. *Psychol Res* 80:1–15
- Blanchard C, Roll R, Roll JP, Kavounoudias A (2013) Differential contributions of vision, touch and muscle proprioception to the coding of hand movements. *PLoS One* 8:e62475
- Camus T, Brouillet D, Brunel L (2016) Assessing the functional role of motor response during the integration process. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 42:1693–1702
- Camus T, Hommel B, Brunel L, Brouillet T (2017) From anticipation to integration: the role of integrated action-effects in building sensorimotor contingencies. *Psychon Bull Rev*. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1308-6>
- Dijkerman HC, De Haan EH (2007) Somatosensory processes subserving perception and action. *Behav Brain Sci* 30:189–201
- Elsner B, Hommel B (2001) Effect anticipation and action control. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 27:229–240
- Elsner B, Hommel B (2004) Contiguity and contingency in action-effect learning. *Psychol Res* 68:138–154
- Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A (2007) G* Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods* 39:175–191
- Gapenne O (2014) The co-constitution of the self and the world: action and proprioceptive coupling. *Front Psychol* 5:594
- Greenwald AG (1970) Sensory feedback mechanisms in performance control: with special reference to the ideo-motor mechanism. *Psychol Rev* 77:73–99
- Hommel B (2009) Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychol Res* 73:512–526
- Hommel B, Müsseler J, Aschersleben G, Prinz W (2001) The theory of event coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behav Brain Sci* 24:849–877
- James W (1890) *The principles of psychology*. Harvard University Press, Cambridge
- Kavounoudias A, Roll JP, Anton JL, Nazarian B, Roth M, Roll R (2008) Proprio-tactile integration for kinesthetic perception: an fMRI study. *Neuropsychologia* 46:567–575
- Kunde W (2001) Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *J Exp Psychol: Hum Percept Perform* 27:387–394
- Kunde W, Koch I, Hoffmann J (2004) Anticipated action effects affect the selection, initiation, and execution of actions. *Q J Exp Psychol* 57:87–106
- Lotze HR (1852) *Medicinische Psychologie oder Physiologie der Seele* [Medical psychology or the physiology of the mind]. Weidmann'sche Buchhandlung, Leipzig
- Osiurak F, Badets A (2014) Pliers, not fingers: tool-action effect in a motor intention paradigm. *Cognition* 130:66–73
- Pfister R, Kunde W (2013) Dissecting the response in response-effect compatibility. *Exp Brain Res* 224:647–655
- Pfister R, Janczyk M, Gressmann M, Fournier LR, Kunde W (2014) Good vibrations? Vibrotactile self-stimulation reveals anticipation of body-related action effects in motor control. *Exp Brain Res* 232:847–854
- Shin YK, Proctor RW, Capaldi EJ (2010) A review of contemporary ideomotor theory. *Psychol Bull* 136:943–974
- Stillman BC (2002) Making sense of proprioception: the meaning of proprioception, kinaesthesia and related terms. *Physiotherapy* 8:667–676
- Ten Hoopen G, Akerboom S, Raaymakers E (1982) Vibrotactile choice reaction time, tactile receptor systems and ideomotor compatibility. *Acta Psychol* 50:143–157
- Varela FJ, Thompson E, Rosch E (1991) *The embodied mind: cognitive science and human experience*. MIT Press, Cambridge
- Wirth R, Pfister R, Brandes J, Kunde W (2016) Stroking me softly: body-related effects in effect-based action control. *Atten Percept Psychophys* 78:1755–1770

2.2. Synthèse

Cette expérience construite sur le paradigme REC (Kunde, 2001) et sur l'expérience de Pfister et al. (2014) puisqu'elle en reprend quasiment point par point les particularités méthodologiques, apporte un argument supplémentaire en faveur de l'anticipation des effets reliés au corps lors de l'action. Ici, la dimension spatiale n'est pas une caractéristique partagée par l'effet lié au corps, si bien qu'aucun lien ne peut être fait avec l'attention (voir Kunde, 2001). La dimension commune entre l'effet et l'action est l'intensité. Dans la condition compatible, un appui fort déclenche un son fort. Cette différence de dimension n'est pas négligeable car l'intensité repose sur la manière dont l'individu interagit avec la touche de réponse. C'est-à-dire que c'est une caractéristique intrinsèque.

L'analyse de cette action en termes de sensations corporelles peut donc se caractériser comme suit : toucher passif de la touche lors de la présentation du Stimulus – toucher actif (réafférence) et proprioception lors de la réponse – toucher passif et toucher actif (exafférence).

Suivant cette idée, une question est de savoir dans quelle mesure cette exafférence influence la réafférence qui a lieu lors de la réponse (et inversement). C'est l'objet de la prochaine expérimentation.

CHAPITRE 3 – Une extension de Kunde et al. (2004)

3.1. Introduction

Kunde et al. (2004) ont observé l'influence des effets de l'action sur la production de la réponse en mesurant la force exercée sur les touches de réponse. L'expérience construite sur une procédure similaire à Kunde (2001), mettait donc en jeu un effet auditif et l'effet proprioceptif et tactile que nous venons d'évoquer qui se déclenche lors de la pression sur la touche. Ce couplage sensoriel intermodal s'est traduit par un effet de moyennage. Précisément, un son fort entraînait une réduction de la force d'appui sur la touche, quelque soit la réponse demandée (*i.e.* fort ou faible). Kunde et al. (2004) comparent cet effet à celui observé dans les tâches de synchronisation sensorielle (Aschersleben & Prinz, 1997). Toutefois, dans ce cas le moyennage dépend du temps séparant la réponse et l'effet.

Quoiqu'il en soit, les résultats de Kunde et al. (2004) peuvent être interprétés à la lumière d'une intégration des effets perceptifs qui occursent au cours de l'action (Camus et al., 2018).

Notre expérience explore un processus intramodal illustrant la question du « *body-body problem* » discuté plus haut (Thompson, 2005, *cf.* p.39) et donc d'un couplage somato-corporel.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

**Body-related effects coupling in action production:
An extend to Kunde et al. (2004)**

Guillaume Thébault^a, Roland Pfister^b, Arthur-Henri Michalland^{a,c}, Denis Brouillet^a

- a. Univ Paul Valéry Montpellier 3, Univ Montpellier, EPSYLON EA 4556, F34000, Montpellier, France
- b. Department of Psychology III, University of Würzburg, 97070 Würzburg, Germany
- c. CNRS-UM, LIRMM, Interactive Digital Humans, France

E-mail addresses

Guillaume Thébault, guillaume.thebault@univ-montp3.fr
Roland Pfister, roland.pfister@psychologie.uni-wuerzburg.de
Arthur-Henri Michalland, a.mmm@orange.fr
Denis Brouillet, denis.brouillet@univ-montp3.fr

Corresponding author

Guillaume Thébault
Université Paul Valéry Montpellier III, Laboratory Epsilon EA4556
34090 Montpellier, France.
+33411757065
guillaume.thebault@univ-montp3.fr

Word count: 2934

Abstract

In a previous study on ideomotor action, Kunde et al. (2004) showed that predictable action effects in the agent's environment influenced action production. That is, if participants were required to perform a forceful keypress, they exerted more force when these actions would produce a quiet as compared to a loud tone, suggesting that anticipated proprioceptive and auditory action effects are averaged during action planning and control. In light of the typically weak influence of body-related effect found in recent work, we aimed to extend this pattern of results to the intramodal proprioceptive/tactile feedback of a movement and following vibrotactile effects. Our results indeed suggest that the same averaging process applies to the intramodal case of (vibro-)tactile action effects. These observations support the idea of a common mechanism which binds all action-related features in an integrated action representation, irrespective of whether these features relate to exafferent or reafferent signals.

Keywords: ideomotor action, body-related effects, proprioceptive and tactile feedback, action production

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1. Introduction

Our body is the cornerstone of our actions. It enables us to interact with the environment by our movements and, at same time, these actions provide sensory feedback. More precisely, our somatosensory system provides us tactile and proprioceptive sensations of our own movement, and such sensation further inform about the state of the environment. Even though these sensations unfold only while we carry out an action, anticipations of upcoming sensory changes are functionally relevant already for planning and initiating a body movement (Hommel, 2009; Kunde, 2006; Shin, Proctor, & Capaldi, 2010).

Most research on the role of sensory anticipations in action control has focused on the auditory or visual modality (Pfister, 2019), whereas recent studies have highlighted that body-related effects (i.e., tactile and proprioceptive sensations) are recruited in the process just as well (Pfister, Janczyk, Gressmann, Fournier, & Kunde, 2014; Thébault, Michalland, Dérozier, Chabrier, & Brouillet, 2018; Wirth, Pfister, Brandes, & Kunde, 2015). This notion follows classical formulations of ideomotor theory which maintained that body-related effect (i.e., tactile and proprioceptive effects) is used to represent, select and control actions (Bain, 1855; James, 1890; Harleß, 1861; Herbart, 1825; Lotze, 1852, see also, Stock & Stock, 2004). Nevertheless, the role of tactile and proprioceptive effects on the physical production of responses has received only limited attention by empirical research to date.

To examine whether sensory effects are indeed anticipated during action planning and initiation, Kunde (2001) devised a paradigm in which responses triggered predictable visual or auditory effects on a shared dimension (Response-Effect Compatibility paradigm). He showed, for instance, that keypress actions were initiated faster in a compatible condition where a tone following the response was of the same intensity (loud tone following a forceful keypress, quiet tone following a soft keypress) as compared to an incompatible condition (loud tone following a soft keypress, quiet tone following a forceful keypress). Using the same paradigm, Kunde,

1
2
3 Koch, & Hoffman (2004) found that sensory effects also influence how the movements are
4
5 executed. Indeed, in this experiment the force exerted on the key changed as a function of the
6
7 upcoming action effects. For instance, for forceful responses the pressure exerted on the
8
9 response key was lower if this response was to trigger a loud effect tone than if this response
10
11 was to trigger a quiet tone.
12
13

14
15 Kunde et al. (2004) interpreted this impact of anticipated action effects on response
16
17 execution in light of the extended Paillard-Fraisse hypothesis (Aschersleben & Prinz, 1997;
18
19 Paillard, 1949; Fraisse, 1980). This hypothesis was mainly studied in sensorimotor
20
21 synchronization tasks, in which participants are to synchronise finger taps with rhythmic tones.
22
23 A consistent observation in such tasks is that the finger tap is made slightly (20-50 ms) before
24
25 the tone rather than in perfect synchrony (Aschersleben & Prinz, 1995; Billon, Bard, Fleury,
26
27 Blouin, & Teasdale, 1996; for reviews, see Aschersleben, 2002; Repp, 2005). To account for
28
29 this finding, the Paillard-Fraisse hypothesis holds that participants aim to synchronise the
30
31 perceived time of the proprioceptive signals of the movement and the auditory signals relating
32
33 to the tone, which come with different nerve conduction rates so that slight physical asynchrony
34
35 is necessary to synchronise the perceptual timing of both events. Crucially, coupling delayed
36
37 action effects to the participants' taps has a direct and linear effect on the time a tap is produced:
38
39 the longer the action-effect delay, the earlier the onset of the finger tap (Aschersleben & Prinz,
40
41 1997). This suggests that different action-related temporal features are averaged in the
42
43 corresponding event representation so that the timing of the tapping movement needs to be
44
45 adjusted to keep the average registered time constant (the extended Paillard-Fraisse hypothesis).
46
47 Kunde et al. (2004) suggested that a similar compensatory averaging process affects the force
48
49 exerted during action execution: if an agent aims at producing a constant mean intensity, a quiet
50
51 tone effect calls for a higher intensity of the action (i.e., higher peak force) as a loud tone effect
52
53 (i.e., lower peak force). In a similar vein, Horváth, Bíró, & Neszmeélyi (2018) found that the
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 peak force produced during tapping was attenuated by the presence of an auditory effect as
4
5 compared to situations without effects, which seems to support the idea of an averaging process
6
7 that occurs as the result of an integration of proprioceptive and auditory effects (Camus,
8
9 Brouillet, & Brunel, 2018, see also Neszmeélyi & Horváth, 2017).

10
11
12 With the present experiment, we aimed at extending the findings of such cross-modal
13
14 averaging process to the intra-modal interplay of proprioceptive/tactile feedbacks of a
15
16 movement and vibro-tactile effects triggered by this movement. Even though interplay between
17
18 different features is typically stronger or at least equally strong for intra-modal as compared to
19
20 cross-modal settings (e.g., Bjorkman, 1967; Zmigrod, Spapé, & Hommel, 2008) we believe that
21
22 the interplay of proprioceptive/tactile feedback of a movement and following vibro-tactile
23
24 effects is still an important empirical question, because previous studies on the role of such
25
26 effects in action planning have consistently reported a weak impact of body-related effects
27
28 (Pfister et al., 2014; Thébault et al., 2018; Wirth et al., 2016; for corresponding observations
29
30 for the processing of tactile distractors, see Wesslein, Spence, & Frings, 2014). This could
31
32 suggest that body-related effects (i.e., proprioceptive and tactile events) are less attended – or
33
34 possibly even suppressed – during action production. Whether the proposed averaging process
35
36 also takes place intra-modally thus is an open question.
37
38
39
40

41
42 To answer this question, we conducted an experiment build on the setup of Kunde et al.
43
44 (2004), but we implemented vibro-tactile rather than auditory action effects. On each trial, our
45
46 participants thus performed either a forceful or a soft keypress in response to an imperative
47
48 stimulus and their keypresses triggered either a high-intensity or a low-intensity vibration.
49
50 Following Kunde et al. (2004), we measured the peak force exerted for each response and
51
52 probed whether it would vary as a function of the following effect intensity.
53
54
55
56
57
58
59
60

2. Method

2.1. Participants

We recruited 24 participants who gave written informed consent to take part in the experiment (mean age= 23.71 years; 14 females; three left handed). All participants were naïve about aim of the experiment. This sample size allowed for a power of $1-\beta = 0.8$ for effect sizes of $d_z \geq 0.6$ for a repeated-measures design and a two-tailed test at $\alpha = 0.05$ (computed via the power.t.test function of R3.3.0); the effect size for the impact of effect intensity in Kunde et al. (2004) amounted to $d_z = \frac{\sqrt{F}}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{18.72}}{\sqrt{16}} = 1.08$.

2.2. Material

The experiment was conducted on a computer with a screen size of 15 inches (resolution: 1600 x 900). The stimuli were two white letters (X and H, Droid sans mono, 60 px character height) presented on a black background. Two custom-built keys were used (Figure 1; cf. Thébault et al., 2018). On one side of each key, a force-sensitive resistor (FSR-402 from Interlink Electronics, Santa Barbara, CA, USA) with a round sensing area of 0.5 inches in diameter allowed determining the peak force exerted on the keys. On the other side, we put a vibrating motor like those used in a Smartphone. The force-sensitive resistor and the vibrating motor were controlled by an Arduino interface (Arduino Leonardo, Somerville, MA, USA). We used OpenSesame 3.1.9 to perform the experiment (Mathôt et al., 2012).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

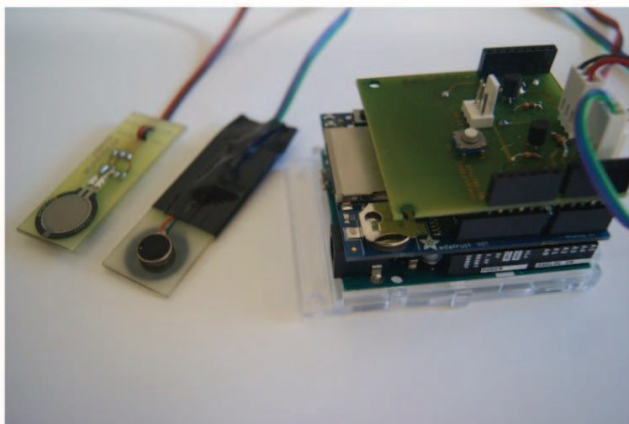


Figure 1: Custom-built keys with a force-sensitive resistor (FSR) and a vibro-motor (on the left) connected to an Arduino interface (on the right).

2.3. Procedure

Participants were seated in front of the computer in a quiet room. They held the keys with thumb and forefinger of each hand. We specified to keep the hands in their respective space (*i.e.*, right hand in the right space and vice versa). For one target letter (X), participants had to exert a forceful pressure on the key, for the other target letter (H), they exerted a soft pressure. Half of the participants used the dominant hand for forceful responses and the non-dominant hand for soft responses whereas the other half used the non-dominant hand for forceful responses and the dominant hand for soft responses. Stimuli were presented for 250 ms and participants had up to 1500 ms to respond. Each keypress triggered a vibration effect, the intensity of which could either be compatible or incompatible to the intensity of the response (see the next paragraph for details). The vibrations started 200 ms after the keypress and lasted for 250 ms. The next trial followed after 1500 ms.

Response-effect compatibility was manipulated between experimental halves (10 blocks of 16 trials each) so that half of the participants performed the compatible condition first whereas the other half performed the incompatible condition first. In the compatible condition,

1
2
3 a forceful (*vs.* soft) pressure triggered a high-intensity (*vs.* low-intensity) vibration frequency,
4
5 and the reverse was true in the incompatible condition. To avoid vibrations after errors, two
6
7 thresholds were used; if a forceful response was required, vibrations were only triggered when
8
9 the applied force exceeded 5.23 N; if a soft response was required, vibrations were already
10
11 triggered when the applied force exceeded 0.52 N (note that this procedure deviates from Kunde
12
13 et al., 2004, where the effect presentation was tied to the peak force of the individual trial). The
14
15 frequencies of high-intensity vibrations were twice as high as for low-intensity vibrations
16
17 (*values used in Arduino program were respectively 90 and 200*).
18
19
20
21
22
23

24 2.4. *Statistical Analysis*

25
26
27 Dependent variables were peak force (PF), reaction time (RT) and error rates. PFs were
28
29 read from the force-sensitive resistor and converted to Newton. The maximum value measured
30
31 by the force-sensitive resistors was 100 N. Two measures of response time were used for the
32
33 following analyses: The first index (RT1) was the time from stimulus onset until the applied
34
35 force reached the required threshold, and the second index (RT2) was the time between reaching
36
37 the threshold and peak force. For all analysis of RT, responses under 250 ms and above 1500
38
39 ms were removed from the statistical analysis; then, of the remaining RTs, and also for PF, we
40
41 removed those that deviated more than ± 2.5 standard deviations from the corresponding cell
42
43 mean, computed separately for each participant and experimental condition.
44
45
46
47

48
49 We analysed the effect of the response type (*i.e.* forceful *vs* soft) and vibration intensity
50
51 (*i.e.*, high *vs* low) by means of separate 2 x 2 repeated-measures analyses of variances
52
53 (ANOVAs) for PF, RT and error rates. Statistics were performed with Jasp (JASP Team, 2018).
54
55
56
57
58
59
60

2.5. Results

Table 1 shows descriptive statistics for PF, RT and error rates.

Table 1: Averages of Response Times (RT1 and RT2 in ms), error rates (PE, percentage of error in %) and peak of force (PF in Newtons) for all combinations of response type (soft vs. forceful) and vibration intensity of the following effect (low vs. high).

Response	RT1 [ms]		RT2 [ms]		PE [%]		PF [N]	
	Vibration Intensity		Vibration Intensity		Vibration Intensity		Vibration Intensity	
	Low	High	Low	High	Low	High	Low	High
Soft	380	410	357	350	2.87	3.69	4.35	2.43
Forceful	420	418	404	375	6.19	9.32	41.71	33.53

Peak forces. A significant main effect of vibration intensity indicated a higher peak force for low as compared to high vibration intensities, $F(1, 23) = 39.34, p < .001, \eta^2 = .63$. Not surprisingly, forceful responses came with a higher peak force than soft responses, $F(1, 23) = 60.77, p < .001, \eta^2 = .73$. An interaction emerged between response type and vibration intensity, $F(1, 23) = 9.09, p = .006, \eta^2 = .28$, due to a larger impact of vibration intensity on forceful as compares to soft responses. These results, similar to Kunde et al. (2004), highlight that participants exerted more force when expecting a low-intensity vibration than a high-intensity vibration, and this pattern was more pronounced for forceful than for soft keypresses (see Fig. 2).

2.5. Results

Table 1 shows descriptive statistics for PF, RT and error rates.

Table 1: Averages of Response Times (RT1 and RT2 in ms), error rates (PE, percentage of error in %) and peak of force (PF in Newtons) for all combinations of response type (soft vs. forceful) and vibration intensity of the following effect (low vs. high).

Response	RT1 [ms]		RT2 [ms]		PE [%]		PF [N]	
	Vibration Intensity		Vibration Intensity		Vibration Intensity		Vibration Intensity	
	Low	High	Low	High	Low	High	Low	High
Soft	380	410	357	350	2.87	3.69	4.35	2.43
Forceful	420	418	404	375	6.19	9.32	41.71	33.53

Peak forces. A significant main effect of vibration intensity indicated a higher peak force for low as compared to high vibration intensities, $F(1, 23) = 39.34, p < .001, \eta^2 = .63$. Not surprisingly, forceful responses came with a higher peak force than soft responses, $F(1, 23) = 60.77, p < .001, \eta^2 = .73$. An interaction emerged between response type and vibration intensity, $F(1, 23) = 9.09, p = .006, \eta^2 = .28$, due to a larger impact of vibration intensity on forceful as compares to soft responses. These results, similar to Kunde et al. (2004), highlight that participants exerted more force when expecting a low-intensity vibration than a high-intensity vibration, and this pattern was more pronounced for forceful than for soft keypresses (see Fig. 2).

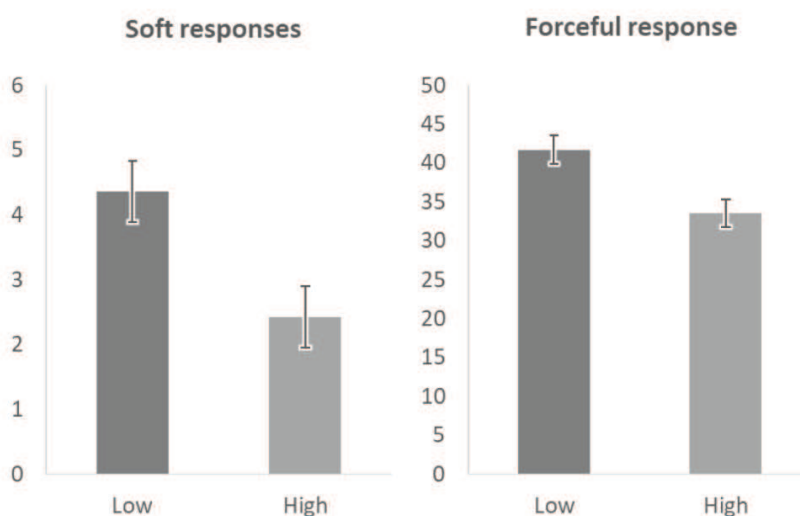


Figure 2: Peak forces (in Newton) as a function of response type (forceful vs. Soft) and vibration intensity (high vs. low). Error bars represent standard errors of paired differences for the comparison of low and high vibrations (Pfister & Janczyk, 2013).

Response times. Firstly, analysis of RT1 revealed significant main effects of response intensity, $F(1, 23) = 8.5, p = .008, \eta^2 = .27$, and vibration intensity, $F(1, 23) = 4.74, p = .040, \eta^2 = .17$. No interaction was found, $F(1,23) = 2.57, p = .122, \eta^2 = .01$. RT2 showed a similar pattern though only the main effect of response intensity was statistically significant, $F(1, 23) = 5.11, p = .034, \eta^2 = .18$. The main effect of vibration intensity, $F(1, 23) = 3.58, p = .071, \eta^2 = .14$, and the interaction, $F(1, 23) = 1.24, p = .278, \eta^2 = .05$, did not cross the conventional alpha level. We computed post-hoc analysis by quintile in each condition for RT1 (see Fig. 3). A 2 x 5 analysis of variance (ANOVA) was used to test the main effects of compatibility and quintile, and their interaction. We found a significant effect of quintile, $F(1,23) = 264.75, p < .001, \eta^2 = .92$, but no effect of compatibility and interaction. We computed the same analyse for each response exerted (*i.e.* forceful and soft responses). For forceful responses, we found, as expected an effect of bin, $F(1,23) = 221.35, p < .001, \eta^2 = .91$, but no effect of compatibility or interaction. For soft responses, we found an effect of quintile, $F(1,23) = 176.48, p < .001, \eta^2 = .89$, and a significant effect of compatibility, $F(1,23) = 15.62, p < .001, \eta^2 = .40$, and a significant effect of interaction, $F(1,23) = 3.63, p = .009, \eta^2 = .14$.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

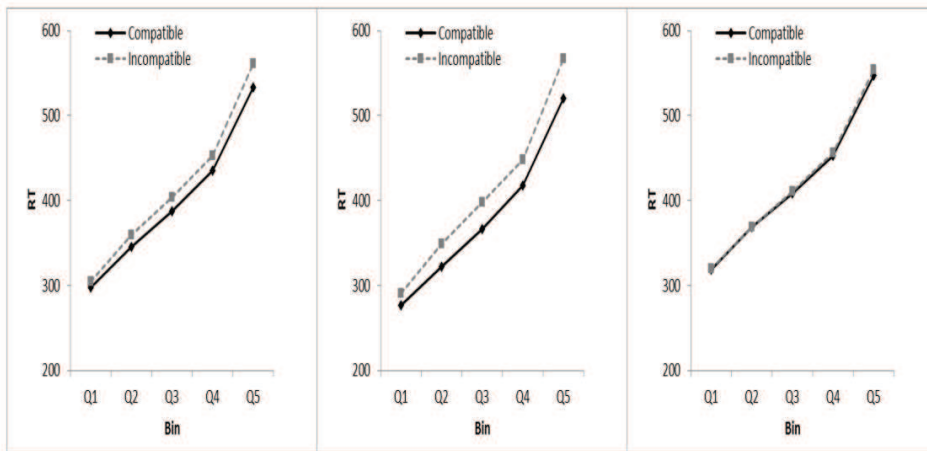


Figure 3: Response time (RT) results of the quintile analysis for all data (left panel), soft responses (middle panel) and forceful responses (right panel) in compatible and incompatible conditions (measured in ms). Compatible trials include low-intensity vibrations for soft responses and high-intensity vibrations for forceful responses whereas incompatible trials include the remaining combinations.

In addition, we analysed the temporal dynamics of peak force for each responses (*i.e.* forceful and soft responses) across the experiment (see Fig. 3). The trials of each condition were split in four blocks (1 to 20, 21 to 40 etc.). Analyses were computed by 2 x 4 ANOVA to test for the effects of compatibility and block (1 to 4). This analysis found significant effects of compatibility, quintile and a significant interaction for both responses ($ps < 0.01$), while simple-effects analyses indicated a robust trend for each block in both responses ($ps < .001$) (cf. Fig. 3).

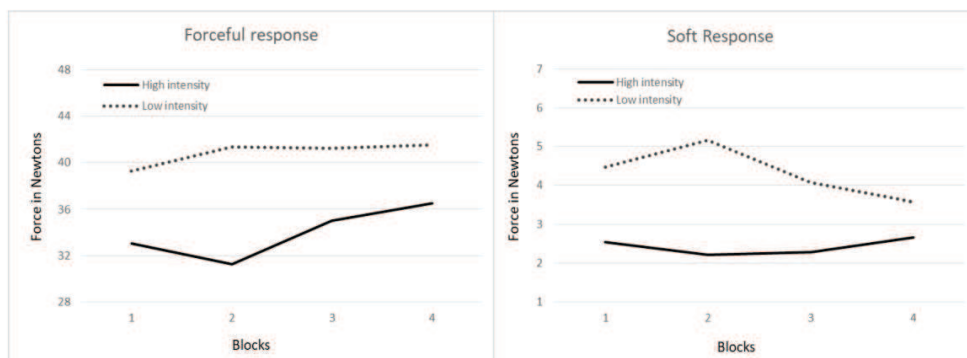


Figure 4: Mean peak forces (in Newton) for forceful responses (left panel) and soft responses (right panel) according to four blocks and high- and low-intensity effects. The first block correspond to the first twenty responses, the second block the next twenty, etc. The peak forces were always weaker for high intensity of tactile vibrations than for low intensity of tactile vibrations though the difference decreases across blocks.

1
2
3 *Error rates.* Mean error rate was 5.52%. There were significant main effects of response
4
5 intensity, $F(1, 23) = 7.94, p = .010, \eta^2 = .257$, and vibration intensity, $F(1, 23) = 4.76, p = .039$,
6
7 $\eta^2 = .17$, but no interaction, $F(1, 23) = 2.5, p = .127, \eta^2 = .09$.
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Discussion

The present study investigated the anticipation of body-related effects and its impact on how actions are executed. Our study focused on the impact of vibro-tactile effects on the force exerted during action production, providing additional evidence for the involvement of body-related effects in action control (see Pfister, 2019; Pfister et al., 2014; Thébault et al., 2018; Wirth et al., 2015). We show evidence for an averaging process regarding vibro-tactile effects and proprioceptive and tactile feedback triggered during the movement. We consider this result closely related to the finding of Kunde et al. (2004) regarding environment-related effects.

We further observed a systematic temporal evolution of the impact of the vibration effects on the force exerted by the participants. Even though evidence for the supposed averaging process was present throughout the experiment – that is, peak forces were consistently lower for high vibro-tactile intensity than for low vibro-tactile intensity –, the size of this impact seemed to diminish over the course of the experiment. This discrepancy might be reconciled when assuming that different effects of a particular action are attended depending on the current context and the specific task at hand. Arguably, the production of different force levels is a more unusual task than the button-pressing task of Lestage et al. (2018) and the use of power versus precision grips in Camus et al. (2018) so that participants might have tended more strongly to attend this feature of the action rather than the ensuing effects.

A further critical aspect of the present design is that our manipulation of body-related action effects drew on *exafferent* signals generated by a vibro-tactile motor which interfaced with *reafferent* signals (proprioceptive feedback from the movement proper). These two body-related effects have a specific functioning according to proprioceptive and touch senses. Indeed, to activate mechanoreceptors of both senses need to be coupled with a motor event. For instance, texture is better perceived by an active touch (Gibson, 1962) and proprioceptive inputs reinforce this perception by providing texture constancy (Yoshioka, Craig, Beck, & Hsiao,

1
2
3 2011). However, mechanoreceptors of the skin (*i.e.* tactile receptors) and mechanoreceptors of
4
5 the joints and muscles (*i.e.*, proprioceptive receptor) are closely entangled; for instance, skin
6
7 receptors discharge during movement, and their stimulations leads to a simulation of movement
8
9 (Collins Refshauge, Todd & Gandevia, 2005). This relatedness of proprioception (Gapenne,
10
11 2014) and touch can explained how and why these couplings have different effects in action
12
13 selection and action production taking into account the source of signals for agent. In one side,
14
15 the agent is the actor of movement and he perceives sensations from her/his own body; in other
16
17 side the agent perceives sensations from environment on her/his body. According to a
18
19 phenomenology perspective, we experience the world with our body while experiencing our
20
21 own body sensations (Merleau-Ponty, 1976; Thompson, 2005). Finally, the double experience
22
23 of effects lead to define what it comes from subject and from object (Gapenne, 2014, Legrand,
24
25 2007) and helps to put the concepts of proximal and distal into perspective.
26
27
28
29

30
31 Somewhat unexpectedly, our study did not yield a robust influence of response-effect
32
33 compatibility on RTs while such an impact was present in the study of Kunde et al. (2004). On
34
35 the one hand, this difference might result from the generally limited impact of (vibro-)tactile
36
37 effects as compared to salient auditory or visual effects in response-effect compatibility designs
38
39 (Pfister et al., 2014; Thébault et al., 2018; Wirth et al., 2015; see also Kunde, 2001, 2003). This
40
41 explanation seems unlikely to be sufficient though because we observed a markedly different
42
43 pattern for soft and forceful responses, with a detectable influence of response-effect
44
45 compatibility for soft responses which increase across the RT distribution (see also Pfister et
46
47 al., 2014; Thébault et al., 2018) whereas there was no sign for forceful responses. Note however
48
49 that our thresholds for determining the RT differed between the two responses so that the force
50
51 needed to surpass a much larger threshold for forceful than for soft responses. This technical
52
53 aspect might have contributed to the consistent absence of RT effects for forceful responses and
54
55 should be taken into account when designing further studies in the present experimental design.
56
57
58
59
60

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

It thus seems safe to assume that the individual features that form an action representation mutually interact, and that they are compiled to feature compounds that result from a (weighted) averaging process along any dimension.

To conclude, our study provides a demonstration for the impact of a coupling between proprioceptive and tactile effect and the role of this process for action execution. The study of body-related effects according to ideomotor action still offers many avenues, however, especially regarding the interplay of such effects with other modalities (see Lestage et al., 2018).

Bibliography

- Aschersleben, G. (2002). Temporal control of movements in sensorimotor synchronization. *Brain and cognition*, 48(1), 66-79.
- Aschersleben, G., & Prinz, W. (1995). Synchronizing actions with events: The role of sensory information. *Perception & Psychophysics*, 57(3), 305-317.
- Aschersleben, G., & Prinz, W. (1997). Delayed auditory feedback in synchronization. *Journal of motor behavior*, 29(1), 35-46.
- Bain, A. (1855). *The senses and the intellect*. London, England: John W Parker & Son, West Strand.
- Billon, M., Bard, C., Fleury, M., Blouin, J., & Teasdale, N. (1996). Simultaneity of two effectors in synchronization with a periodic external signal. *Human Movement Science*, 15(1), 25-38.
- Björkman, M. (1967). Relations between intra-modal and cross-modal matching. *Scandinavian Journal of Psychology*, 8(1), 65-76.
- Camus, T., Hommel, B., Brunel, L., & Brouillet, T. (2018). From anticipation to integration: The role of integrated action-effects in building sensorimotor contingencies. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25, 1059–1065.
- Collins, D. F., Refshauge, K. M., Todd, G., & Gandevia, S. C. (2005). Cutaneous receptors contribute to kinesthesia at the index finger, elbow and knee. *Journal of Neurophysiology*, 94: 1699–1706.
- Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A (2007) G* Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavioural Research Methods*, 39:175–191
- Fraisse, P. (1980) *Les synchronisations sensori-motrices aux rythmes* [The sensorimotor synchronization of rhythms]. In: Anticipation et comportement, ed. J. Requin. Centre National.
- Gapenne, O. (2014). The co-constitution of the self and the world: action and proprioceptive coupling. *Frontiers in psychology*, 5, 594.
- Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. *Psychological review*, 69(6), 477.
- Harleß, E. (1861). *Der Apparat des Willens* [The apparatus of will]. Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik, 38, 50–73.
- Herbart, J. F. (1825). *Psychologie als Wissenschaft, neu gegründet auf Erfahrung, Metaphysik, und Mathematik* [Psychology as a science, newly founded on experience, metaphysics and mathematics] (Vol. 2). Königsberg, Germany: Unzer.
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, 73, 512–526.
- Horváth, J., Bíró, B., & Neszmeilyi, B. (2018). Action-effect related motor adaptation in interactions with everyday devices. *Scientific reports*, 8.
- James, W. (1890). *The principles of psychology* (Vol. 2). NY, US: Henry Holt and Company.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 387.

- 1
2
3 Kunde, W. (2003). Temporal response-effect compatibility. *Psychological Research*, 67, 153–
4 159.
5
6 Kunde, W. (2006). *Antezedente Effektrepräsentationen in der Verhaltenssteuerung* [Antecedent
7 effect codes in action control]. *Psychologische Rundschau*, 57, 34–42.
8
9 Kunde, W., Koch, I., & Hoffmann, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection,
10 initiation, and execution of actions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section*
11 *A*, 57(1), 87-106.
12
13 Legrand, D. (2007). Naturalizing the acting self: Subjective vs. anonymous agency.
14 *Philosophical Psychology*, 20(4), 457-478.
15
16 Lestage, H., Camus, T., Dru, V., & Brouillet, T. (2018). How movement direction shapes the
17 spatial representation of its effects: About the consequence of the ideomotor bidirectional
18 association. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1, 15.
19
20 Lotze, R. H. (1852). *Medizinische Psychologie oder Physiologie der Seele* [Medical psychology
21 or physiology of the soul]. Leipzig, Germany: Weidmann'sche Buchhandlung.
22
23 Paillard, J. (1949) Quelques données psychophysiologiques au déclenchement de la commande
24 motrice [Some psychophysiological data relating to the triggering of motor commands].
25 *L'Année Psychologique*, 48:28–47.
26
27 Pfister, R., & Janczyk, M. (2013). Confidence intervals for two sample means: Calculation,
28 interpretation, and a few simple rules. *Advances in Cognitive Psychology*, 9, 74–80.
29
30 Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: An open-source, graphical
31 experiment builder for the social sciences. *Behavior research methods*, 44(2), 314-324.
32
33 Merleau-Ponty, M. (1976). *Phénoménologie de la perception*. Paris, Éditions Gallimard.
34
35 Neszmeélyi, B., & Horváth, J. (2017). Consequences matter: Self-induced tones are used as
36 feedback to optimize tone-eliciting actions. *Psychophysiology*, 54(6), 904-915.
37
38 Pfister, R. (2019). Effect-based action control with body-related effects: Implications for
39 empirical approaches to ideomotor action control. *Psychological review*, 126(1), 153.
40
41 Pfister, R., & Janczyk, M. (2013). Confidence intervals for two sample means: Calculation,
42 interpretation, and a few simple rules. *Advances in Cognitive Psychology*, 9(2), 74.
43
44 Pfister, R., Janczyk, M., Gressmann, M., Fournier, L. R., & Kunde, W. (2014). Good
45 vibrations? Vibrotactile self-stimulation reveals anticipation of body-related action effects in
46 motor control. *Experimental Brain Research*, 232(3), 847-854.
47
48 Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature.
49 *Psychonomic bulletin & review*, 12(6), 969-992.
50
51 Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor
52 theory. *Psychological bulletin*, 136(6), 943.
53
54 Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological research*,
55 68(2-3), 176-188.
56
57 Thébault, G., Michalland, A. H., Derozier, V., Chabrier, S., & Brouillet, D. (2018). When the
58 vibrations allow for anticipating the force to be produced: An extend to Pfister et al. (2014).
59 *Experimental Brain Research*, 236, 1219–1223.
60

1
2
3 Thompson, E. (2005). Sensorimotor subjectivity and the enactive approach to experience.
4 *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4(4), 407–427.

5
6 Wesslein, A. K., Spence, C., & Frings, C. (2014). When vision influences the invisible
7 distractor: Tactile response compatibility effects require vision. *Journal of Experimental*
8 *Psychology: Human Perception and Performance*, 40, 763–774.

9
10 Wirth, R., Pfister, R., Brandes, J., & Kunde, W. (2016). Stroking me softly: Body-related effects
11 in effect-based action control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(6), 1755–1770.

12
13 Yoshioka, T., Craig, J. C., Beck, G. C., and Hsiao, S. S. (2011). Yoshioka, T., Craig, J. C.,
14 Beck, G. C., & Hsiao, S. S. (2011). Perceptual constancy of texture roughness in the tactile
15 system. *Journal of Neuroscience*, 31(48), 17603–17611. *Journal of Neuroscience*, 31, 17603–
16 17611.

17
18 Zmigrod, S., Spapé, M., & Hommel, B. (2009). Intermodal event files: Integrating features
19 across vision, audition, tacton, and action. *Psychological Research PRPF*, 73(5), 674–684.
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

3.2. Synthèse

Notre expérience a mis en évidence les mêmes effets lors de la production de l'action que Kunde et al. (2004) avec un effet (vibro)-tactile, c'est-à-dire une réduction de la force d'appui lors d'un effet (vibro)-tactile fort.

Comme nous le mentionnons dans l'article, l'hypothèse de Paillard-Fraisse sur la vitesse de diffusion du signal sensoriel tient lieu d'explication au processus de moyennage temporel (Aschersleben & Prinz, 1997). Lors de tâches de synchronisation, la vitesse de conduction du signal cutané produit lors d'un appui sur une table (le « tap ») est plus lente que celle procurée par le signal auditif, expliquant le décalage temporel. Cette idée pourrait également fonctionner pour Kunde et al. (2004) puisque la conduction du signal auditif est plus rapide que celle délivrée par la proprioception, toutefois l'hypothèse ne permet pas d'expliquer pourquoi la réponse à un son faible diffère d'un son fort. Concernant notre expérience cela est encore plus complexe car les mêmes modalités sensorielles sont en jeu. Au cours de la vibration, qui conditionne la force d'appui, les mêmes corpuscules sont activés que lors de l'appui, notamment lors de l'appui faible, mêmes si leur nombre pourraient varier en fonction de chacune des vibrations et des appuis. En outre les axones des fibres du système proprioceptif ont un diamètre plus élevé et le diamètre est positivement corrélé à la vitesse de conduction. Si bien, que nous devrions obtenir un effet inverse à celui observé par Aschersleben et Prinz (1997).

Un effet sur la production de l'action suite à un effet relié au corps a également été observé par Wirth et al. (2016). Le mouvement réalisé était plus rapide lorsque la condition était congruente indépendamment de la dimension spatiale de l'effet.

Ce qui est remarquable dans toutes les expériences mettant en jeu une « réponse motrice » est qu'elles sont *de facto* associées à un retour kinesthésique et tactile en effectuant un mouvement ou en touchant un dispositif de réponse. Autrement dit, nous pourrions envisager que la production de l'action influence elle-même son action.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre prochaine expérience.

CHAPITRE 4 – Anticiper la fluence motrice

4.1. Introduction

Les précédents travaux s'appuient sur un effet tactile qui suit la réponse. Nous avons vu que cet effet tactile peut être considéré comme provenant de l'environnement car, en termes d'expérience corporelle, il peut être qualifié d'exafférence.

L'objectif du prochain article est d'explorer l'anticipation d'une réafférence proprioceptive déclenchée par le mouvement au cours de l'action.

Faisant cela, nous développons deux notions essentielles de la théorie idéomotrice telle qu'elle était décrite par James (1890) : les effets liés au mouvement et le caractère immédiat de la sensation perçue au cours de l'action. Ces deux points sont indissociables dans le mouvement. Il active les propriocepteurs et mécanorécepteurs au moment même de son exécution.

Afin d'opérationnaliser la sensation perçue au cours du mouvement, nous avons utilisé le terme de fluence motrice (Casasanto, 2009 ; Brouillet et al., 2015). Elle se définit par la perception de facilité avec laquelle se réalise un mouvement.

Notre expérience met en jeu deux conditions. L'une où le mouvement sera exécuté d'une manière fluente, supposant une perception de facilité à exécuter un mouvement plus aisé, l'autre où le mouvement sera réalisé d'une manière non fluente. Suivant la théorie idéomotrice nous nous attendions à ce que les participants anticipent la perception de facilité avec laquelle est réalisée le mouvement.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Running head: anticipating fluency

Motor fluency occurring during a movement influences the triggering of future movement

Guillaume Thébault and Denis Brouillet

University Paul Valéry Montpellier 3, University Montpellier, EPSYLON EA 4556, F34000,
Montpellier, France

E-mail addresses

Guillaume Thébault, guillaume.thebault@univ-montp3.fr

Denis Brouillet, denis.brouillet@univ-montp3.fr

Corresponding author

Guillaume Thébault

Université Paul Valéry Montpellier III, Laboratory Epsilon EA4556

34090 Montpellier, France.

+33411757065

guillaume.thebault@univ-montp3.fr

Word count: 3508

References: 42

Abstract

Motor fluency is the subjective perception of ease with which we carry out movements. Recent studies highlighted that motor fluency affects cognition. In the present study, we explored to what extent motor fluency is anticipated during action-effects associations and influences perceptive judgement. In our experiment, participants carried out a fluent movement, pressing a key on the same side as the hand, or a non-fluent movement, pressing a key on the opposite side of the hand. We measured the response time to initiate and to execute a movement performed to give a perceptive judgement. The results indicate that the feeling of ease with which a movement is realized influences the triggering of future movements, and more important its initiation, reflecting an anticipation of action. We discuss these results in the light of previous works on interoceptive effects in movements.

Keywords: Motor fluency, ideomotor action, anticipation, proprioception, interoception.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1. Introduction

Ideomotor theory assumes that anticipating the sensory consequences of an action is the key mechanism of our volitional act in daily life, not only for selecting and initiating between potential actions but also for producing these actions (see for review, Pfister, 2019; Shin, Proctor, & Capaldi, 2010; Stock & Stock, 2004). The pioneers of the ideomotor theory, emphasized the importance of the sensations produced by the movement itself (*e.g.* Lotze, 1852; James 1890). For instance, James (1890) calling "resident impressions" the impressions provided by tactile and muscular senses, specifies that movements are anticipated by these resident impressions preceding him.

So, following ideomotor theory, the perception is influenced by the anticipation of the phenomenological experience associated with the movement; consequently, the movement is selected according to the effect of the movement (*i.e.*, the phenomenological experience origins the response) and not only according to what the stimulus evokes (*i.e.*, the phenomenological experience depends on the response). According to this view, the aim of this work was to know how the subjective phenomenological experience associates with movement performed modifies the performances of subsequent movement.

This question is particularly important because, most of the time, to investigate cognitive processes with behavioural tasks, participants realize a movement to give their response, for instance, pressing a specific key on a keyboard with their dominant hand. In this context, the key can be on the right or on the left, and consequently, there is, or is not, a space compatibility between their hand and the key. Furthermore, Fisk and Goodale (1985) showed that this compatibility affects motor performance: the velocity of movements of the upper limbs is faster when participants are pointing to light signals presented in their ipsilateral space rather than contralateral space. This phenomenon, called motor fluency, can be defined as the

1
2
3 subjective experience of ease with which people perform a movement (Casasanto, 2009;
4
5 Topolinski & Strack, 2009).
6

7
8 Since this original study, several works highlighted that motor fluency influences
9
10 cognitive processes: emotion (Beilock & Holt, 2007; Brouillet, Ferrier, Grosselin, & Brouillet,
11
12 2011; Cannon, Hayes, & Tipper, 2010; de la Vega, Dudschig, De Filippis, Lachmair, & Kaup,
13
14 2013; Jasmin & Casasanto, 2012; Milhau, Brouillet, & Brouillet, 2013, 2015), memory
15
16 (Brouillet, Milhau, Brouillet & Servajean, 2016; Susser & Mulligan, 2015; Topolinski, 2012;
17
18 Topolinski & Strack, 2009), perception (Bach & Tipper, 2007; Regenber, Häfner, & Semin,
19
20 2012), decision making (Reber, Winkielman, & Schwarz, 1998; Scharwz, 2004) and sense of
21
22 agency (Chambon, Sidarus, & Haggard, 2014; Sidarus, Chambon, & Haggard, 2013).
23
24
25

26
27 Many works over the last two decades have shown that the environment-related effects
28
29 of action influence the responses of participants (Badets, Pesenti, & Olivier, 2010; Hommel,
30
31 Müsseler, Aschersleben, Prinz, 2001; Kunde, 2001; Kunde, Koch, & Hoffmann, 2004; Pfister,
32
33 Kiesel, & Melcher, 2010). More recently, some studies found that this anticipation also occurs
34
35 after body-related effects (Pfister, Janczyk, Gressmann, Fournier, & Kunde, 2014; Thébault,
36
37 Michalland, Derozier, Chabrier, & Brouillet, 2018; Wirth, Pfister, Brandes, & Kunde, 2016).
38
39 For instance, using a Response-Effect Compatibility (REC) paradigm (Kunde, 2001), Thébault
40
41 et al. (2018), found that participants were faster to press softly on a key after when the response
42
43 is followed by a low (vibro-)tactile effect, than when the pressure was followed by a high (vibro-
44
45)tactile effect. Furthermore, Pfister et al. (2014) had highlighted the same patterns of response
46
47 according to space dimension: the responses in the right space are faster when a (vibro-)tactile
48
49 effects is triggered on the right hand than on the left hand. Nevertheless, to our knowledge, no
50
51 work has been interested in the motor fluency effect on the anticipated selection of the response.
52
53
54
55

56
57 In line with these experimental data, we can make the assumption that the mere
58
59 sensations perceived during a movement (*i.e.* motor fluency) allow the anticipation of an action.
60

1
2
3 So, to experiment this assumption, we hypothesized that the feeling of ease (*i.e.* motor fluency)
4
5 would act in a similar way to other body-related effects studied in ideomotor works. Thus, we
6
7 expected that after a fluent movement, the triggering of future movements should be faster than
8
9 after a non-fluent movement. To test this hypothesis, we propose an experiment involving
10
11 motor fluency based on the procedure of Kunde (2001).
12
13
14
15
16
17

18 **2. Methods**

19 *2.1. Participants*

20
21
22 Thirty-two participants took part in the experiment, they were not informed about the
23
24 experiment's purpose. They gave their free consent after some general information about this
25
26 study and ethical rules. This sample size was calculated in R 3.5.2 using the function of
27
28 `power.t.test` with a power of $1-\beta = 0.8$ for effect sizes of $d_z \geq 0.5$ for a repeated-measures design
29
30 and a two-tailed test at $\alpha = 0.05$; the effect size for the impact of the intensity of body-related
31
32 effect were $d_z = \frac{\sqrt{F}}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{4.74}}{\sqrt{32}} = 0.38$ and $\frac{\sqrt{F}}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{7.18}}{\sqrt{32}} = 0.47$ in Thébault et al. (2018) and Pfister
33
34 et al. (2014), respectively.
35
36
37
38
39
40
41
42

43 *2.2. Materials*

44
45 We used four response keys. As in classical experiments, two of these were computer
46
47 keys. Two others were located on a support built for the experiment in front of the participants,
48
49 as an extension to the computer. These made it possible to measure the time to initiate
50
51 movement while the other two allowed to measure the time to execute the movement,
52
53 respectively called "Departure keys" and "Arrival keys". The two departure keys were created
54
55 with Force Sensitive Resistors (FSR, FSR-402 from Interlink Electronics, Santa Barbara, CA,
56
57 USA) with a round sensing area of 1.27 cm in diameter. These keys were controlled by an
58
59 Arduino interface (Arduino Leonardo, Somerville, MA, USA) that creates keyboard responses
60

1
2
3 from FSR. FSR are sensitive to pressure. We realized a program that allowed to trigger a
4 response key (*i.e.* a virtual pressure on a key) while the pressure was absent. The computer
5 screen was 17 inches with a resolution of 1600 x 900.
6
7
8

9 10 11 12 *2.3. Stimuli and procedure* 13

14 The experiment was conducted in an isolated room. The participants were seated in front
15 of a computer with their index finger placed on the departure keys. We instructed them to exert
16 a weak pressure on the FSR whenever the index fingers were positioned on it. FSR are very
17 sensitive and the simple act of placing index fingers is enough to be measured by the Arduino
18 interface.
19
20
21
22
23
24

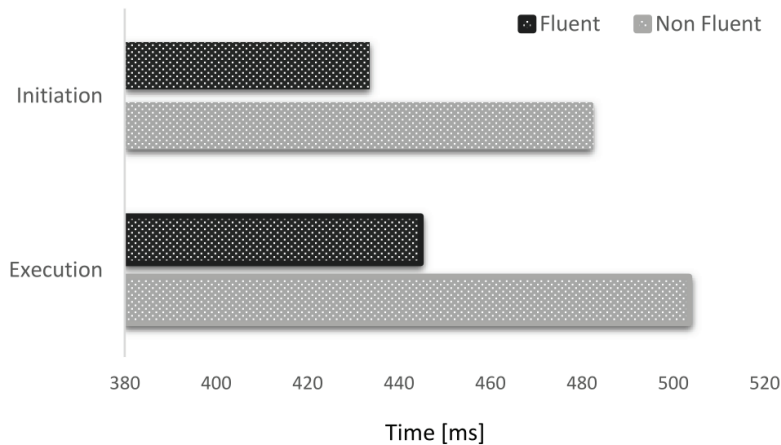
25 As in the experiments of Pfister et al. (2014) and Thébault et al. (2018), two stimuli (H
26 and X, Droid sans mono, 60pt) were presented for 250ms in the centre of the screen. The letters
27 were white on a black background. Participants were asked to press the arrival keys, as quickly
28 as possible while trying to minimize mistakes, according to the stimuli (e.g., right key for X
29 and left key for H). In a fluent condition participants used their right (or left) index to press the
30 right (or left) arrival key; in a non-fluent condition, participants pressed the right (or left) arrival
31 key with their left (or right) index. Participants had 2000ms to respond from the presentation of
32 the stimuli. Then, the next trial started after an interval of 1000ms. Participants completed ten
33 blocks of 16 trials in the fluent and then, in the non-fluent conditions. The order of presentation
34 of these experimental conditions was counterbalanced.
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

51 **3. Results** 52

53 We analysed the Response Times (RT) to initiate the movement (“RT initiation”)
54 corresponding to the time between the presentation of the stimulus and the absence of pressure
55 on the FSR, and the RT to execute the movement, corresponding to the time when participants
56
57
58
59
60

1
2
3 initiate movement until the pressure on the arrival key (“RT execution”). These RT were
4
5 analysed by two procedures: with paired sample student *t*-test to test the hypothesis of a
6
7 difference between the fluent and non-fluent conditions of “RT initiation” and then “RT
8
9 execution”; a 2 x 5 repeated-measures ANOVA for RT1 then for RT2 to test the effect of
10
11 fluency (fluent vs non fluent) by quintile distributions as usually explored in ideomotor studies
12
13 (Kunde, 2001; Pfister, Janczyk, Gressmann, Fournier, & Kunde, 2014; Pfister & Janczyk, 2013)
14
15 and other studies (e.g. Rubichi, Nicoletti, Iani, & Umiltà, 1997).
16
17

18
19 Incorrect responses were excluded from the analyses (13.2 %). For the remaining
20
21 responses, RT at 2.5 SD above and below the mean for each participant were removed from the
22
23 analysis (2.6 %). The analysis of paired samples *t*-test for “RT initiation” revealed that
24
25 participants were faster to initiate a movement in the fluent condition than in the non-fluent
26
27 condition: $t(31) = -6.29$, $p < .001$, $d = -1.11$ (see Fig. 1, Panel at top). In the case of “RT
28
29 execution”, the participants were faster to execute movement in the fluent condition than in the
30
31 non-fluent condition, $t(31) = -10.29$, $p < .001$, $d = -1.82$ (see Fig. 1, Panel at bottom).
32
33
34
35
36



37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Figure 1: Mean of Response Times (RT) in ms to initiate movement in fluent and non-fluent condition (Panel at the top). Mean of RT in ms to execute movement in fluent and non-fluent condition (Panel at the bottom).

The 2 x 5 repeated-measures ANOVA showed a main effect of distribution quintile for “RT initiation”, $F(4, 124) = 313.49, p < .001, \eta^2_p = 0.91$, and for “RT execution”, $F(4, 124) = 307.354, p < .001, \eta^2_p = 0.91$. The main effect of fluency was also significant for “RT initiation”, $F(1, 31) = 38.124, p < .001, \eta^2_p = 0.55$ (see Fig. 2, Panel A), and for “RT execution”, $F(1, 31) = 104.07, p < .001, \eta^2_p = 0.77$ (see Fig. 2, Panel B). The analysis revealed a significant interaction for “RT initiation”, $F(4, 124) = 15.60, p < .001, \eta^2_p = 0.34$, and for “RT execution”, $F(4, 124) = 4.93, p = .001, \eta^2_p = 0.14$. Analysis of interaction for “RT initiation” found a compatibility effect for each individual quintile, $t_s > -2.422, p_s < .02$, with the largest effect of $d = -0.43$ (vs $d_s < -0.46$ for the others) resulting for the fifth distribution quintile. Concerning “RT execution”, analysis of interaction also found an effect for each individual quintile, $t_s > -5.574, p_s < .001, d_s < -0.99$.

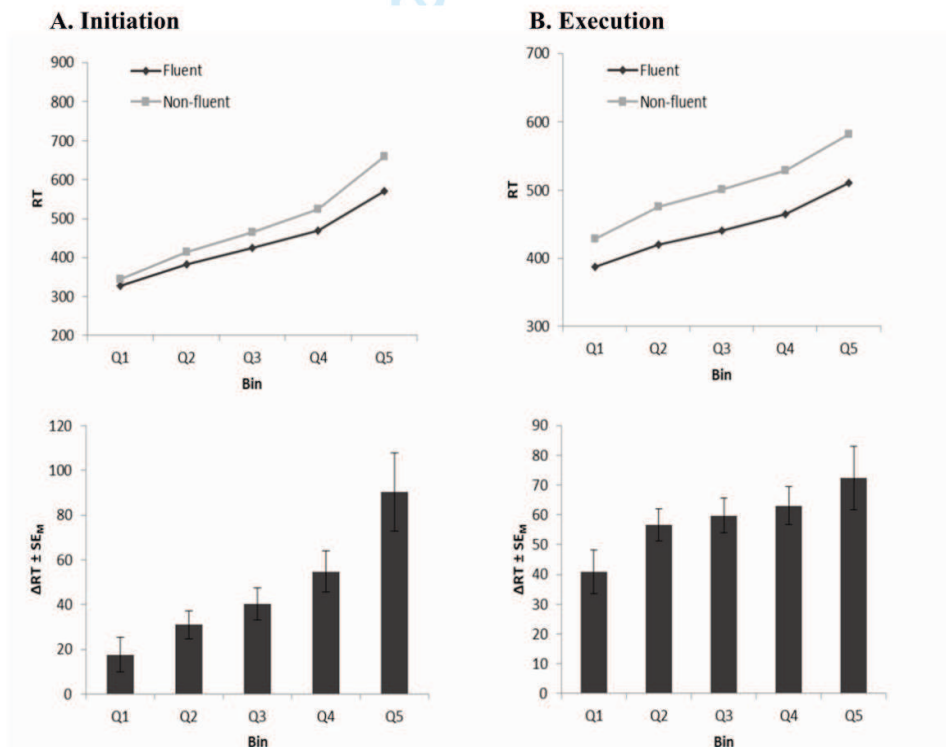


Figure 2: (A) Mean of Response Times (RT) distribution quintiles (Bin; Q1-Q5) in ms to initiate movement in fluent and non-fluent conditions. (B) Mean of RT distribution quintiles (Bin; Q1-Q5) in ms to execute movement in fluent and non-fluent conditions. Bars at the bottom correspond to the variations of RT for each quintile independently of compatibility (with \pm Standard Error of the Mean, SE_M , cf. Pfister & Janczyk, 2013).

4. Discussion

In this study we hypothesized that the motor fluency occurring during a movement to give a response would be anticipated in future movements according to the ideomotor theory (James, 1890). We asked the participants to perform two movements: one fluent, where the hand presses a key in the ipsilateral space; another non-fluent, where the hand presses a key in the contralateral space. Our results showed not only that fluent movements were faster than non-fluent movements, but mostly that the initiation of these movements was faster in the fluent condition than in the non-fluent condition. These results seem to indicate that the feeling of ease with which a movement is realized is anticipated in a motor behavioural task.

First of all, we can interpret the results of movements (i.e. execution of movement) considering them as a complex cognitive organization (e.g. Wolpert & Ghahramani, 2000) within which lies motor fluency (Casasanto, 2009). Our study shows that carrying out a movement in the ipsilateral space was faster than in the contralateral space. Nevertheless, and even if these movements provide feelings of ease, as pointed out by Fisk and Goodale (1985) to explain their results, we cannot exclude that these findings are not simply due to the kinematics of motor systems or neural systems. Indeed, the difference between fluent and non-fluent conditions could very well be due to the biomechanical constraints in the fluent condition and in the non-fluent condition because different muscles, and their kinematics, are involved.

Next, it had been shown that body-related effects, including proprioceptive and tactile effects, following an action in the line of ideomotor theory influenced future responses (Pfister et al., 2014; Thébault et al., 2018; Wirth et al., 2016). Our results reproduced the same pattern of results as in these studies. Indeed, RT to trigger a movement (i.e. “RT initiation”) was faster in the fluent condition than in the non-fluent condition. Furthermore, distribution analysis revealed an increasing effect with increasing RT to start movement as was the case in previous

1
2
3 studies (Kunde et al., 2001; Kunde et al., 2004; Pfister et al., 2014). This is illustrative of an
4
5 anticipation of an action's effects (Kunde, 2001).
6

7
8 In any case, our study offers perspective about the anticipation of movement. More
9
10 precisely, a proprioceptive effect that occurs at the same time as a response in a Response-
11
12 Effect compatibility paradigm would amount to studying what James called "*resident effects of*
13
14 *movement*" (1890, p.488). Indeed, in contrast with previous works using the Response-Effect
15
16 compatibility paradigm, our procedure has no predefined time separating Response and Effect
17
18 (e.g. 250 ms). The time between response and effect is defined whatever the sensorial origin of
19
20 effect. Yet, as James (1890) suggested, kinaesthetic impressions, immediately perceived inside
21
22 the body via movement, would differently influence the behaviour that occurs after movements
23
24 than after auditory and visual sensations. In our experiment, participants must move their arm
25
26 to reach the "Arrival key", press on the key, and then put their finger back on the "Departure
27
28 key". In this condition it is difficult to measure when the effect occurs. On the one hand, our
29
30 results can be attributed to proprioceptive sensations (resident effects) that occur during the
31
32 movement; on the other hand, we can suppose that the feeling of ease to realize a movement is
33
34 perceived after the movement, thus the effects that occur in our experiment are similar to
35
36 auditory and visual effects.
37
38
39
40
41

42 In addition, it is also crucial to consider the role of proprioception provided by
43
44 mechanoreceptive signals during skeletomotor activity and more largely to interoception.
45
46 Interoception is defined as a phenomenological experience of all the perceptions of the whole
47
48 body's state (Craig, 2002, 2003; for a review read, Ceunen, Vlaeyen, & Van Diest, 2016).
49
50 Recent works established that interoception influences knowledge. For instance, tactile
51
52 sensations perceived during object manipulations can lead to a social judgement: participants
53
54 judged an employer to be stricter when they were touching a hard block rather than a soft
55
56 blanket (Ackerman, Nocera, Bargh, & 2010). In the same vein, Häfner (2013) showed that the
57
58
59
60

1
2
3 sensitivity of interoception or body-awareness modulated these same judgements. Indeed,
4
5 participants sitting on a soft or hard chair were asked to judge an impression about an employer,
6
7 only participants with higher interoceptive skills were found to be influenced by the sensitive
8
9 condition of the chair. So, understanding interoception as a cognitive process in the view of the
10
11 embodied cognition approach (Herbert & Pollatos, 2012), our work seems to provide evidence
12
13 that proprioception, occurs in the subjective experience of ease to realize a movement, and so
14
15 in interoception framework (see also Gapenne, 2014).
16
17

18
19 In conclusion, our study found that sensations occurring during movement (i.e., motor
20
21 fluency) influenced the triggering of future movement. This outcome, in line with the ideomotor
22
23 theory (James, 1890), highlights the role of interoception and the subjective feeling that depends
24
25 upon cognitive processes.
26
27

28 29 30 31 32 **Open Practices Statement**

33
34 The data and study materials of the experiment are available in Laboratory Epsilon - University
35
36 of Montpellier and demanding to the authors of the article.
37
38 <https://epsilon.www.univ-montp3.fr/>
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

References

- 1
2
3
4
5 Ackerman, J., Nocera, C., & Bargh, J. A. (2010). Incidental haptic sensations influence social judgments
6 and decisions. *Science*, 328, 1712–1715. Doi: 10.1126/science.1189993
7
8
9 Bach, P. & Tipper, S. P. (2007). Implicit action encoding influences personal-trait judgements.
10 *Cognition*, 102: 151–178. Doi: 10.1016/j.cognition.2005.11.003
11
12 Badets, A., Pesenti, M., & Olivier, E. (2010). Response-effect compatibility of finger-numeral
13 configurations in arithmetical context. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(1), 16–22.
14 Doi: 10.1080/17470210903134385
15
16 Beilock, S. L., & Holt, L. E. (2007). Embodied preference judgments: Can likeability be driven by the
17 motor system? *Psychological Science*, 18(1), 51–57. Doi: 10.1111/j.1467-9280.2007.01848.x
18
19 Brouillet, T., Ferrier, L. P., Grosselin, A., & Brouillet, D. (2011). Action compatibility effects are
20 hedonically marked and have incidental consequences on affective judgment. *Emotion*, 11, 1202–1205.
21 Doi: 10.1037/a0024742
22
23 Brouillet, D., Milhau, A., Brouillet, T. & Servajean P. (2016). Effect of an unrelated fluent action on
24 word recognition: A case of motor discrepancy. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3, 894–900. Doi:
25 10.3758/s13423-016-1160-0
26
27 Cannon, P. R., Hayes, A. E., & Tipper, S. P. (2010). Sensorimotor fluency influences affect: Evidence
28 from electromyography. *Cognition & Emotion*, 24(4), 681–691. Doi: 10.1080/02699930902927698
29
30 Casasanto, D. (2009). Embodiment of abstract concepts: good and bad in right-and left-handers. *Journal*
31 *of Experimental Psychology: General*, 138(3), 351. Doi: 10.1037/a0015854
32
33 Ceunen, E., Vlaeyen, J. W., & Van Diest, I. (2016). On the origin of interoception. *Frontiers in*
34 *Psychology*, 7, 743. Doi: 10.3389/fpsyg.2016.00743
35
36 Chambon, V., Sidarus, N., & Haggard, P. (2014). From action intentions to action effects: how does the
37 sense of agency come about? *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 320. Doi:
38 10.3389/fnhum.2014.00320
39
40 Craig, A. D. (2002). How do you feel? Interoception: the sense of the physiological condition of the
41 body. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(8), 655–656. Doi: 10.1038/nrn894
42
43 Craig, A. D. (2003). Interoception: the sense of the physiological condition of the body. *Current Opinion*
44 *in Neurobiology*, 13(4), 500–505.
45
46 de la Vega, I., Dudschig, C., De Filippis, M., Lachmair, M., & Kaup, B. (2013). Keep your hands
47 crossed: The valence-by-left/right interaction is related to hand, not side, in an incongruent hand–
48 response key assignment. *Acta Psychologica*, 142(2), 273–277. Doi: 10.1016/j.actpsy.2012.12.011
49
50 Fisk, J. D., & Goodale, M. A. (1985). The organization of eye and limb movements during unrestricted
51 reaching to targets in contralateral and ipsilateral visual space. *Experimental Brain Research*, 60(1),
52 159–178. Doi: 10.1007/BF00237028
53
54 Gapenne, O. (2014). The co-constitution of the self and the world: action and proprioceptive coupling.
55 *Frontiers in psychology*, 5, 594.
56
57 Häfner, M. (2013). When body and mind are talking: interoception moderates embodied cognition.
58 *Experimental Psychology*, 60, 255–259. Doi: 10.1027/1618-3169/a000194
59
60

- 1
2
3
4 Herbert, B. M., & Pollatos, O. (2012). The body in the mind: on the relationship between interoception
5 and embodiment. *Topics in Cognitive Science*, 4(4), 692–704. Doi: 10.1111/j.1756-8765.2012.01189.x
6
- 7
8 Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001a). The theory of event coding (TEC):
9 A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849–937. Doi:
10 10.1017/S0140525X01000103
- 11
12 James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New York, NY: Henry Holt & Co. Doi:
13 10.1037/11059-000
- 14
15 Jasmin, K., & Casasanto, D. (2012). The QWERTY Effect: How typing shapes the meanings of words.
16 *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(3), 499–504. Doi: 10.3758/s13423-012-0229-7.
- 17
18 Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of*
19 *experimental Psychology: human Perception and Performance*, 27(2), 387–394. Doi: 10.1037/0096-
20 1523.27.2.387
- 21
22 Kunde, W., Koch, I., & Hoffmann, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection, initiation,
23 and execution of actions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 57(1), 87–106.
24 Doi: 10.1080/02724980343000143
- 25
26 Lotze, R. H. (1852). *Medizinische Psychologie oder Physiologie der Seele* [Medical psychology or
27 physiology of the soul]. Leipzig, Germany: Weidmann'sche Buchhandlung.
- 28
29 Milhau, A., Brouillet, T., & Brouillet, D. (2013). Biases in evaluation of neutral words due to motor
30 compatibility effect. *Acta Psychologica*, 144, 243–249. Doi: 10.1016/j.actpsy.2013.06.008
- 31
32 Milhau, A., Brouillet, T., & Brouillet, D. (2015). Valence–space compatibility effects depend on situated
33 motor fluency in both right-and left-handers. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(5),
34 887–899. Doi: 10.1080/17470218.2014.967256.
- 35
36 Pfister, R. (2019). Effect-based action control with body-related effects: Implications for empirical
37 approaches to ideomotor action control. *Psychological review*, 126(1), 153.
- 38
39 Pfister, R., Kiesel, A., & Melcher, T. (2010). Adaptive control of ideomotor effect anticipations. *Acta*
40 *Psychologica*, 135, 316–322. Doi: 10.1016/j.actpsy.2010.08.006
- 41
42 Pfister, R., Janczyk, M., Gressmann, M., Fournier, L. R., & Kunde, W. (2014). Good vibrations?
43 Vibrotactile self-stimulation reveals anticipation of body-related action effects in motor control.
44 *Experimental Brain Research*, 232, 847–854. Doi: 10.1007/s00221-013-3796-6
- 45
46 Pfister, R., & Janczyk, M. (2013). Confidence intervals for two sample means: calculation,
47 interpretation, and a few simple rules. *Advances in Cognitive Psychology*, 9, 74–80. Doi:
48 10.2478/v10053-008-0133-x
- 49
50 Reber, R., Winkielman, P., & Schwarz, N. (1998). Effects of perceptual fluency on affective
51 judgments. *Psychological Science*, 9, 45–48. Doi: 10.1111/1467-9280.00008
- 52
53 Regenberg, N. F. E., Häfner, M., & Semin, G.R. (2012). The groove move: action affordances produce
54 fluency and positive affect. *Experimental Psychology*, 59, 30–37. Doi: 10.1027/1618-3169/a000122
55
56
57
58
59
60

- 1
2
3 Rubichi, S., Nicoletti, R., Iani, C., & Umilta, C. (1997). The Simon effect occurs relative to the
4 direction of an attention shift. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and*
5 *Performance*, 23, 1353–1364. Doi: 10.1037/0096-1523.23.5.1353
6
7
8 Schwarz, N. (2004). Meta-cognitive experiences in consumer judgment and decision making. *Journal*
9 *of Consumer Psychology*, 14, 332-348. Doi : 10.1177/0272989X04273144
10
11 Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory.
12 *Psychol. Bull.* 136, 943. Doi: 10.1037/a0020541
13
14 Sidarus, N., Chambon, V., & Haggard, P. (2013). Priming of action increases sense of control over
15 unexpected outcomes. *Consciousness and Cognition*, 22, 1403–1411. Doi: 10.1016/j.concog.
16 2013.09.008
17
18 Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological research*, 68(2-3),
19 176-188.
20
21 Susser, J. A., & Mulligan, N. W. (2015). The effect of motoric fluency on metamemory. *Psychonomic*
22 *Bulletin & Review* 22, 1014–1019. Doi: 10.3758/s13423-014-0768-1
23
24 Thébault, G., Michalland, AH., Derozier, V., Chabrier, S., & Brouillet, D. (2018). When the vibrations
25 allow for anticipating the force to be produced: an extend to Pfister et al. (2014). *Experimental Brain*
26 *Research*, 236(4), 1219–1223. Doi: 10.1007/s00221-018-5190-x
27
28
29 Topolinski, S. (2012). The sensorimotor contributions to implicit memory, familiarity, and recollection.
30 *Journal of Experimental Psychology: General*, 141, 260–281. Doi: 10.1037/a0025658
31
32 Topolinski, S., & Strack, F. (2009). Motormouth: mere exposure depends on stimulus-specific motor
33 simulations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 423–433. Doi:
34 10.1037/a0014504
35
36 Wirth, R., Pfister, R., Brandes, J., & Kunde, W. (2016). Stroking me softly: Body-related effects in
37 effect-based action control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(6), 1755-1770. Doi:
38 10.3758/s13414-016-1151-2
39
40 Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature*
41 *Neurosciences*, 3, 1212–1217. Doi: 10.1038/81497
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

4.2. Synthèse

Cette expérience met l'emphase sur l'anticipation des effets liés au corps déclenchés par un mouvement. Les résultats indiquent que la perception d'un mouvement influence les actions futures.

À l'inverse des études précédentes, l'anticipation concerne une réafférence. Bien que les résultats soient similaires aux études antérieures, des investigations supplémentaires seront nécessaires pour déterminer si percevoir une exafférence (*i.e.* sensation corporelle provenant de l'environnement) ou une réafférence (*i.e.* sensation corporelle s'originant dans nos actions) mettent en jeu des processus similaires.

Enfin, par le mouvement, l'effet relié au corps devient totalement implicite, rendant la tâche plus écologique.

Dans l'idée d'un effet implicite et immédiat, peut-on anticiper la sensation tactile d'un objet au moment même où nous le manipulons ? C'est l'objet du prochain chapitre qui traitera également du jugement de l'effet relié au corps.

CHAPITRE 5 – Extensions

Nous présentons ici deux études.

La première étude est une extension à l'article évoquant la fluence motrice (*cf.* p.75). Elle a pour objet d'explorer l'anticipation d'un effet tactile qui est concomitant à la réponse. Cette expérience pose donc la question de la superposition temporelle de l'effet et de la réponse et la question de l'effet tactile sans contingence spatiale (*cf.* Wirth et al., 2016).

La deuxième porte sur le jugement de l'effet perceptif. À notre connaissance, ce point n'est pas traité dans la littérature de l'action idéomotrice à l'inverse, par exemple, du concept de fluence. La fluence motrice implique fortement la proprioception, et elle influence les jugements perceptifs (Brouillet et al., 2015). Nous pouvons donc envisager que le jugement des effets reliés au corps puisse être influencé par les relations entre une réponse et un effet lors d'un paradigme idéomoteur (*e.g.* Kunde, 2001).

5.1. Anticiper la pression de l'éponge

5.1.1. Introduction

Saisir un objet et faire l'expérience de sa texture est une activité régulière dans la vie quotidienne lors d'utilisation d'objets. Nous avons souligné que la perception de la texture requiert un toucher actif (Gibson, 1962) et active de nombreux mécanorécepteurs (*cf.* p.24). Notre propos ici est de savoir si une anticipation de la sensation perçue lors de la manipulation d'un objet se met en œuvre comme c'est le cas lors d'un mouvement ou les effets (vibro-)tactiles.

Dans une expérience du toucher d'un objet, l'effet est concomitant à la réponse : c'est au moment où je touche l'objet qu'émerge la texture. En d'autres termes, l'appui sur l'objet (réponse) déclenche l'effet.

Pour tester l'idée qu'un effet tactile concomitant à l'action est anticipé, nous avons réalisé une étude exploratoire à partir de la métaphore de l'éponge d'O'Regan (2011, *cf.* p.39). L'objectif principal de cette étude était de valider un dispositif expérimental, précisément une mousse (à la place de l'éponge).

En effet, la problématique majeure d'une telle étude est la mesure des variables dépendantes relative aux propriétés et caractéristiques d'une mousse. Il est complexe de

déterminer comment ces propriétés vont affecter les temps de réponses des participants (*cf.* Poapongsakorn & Kanchanomai, 2011). C'est la raison pour laquelle nous n'avons recueilli dans cette étude exploratoire que les pressions exercées sur des mousses de densités distinctes lors des réponses (Kunde et al., 2004). La deuxième problématique inhérente à la mesure des pressions sur des mousses est liée au comportement du capteur de pression (*i.e.* FSR) face à la déformation de la mousse.

Pour explorer la faisabilité technique de cette expérience tout en mesurant des données pertinentes pour l'étude, nous avons proposé à huit participants de réaliser une tâche construite sur la base du paradigme Response-Effect Compatibility (Kunde, 2001) dont la réponse sera l'appui sur la mousse (fort et faible), et l'effet sera la sensation tactile de la densité (haute densité et faible densité). Ne pouvant établir avec certitude l'existence d'une compatibilité entre la densité de la mousse et l'appui, puisque, à notre connaissance, il n'y a pas de travaux montrant une dimension partagée (*cf.* Hommel et al., 2001 ; Kunde, 2001 ; Prinz, 1992) entre l'intensité de l'appui et une densité de texture, nous avons exploré les différents effets des modalités sans *a priori*.

5.1.2. Méthode

Participants. Huit étudiants droitiers de l'université Paul Valéry ont participé à cette expérience. Ils ne connaissaient pas l'objectif de l'expérience et ne disposaient pas de connaissance théorique et méthodologique au sujet de cette étude. Aucun des participants ne présentaient de troubles moteurs, sensoriels ou cognitifs susceptibles de perturber le déroulement de la tâche ou la réalisation de celle-ci.

Matériel. Deux mousses de polyuréthane de 5 cm³ ont été utilisées. Leur densité était respectivement de 16 kg/m³ et 32 kg/m³. Au centre de la mousse nous avons placé un capteur de force (Force Sensitive Resistance, FSR) identique à celui des études présentées précédemment. Celui-ci était placé sur une surface rigide. Le FSR était contrôlé par une carte Arduino permettant de recueillir les forces de pression exercées par les participants. Aucun seuil n'était déterminé.

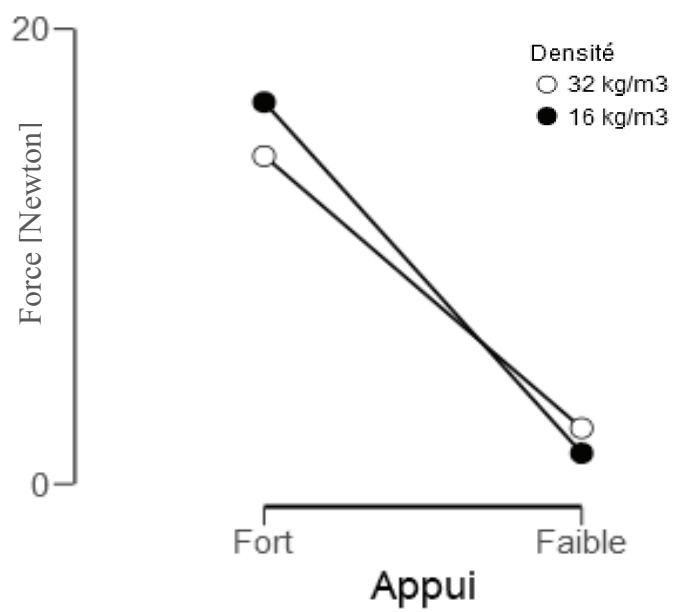


Figure 6 : moyennes des forces d'appui (en Newton) en fonction de la densité de la mousse (32 kg/m³ vs 16 kg/m³) en fonction de l'appui à exercer sur la mousse (Fort vs faible).

Procédure. La présentation des stimuli est identique en tout point aux études précédentes. Puis, en fonction du stimulus, au cours d'une première phase (correspondant à la phase d'une condition compatible ou incompatible) le participant devait appuyer fortement sur la mousse de haute densité avec sa main droite ou appuyer faiblement sur la mousse de densité faible avec sa main gauche. Au cours de la première phase la force d'appui était inversée entre les mains (la densité, la force d'appui et la latéralité ont été contrebalancées). Le temps d'intervalle pour répondre était de 1500ms. L'intervalle inter-item était de 1000ms.

Résultats. Les résultats sont à considérer au regard du faible nombre de participants. Les résultats pour chaque force d'appui associé à une densité supérieures ou inférieurs à 2,5 écart-types ont été retirés de l'analyse. Les résultats d'un participant n'ont pas pu être utilisés en raison d'une absence de données récoltées par le système Arduino. Avec les résultats restants, nous avons effectué une analyse de variance (ANOVA) 2 x 2 pour tester l'effet principal de l'appui (fort vs. faible) et de la densité de la mousse (16 kg/ m³ vs. 32 kg/m³). L'effet de l'appui est significatif, $F(6) = 21.78$; $p = 0.003$. Nous n'avons pas trouvé d'effet significatif de la densité de la mousse, $F(6) = 0.432$, $p = 0.535$. La significativité de l'effet d'interaction est faible, $F(6) = 3.97$, $p = 0.093$. Malgré cet effet d'interaction, l'analyse des effets simples par des t de Student ne sont pas significatifs (*cf.* figure 6).

5.1.3. Discussion

Cette expérience avait comme objet de tester la possibilité d'opérationnaliser l'idée que la sensation d'un objet, expérimentée au cours de sa manipulation, était intégrée dans l'action puis anticipée.

Concernant le matériel (*i.e.* la mousse), il semble nous permettre de mesurer les effets souhaités, notamment dans la condition où le sujet doit appuyer fortement sur la mousse. Dans la condition faible, les résultats sont plus aléatoires car les sujets peuvent avoir tendance à appuyer si faiblement qu'aucune donnée n'est captée par le FSR. Une première possibilité pour pallier ce point est de faire une phase précédant l'expérience classique dans laquelle les sujets apprendraient à presser faiblement et fortement selon des seuils définis au préalable, par exemple une force comprise entre 0.5 et 2 Newton pour la condition faible. Une autre possibilité est d'ajouter un message au cours de la procédure mentionnant de presser plus (ou moins) fort en fonction de la condition expérimentale.

Concernant l'hypothèse de l'anticipation d'une sensation perçue *online* lors de l'action, l'effet croisé observé est intéressant. Il signifie que les participants atténuent la pression exercée sur la mousse lors d'un appui fort avec la mousse de densité élevée (ou majorent la pression avec la mousse de densité faible) et inversement lors de l'appui faible. À l'inverse des travaux antérieurs, montrant une atténuation de l'appui lors des effets auditifs (Kunde et al., 2004) et tactiles (Thébault et al., en révision(a), *cf.* p.54), nos résultats indiquent que la pression exercée dépend de la relation qui se crée entre une sensation tactile et un appui proprioceptif, qui correspondent tous deux à des effets reliés au corps. Nous pouvons supposer ici que ces effets s'associent pour rendre cohérent la réponse. Par exemple, l'appui très faible suffit à ressentir la sensation de toucher de la mousse ainsi que la sensation proprioceptive des doigts qui s'enfoncent dans la mousse, alors que cet appui faible sur la mousse de densité élevée requiert un appui plus élevé pour ressentir les doigts s'enfonçant dans la mousse. Lors de l'appui fort, pour percevoir la sensation proprioceptive de force dans la mousse de densité faible, une grande force d'appui est nécessaire, expliquant les résultats.

Cette interprétation se limite à un niveau descriptif et comportemental du fait de l'absence d'analyse de données temporelles non mesurées au cours de cette expérience. La prochaine étape, outre la modification de la procédure comme indiqué ci-dessus, devra apporter ces résultats afin de mesurer l'effet anticipatoire dans chacune des conditions.

5.2. Conséquences de l'action sur la perception de l'effet⁸

5.2.1. Introduction

Suivant la théorie idéomotrice, les deux premiers travaux expérimentaux présentés dans cette thèse (*cf.* p.47 et p.54) ont montré que les effets (vibro-)tactiles (l'idée des effets) sont anticipés au cours de l'action. Cette anticipation influence la sélection et la production de l'action, concordant avec les résultats des travaux antérieurs (*e.g.* Pfister et al., 2014 ; Kunde, 2001 ; Kunde et al., 2004).

Si ces résultats reposent sur une sensation tactile, ils suggèrent que des sensations corporelles influencent l'action. Ils suggèrent également que de nombreux ajustements sensori-moteurs seraient opérés par le percevant sur l'action qu'il produit au moment de celle-ci. Ces changements survenant au cours de l'action sur l'ensemble des composantes de

⁸ Ce travail est réalisé en collaboration avec Lionel Brunel, Thomas Camus et Denis Brouillet. Xavier Dartis, étudiant de Licence, a effectué un stage sur cette expérimentation.

l'action (*i.e.* sélection, initiation, exécution) modifient ainsi les sensations corporelles perçues au cours de la réponse. Une question est de savoir si ces changements perceptifs affectent la perception de l'effet. À notre connaissance, aucune étude basée sur le paradigme de compatibilité entre la réponse et l'effet (Kunde, 2001) n'a porté sur d'éventuelles modulations de la perception des effets.

Cette question a été cependant bien étudiée dans le domaine du contrôle moteur. Les modèles internes du contrôle moteur (Wolpert et al., 1995 ; Wolpert & Ghahramani, 2000) stipulent que la commande motrice est couplée à une copie efférente de cette commande motrice afin de prédire les conséquences sensorielles du mouvement. Les afférences proprioceptives continues lors du mouvement sont comparées aux prédictions des afférences proprioceptives de manière à ajuster ou optimiser le mouvement. C'est-à-dire que la commande motrice repose continuellement sur ce qui a été prédit.

Si la prédiction des afférences sensorielles (*i.e.* la copie efférente) est identique aux afférences réelles, celles-ci sont atténuées. L'atténuation sensorielle a été mise en évidence lors d'actions auto-générées (afférences identiques aux afférences réelles) ou générées par autrui (afférences distinctes) dans la modalité visuelle (Cardoso-Leite et al., 2010 ; Hughes & Waszak, 2011 ; Roussel et al., 2013, 2014), auditive (Reznick et al., 2015 ; Sato, 2008) ou tactile (Blakemore et al., 1999, 2000).

Par exemple, Blakemore et al. (1999) ont délivré des sensations tactiles sur la main droite des participants par l'intermédiaire de deux robots. Avec la main gauche, le participant manipulait un bras d'un premier robot actionnant un second robot qui produisait le stimulus tactile sur la main droite. Ce second robot permettait de manipuler le temps entre l'action de la main gauche et la délivrance du stimulus tactile sur la main gauche, augmentant le délai. La trajectoire de la stimulation était également manipulable. L'hypothèse de Blakemore et al. (1999) était que l'augmentation de l'écart sensoriel entre la prédiction et la sensation éprouvée réellement augmenterait l'intensité de la sensation tactile. Les participants évaluaient la sensation sur une échelle allant de 0, pas du tout intense (ou douloureux, plaisant...) à 10, extrêmement intense. Les résultats confirment ces prédictions montrant que l'augmentation du délai et de la perturbation de la trajectoire entraînent une augmentation des sensations tactiles.

Toutefois, certaines études suggèrent que les sensations ne sont pas exclusivement atténuées (Hoover et Harris, 2012 ; Shimada et al., 2010 ; van Kemenade et al., 2016). Reznick et al. (2015) ont manipulé l'intensité des conséquences auditives produites par l'action des participants. Ils ont constaté que les intensités auditives faibles améliorent la perception des sons, à l'inverse des intensités fortes où on observe une atténuation perceptive. Par ailleurs, ils

observent un effet croisé de l'action (auto-générée vs. passif) et de l'intensité sonore, c'est-à-dire qu'on retrouve une atténuation sensorielle pour les actions auto-générées lors de sons forts, alors que la perception auditive est meilleure pour les actions auto-générées lors de sons faibles. Leur procédure est relativement similaire au paradigme de Kunde (2001) puisqu'on retrouve un stimulus qui déclenche une action suivie d'effets auditifs. On retrouve cette similitude dans l'étude de Cardoso-Leite et al. (2010) où une atténuation survient dans la modalité visuelle (effet) suite à des réponses motrices (réponse).

En complément à cette idée que la sensation est modulée par l'action, nous avons montré que l'action est également modulée par la simulation de conséquences corporelles (Brouillet et al., 2018, *cf.* Annexe 1 ; Michalland et al., 2019, *cf.* Annexe 2). Lorsque l'action simulée a des conséquences néfastes pour les participants (*i.e.* une main blessée, Brouillet et al., 2018 ; une bogue de châtaigne, Michalland et al., 2019), ceux-ci intègrent cette conséquence négative dans leur comportement d'action. Par ailleurs, nos résultats (Michalland et al., 2019) montrent également que la prise en compte de ces conséquences divergent selon la latéralité. La main droite est plus sensible aux conséquences négatives que la main gauche (voir également Marzoli et al., 2013 ; Shen & Sengupta, 2012) car nous intégrons davantage l'ensemble des conséquences sensorielles d'un événement.

Pris ensemble, nous pouvons nous demander si l'action peut moduler la sensation tactile en fonction de la compatibilité de la réponse produite. Plus précisément, nous nous questionnons dans cette étude sur l'influence de la compatibilité réponse-effet dans le jugement des sensations tactiles.

Pour ce faire nous avons évalué l'intensité des vibrations tactiles perçues après un paradigme Response-Effect Compatibility (Kunde, 2001). Dans une première phase, les participants réalisaient la même expérience que celle présentée précédemment (*cf.* p.47) bien que le nombre de blocs différait. Dans une deuxième phase de discrimination d'intensité, dix stimulations vibro-tactiles d'intensité forte et dix stimulations vibro-tactiles faibles étaient successivement délivrées. Enfin dans une troisième phase, le participant effectuait la même tâche que dans la première phase alors que les effets pouvaient varier selon dix intensités distinctes allant de fort à faible. Après chaque effet, le participant devait indiquer si l'intensité était forte ou faible. Notre hypothèse opérationnelle forte était d'observer une atténuation sensorielle lorsque l'effet était fort (Reznik et al., 2015). Concernant l'effet de la compatibilité, nous ne pouvions pas émettre d'hypothèse opérationnelle étayée. Il est possible néanmoins de prédire que dans la condition de compatibilité, le sujet se trouve dans une situation identique à celle d'une action auto-générée, et inversement pour la condition

incompatible. Ainsi, l'atténuation sensorielle pourrait être minorée dans la condition incompatible.

5.2.2. Méthode

Participants. Vingt-quatre participants ont pris part à l'expérience. Un formulaire de consentement a été renseigné. Aucun des participants ne présentaient de pathologies pouvant conduire à produire des réponses erronées. Ils étaient tous naïfs quant aux objectifs de l'expérience.

Matériel. Nous avons utilisé le même matériel que dans les expériences présentées précédemment (*cf.* p.47 et p.54). Les seuils de pression ont été modifiés. Le seuil pour déclencher l'appui fort était de 5.23 N et le seuil de déclenchement de l'appui faible était de 0.52 N. Par ailleurs, l'intensité de la vibration faible et la vibration forte, déterminées par le logiciel Arduino, étaient respectivement de 90 et 254 (254 étant le maximum). Huit autres intensités ont été générées allant de 90 à 255 en respectant une augmentation régulière.

Procédure. L'expérience comportait trois phases. Dans la première phase, la moitié des participants appuyait fortement ou faiblement sur la touche réponse déclenchant une vibration compatible (respectivement forte ou faible), alors qu'une autre moitié appuyait fortement ou faiblement sur la touche réponse produisant une vibration incompatible (respectivement faible ou forte). Par ailleurs, la tâche était réduite à cinq blocs, soit 160 stimulus. Au cours d'une seconde phase, les stimuli vibro-tactiles faibles et forts étaient délivrés successivement dix fois pendant 1000 ms. Un message apparaissait pendant 2000 ms à l'écran indiquant si le stimulus était « fort » ou « faible ». La dernière phase était constituée par une nouvelle procédure selon le paradigme de compatibilité réponse-effet avec dix effets d'intensité différente allant de fort à faible. Après chaque stimulation tactile, ou au moment de la stimulation tactile, les participants devaient annoncer à l'expérimentateur si l'effet était faible ou fort. L'intensité de ces vibrations a été déterminée par le logiciel Arduino.

Analyse statistique. Pour chaque stimulus vibratoire et pour chaque participant, nous avons calculé le point d'égalité subjective (PSE). Les PSE ont été utilisés pour analyser les différences entre les conditions expérimentales grâce à une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA). Des analyses post-hoc ont été réalisées afin de mesurer les différences entre modalités dans chaque condition en utilisant un *t* de Student. Les données d'un sujet ont

dû être écartées du fait de l'absence d'un item dans la fiche de recueil des données. Les analyses, ainsi que les graphiques, ont été effectuées par R (R core Team, 2014).

Résultats. L'ANOVA n'a pas permis de mettre en évidence d'effets significatifs des PSE pour les conditions de compatibilité (compatible vs. incompatible) et pour la réponse d'appui exercée (fort vs. faible). Un effet d'interaction faible a cependant été trouvé, $F(10) = 4.73$, $p = .055$, $\eta^2_p = .321$. L'analyse de cette interaction a été effectuée par des t de Student qui ont montré un effet significatif lors de l'analyse de la différence des appuis dans la condition compatible (fort vs. faible, *cf.* figure 7A), $t(10)$, $p = .028$, $d = -0.774$, alors que l'effet n'était pas significatif dans la condition incompatible (*cf.* figure 7B).

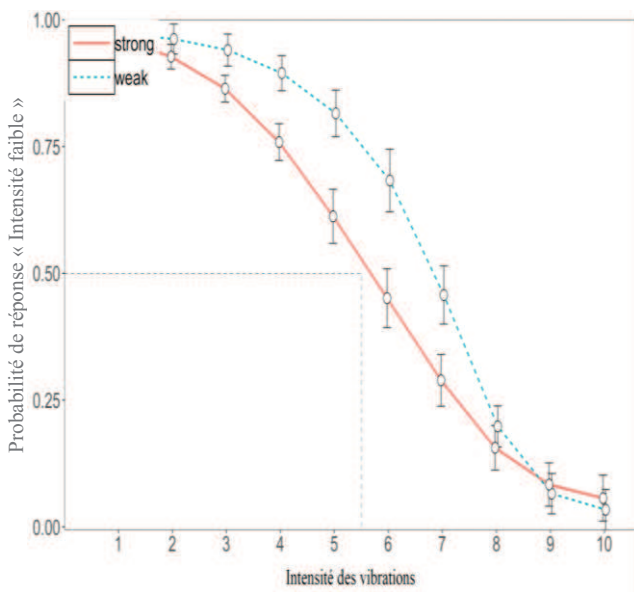
5.2.3. Discussion

Cette expérience avait pour objet de mesurer le jugement d'un effet relié au corps (*i.e.* une vibration tactile d'intensité faible à forte) suite à une réponse (*i.e.* appui fort ou faible) après une phase d'apprentissage où la réponse et l'effet étaient présentés de manière compatible ou incompatible.

Considérant que la manière avec laquelle nous réalisons une action influence nos perceptions, nous nous attendions à ce que la condition compatible soit considérée par le participant comme une action auto-générée ; c'est-à-dire que dans la condition compatible la perception de l'effet relié au corps anticipé sera atténuée. Dans la condition incompatible, nous nous attendions à ce que la perception de l'effet relié au corps ne soit pas atténuée, ou que cette atténuation soit minorée.

Nos résultats montrent qu'une atténuation de la vibration est présente dans les deux conditions. Cependant, nous observons une différence de jugement perceptif uniquement dans la condition compatible en fonction de l'appui exercé. L'intensité de la vibration est perçue plus fortement pour un appui fort que pour un appui faible. Autrement dit, dans la condition compatible, lorsque le participant anticipe l'effet, il perçoit l'effet comme augmenté. Il n'y a pas de différence dans le jugement perceptif dans la condition d'incompatibilité en fonction du type d'appui.

A. Condition compatible



B. Condition incompatible

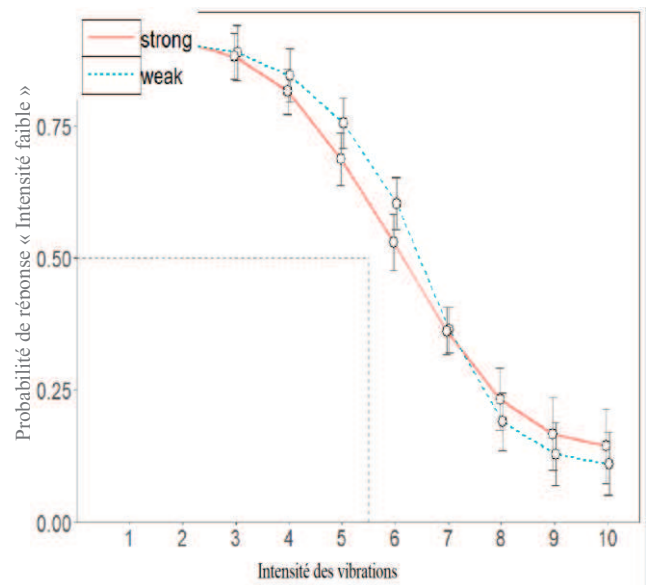


Figure 7 : Probabilité de répondre que l'intensité est faible (et barres d'écart-types) en fonction de l'intensité des vibrations dans la condition compatible (A, à gauche) et incompatible (B, à droite) et de la force d'appui (faible en pointillé bleu et fort en rouge). Le décalage à la $P=0.5$ qui correspondrait à une vibration d'intensité comprise entre 5 et 6, indique que les participants jugent les vibrations comme plus faibles quel que soit la condition.

Jusqu'à présent la perception de l'effet a fait l'objet d'investigations montrant une atténuation ou une majoration de la perception de l'effet lorsque l'action était auto-générée ou passive (Reznik et al., 2015) ou lors d'une contingence sensori-motrice entre la réponse et l'effet (Cardoso-Leite et al., 2010) à partir d'effets reliés à l'environnement (respectivement auditif et visuel). Nos résultats vont également dans le sens qu'une contingence sensori-motrice peut atténuer et augmenter un effet sensoriel comparativement à une situation non contingente.

Le fait que les effets reliés au corps modifient le jugement perceptif, comme c'est le cas avec les effets reliés à l'environnement, sont cohérents avec les recherches précédentes dans la mesure où des résultats similaires sont retrouvés pour ces effets (Pfister et al., 2019). Ainsi, nous pouvons supposer l'existence d'un processus commun dans le jugement des effets sensoriels sans distinction de leur origine (auditif, tactile, proprioceptif etc.) comme l'inférence active (Friston et al., 2009). Le principe de l'inférence active est de minimiser les erreurs de prédictions dans un but d'une optimisation fonctionnelle. Selon Brown et al. (2013), l'atténuation est une conséquence normale facilitant la poursuite des prédictions proprioceptives nécessaires au mouvement. Pour le dire autrement, la précision sensorielle est atténuée au détriment des prédictions proprioceptives.

Néanmoins, l'hypothèse de l'inférence active ne permet pas d'expliquer totalement les écarts retrouvés entre condition compatible et incompatible, ni ceux entre appui fort et appui faible. Des résultats conciliables avec l'inférence active auraient montré une atténuation et une majoration du jugement de l'effet dans la situation compatible en fonction de la contingence sensori-motrice, respectivement un appui faible et un appui fort.

De façon critique, il serait intéressant d'utiliser des niveaux de vibrations plus proches afin d'éviter la présentation de dix vibrations dont la fréquence moyenne n'est pas nécessairement comprise entre la cinquième et la sixième vibration. En complément, nous pouvons approfondir la question de l'erreur de prédiction en proposant, au cours de la seconde phase, une erreur par bloc dans chaque condition. Suivant l'inférence active nous devrions alors observer l'atténuation sensorielle marquant la minimisation de l'erreur. De plus, une intéressante perspective serait d'observer l'évolution de ces effets au cours du temps puisque les nouvelles prédictions tenant compte des réalisations ultérieures doivent entraîner une diminution des erreurs de prédiction.

Pour conclure, nous avons montré que le jugement des effets reliés au corps repose sur la condition de compatibilité et les contingences sensori-motrices entre la réponse et les effets conformément aux résultats des travaux précédents. L'étude des effets reliés au corps apporte

des évidences de plus en plus consistantes sur leur influence dans l'action (particulièrement l'anticipation), la perception et donc dans le couplage sensori-moteur (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016 ; Thébault et al., 2018a).

CHAPITRE 6 – Applications

Jusqu'alors, notre ambition a été d'explorer le mécanisme idéomoteur d'un point de vue théorique et fondamental. Anticipant sur la discussion de cette thèse, nous illustrons nos résultats par deux études exploratoires appliquées au développement et à dans un contexte de pathologie neurologique.

6.1. Action et développement

Le rôle de l'action dans le développement a été souligné dès les premiers travaux inaugurés par Baldwin (1897) puis Piaget (1937). Pour le premier, le mouvement était sélectionné pour répondre aux exigences de l'environnement et au maintien de l'équilibre de son organisme. Rappelons qu'il a introduit la notion de réaction circulaire pour qualifier la répétition motrice qui survenait chez l'enfant afin de reproduire une action. Si la réaction circulaire n'est pas précisément expliquée en termes d'anticipation, Baldwin (1897) stipule néanmoins que certains processus, comme l'imitation, soient une suggestion idéomotrice qui ne nécessite pas de volition, tout en arguant le fait qu'une telle suggestion pouvait être la base de nombreux comportements moteurs. L'idéo-motricité était l'association des sens externes et des sensations musculaires (*cf.* p.357). Pour Piaget, le développement de l'enfant s'articule autour de l'activité sensori-motrice. À propos de la théorie de Piaget, Varela et al. (1991) diront que l'enfant « *has only her own activity, and even the simplest act of recognition of an object can be understood only in terms of her own activity. Out of this, she must construct the entire edifice of the phenomenal world with its laws and logic* » (p.176), résumant ainsi la logique piagétienne.

Les études actuelles sur le développement apportent des éléments concordants avec ces théories princeps (*cf.* § 2.4.2. Développement et couplage somato-moteur). En outre, l'action est au cœur de théories développementales dans lesquelles les connaissances motrices, perceptives, et conceptuelles s'originent dans l'action (Thelen & Smith, 1996 ; Smith, 2005a ; *cf.* également Jouen & Molina, 2007). Par exemple, Smith (2005b), a mis en évidence que la manipulation d'objets jouait un rôle dans la catégorisation de ces objets. Dans son expérience, des enfants de 30 mois manipulaient un objet de forme ronde selon un axe vertical ou horizontal. Au cours de cette manipulation, l'expérimentateur qualifiait l'objet (« *Ceci est un Wug* »). Puis, dans une seconde phase, l'expérimentateur présentait deux objets

similaires en tout point de vue à l'objet de forme ronde hormis leur forme : l'un était allongé de manière horizontale, et l'autre d'une manière verticale. Lorsqu'on demandait aux enfants de choisir quel était le Wug parmi ces deux objets, ils optaient de manière privilégiée en fonction de la manipulation opérée au cours de la première phase. C'est-à-dire que les enfants ayant manipulé l'objet selon un axe horizontal, montrait l'objet allongé horizontalement comme étant un Wug. Ainsi, la manière dont nous intégrons un objet d'un point de vue sensori-moteur façonne notre perception des objets futurs, et, par le jeu d'assimilations et d'accommodations, construit, au sens piagétien, ou émerge une catégorisation.

Comme nous l'avons déjà mentionné (*cf.* § 2.4.2. Développement et couplage somato-moteur), les couplages sensori-moteurs s'effectuent extrêmement précocement au cours du développement, posant la question d'une forme d'action prénatale, de mécanismes anticipatoires et, tout simplement, d'une cognition (Molina et Jouen, 2014). En fait, cette question qui pouvait paraître inappropriée il y a quelques dizaines d'années, est tout à fait cohérente avec la position de Varela et al. (1991), puisque la cognition est l'histoire des couplages sensori-moteurs faisant émerger le monde. Certes, le fœtus ne fait pas pour ainsi dire émerger le monde tel que nous le connaissons, mais il fait émerger son monde propre à travers des lois spécifiques à la vie fœtale et à son environnement, nécessitant certaines adaptations, comme la vitesse d'un mouvement (Zoïa et al., 2006).

Plus précisément concernant l'association entre une action et un effet, des études ont montré que des enfants pouvaient diriger des actions selon un but dès les premiers mois de la vie (von Hofsten, 2004, 2007 ; van de Meer, 1997). Certains comportements précoces, comme le réflexe de foussement, sont organisés autour d'une action dirigée. Par exemple, ce réflexe de foussement n'est pas déclenché par un contact du corps de l'enfant, ou si l'enfant n'a plus faim (Rochat & Hespos, 1997, cité par von Hofsten, 2007). Pour autant, Verschoor et al. (2010) soulignent que ces faits ne démontrent pas l'existence d'un lien direct entre l'effet et l'action, mais plutôt d'un apprentissage opérant et bien souvent par imitation des actions des autres (Hauf & Aschersleben, 2008). En effet, il n'y a pas de preuves que l'enfant va directement déclencher une action par anticipation des effets perceptifs qu'il va produire.

Selon eux, la démonstration d'un lien direct peut être mise en évidence grâce au paradigme d'Elsner et Hommel (2001) en se référant au mécanisme idéomoteur. Étant donné l'âge auquel sont observés certains apprentissages des relations action-effet par imitation des autres (*i.e.* 9 mois, Hauf & Aschersleben, 2008), Verschoor et al. (2010) font l'hypothèse que les enfants de cet âge anticiperaient les effets produits par leur action pour la réaliser, tout comme des enfants de 12 et 18 mois. Afin de tester cette hypothèse, l'idée a été de comparer

une situation dans laquelle les effets sont déclenchés par une action auto-produite (effet A) ou produite par autrui (effet B). Les effets étaient des stimuli visuels et auditifs. Cet apprentissage devait avoir une conséquence plus importante sur la production de l'action dans la situation auto-produite que produite par autrui afin de fournir des preuves que l'enfant, premièrement, a fait le lien action-effet et surtout, deuxièmement, a anticipé les effets qui seront produits par son action. Ce résultat est bien retrouvé au cours de la phase de test puisque tous les enfants sont plus rapides pour appuyer sur la touche suite à la présentation de l'effet A (*i.e.* condition où l'action a été auto-produite) que lors de la présentation de l'effet B (*i.e.* condition où l'action a été générée par autrui).

Cette étude est, selon les auteurs, la première à établir des liens (directs) entre l'effet et l'action. Selon nous, c'est aussi la première à avoir établi ce lien chez les enfants *via* un paradigme conçu dans le contexte de l'action idéomotrice, en l'occurrence le paradigme d'acquisition Réponse-Effet (Elsner & Hommel, 2001).

Nous avons déjà souligné les limites de ce paradigme (*cf.* p.14). Cependant, nous pouvons ajouter une autre limite à l'étude de Verschoor et al. (2010), qu'ils soulignent d'ailleurs également. C'est l'histoire de l'erreur A-B : un événement moteur peut être complètement intégré à une situation de telle façon que l'absence de changement sensoriel suffisant ne permet pas une modification de l'équilibre mis en place par le système cognitif (Smith et al., 1999 ; Smith, 2005a). Finalement, au cours de la phase d'acquisition de cette expérience, les enfants, apprennent un comportement moteur associé à l'effet A alors qu'aucun mouvement n'accompagne l'effet B. Or, pour utiliser une métaphore liée à l'enfance, c'est plutôt l'histoire du bonbon que l'on veut raconter : je perçois les conséquences sensorielles avant de manger (ou prendre) le bonbon, c'est-à-dire une agréable sensation gustative (ou une tape sur la main !).

Verschoor et al. (2013) ont remédié à ce problème en utilisant une procédure impliquant le même type d'action pour les deux effets. En outre, ils montrent de manière intéressante que des enfants de 7 mois prédisent également les effets de l'action sans toutefois les sélectionner. En effet, la taille de la pupille des enfants de 7 mois était plus importante dans une condition congruente que dans une condition non congruente ; cependant, les temps de réponse pour sélectionner la réponse n'étaient pas significativement différents entre les conditions.

Pris ensemble, ces travaux interrogent la question de l'anticipation des effets liés au corps, en premier lieu en raison de la primauté du sens du toucher chez l'enfant (Bremner & Spence, 2017). Par ailleurs, nous avons déjà souligné que des couplages sensori-moteurs

s'effectuaient lors de la période embryonnaire (Zoïa, 2006, *cf.* p.29) sur la base du toucher et de la proprioception plutôt que l'audition ou la vue.

Cette réflexion a fait l'objet d'un travail de recherche aboutissant à une communication affichée présentée au Workshop Trace (Lancel et al., 2017, *cf.* figure 8, p.106). Loin de montrer que l'enfant anticipe l'effet produit par ses actions, cette étude témoigne néanmoins d'une anticipation de l'effet relié au corps lors des actions produites chez des enfants de 9 mois. Sur cette base, il convient de développer des tâches et des outils de mesures spécifiques pour appréhender la présence (ou l'absence) du mécanisme idéomoteur chez les nourrissons puisqu'à 4 mois, l'étude n'a pas pu mettre en évidence cette anticipation. Les résultats sont présentés figure 8 (*cf.* p.106).

Cette piste a été empruntée dès les prémices théoriques du mécanisme idéomoteur, avant James (1890) par Herbart (1825, *cf.* Stock & Stock, 2004) : « *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. [...] At a later time, a desire for the change observed before arises. Thus, the feeling associated with the observation reproduces itself* ». À quel moment, et surtout quels changements développementaux inaugurent ce désir, restent un mystère à découvrir.

6.2. Anticipation et déficience motrice

Introduction. En neurologie, le terme idéomoteur évoque l'apraxie idéomotrice (*cf.* Etcharry-Bouyx, 2017). Elle correspond à un déficit neuropsychologique observé suite à une lésion de l'hémisphère gauche, principalement lorsque la lésion neurologique affecte les lobes frontaux, pariétaux et temporaux.

Outre l'apraxie, dans ce contexte de la pathologie neurologique, selon l'approche incarnée (et située) que nous défendons, tout changement corporel devrait induire un changement de nos interactions avec l'environnement. Suivant ce principe, une déficience motrice devrait impacter l'anticipation de l'action et avoir des conséquences sur la fluence motrice.

L'étude de Kühn et al. (2014) illustre parfaitement le lien étroit entre contrainte du mouvement et perception. Ils montrent que lorsqu'un membre est immobilisé, notre perception tient compte de cette contrainte en diminuant la prise en compte des possibilités

Cette étude a pour objectif de mieux comprendre les liens qui unissent la sensori-motricité et l'émergence des connaissances. Nous nous interrogeons sur le rôle de la perception tactile sur l'anticipation de l'effet de l'action. Verschoor et al. (2010) ont montré que l'enfant de 9 mois réalisait une action pour reproduire les conséquences visuelles et auditives de cette action. En suivant cette idée, nous avons souhaité mesurer si cette anticipation pouvait également concerner des effets tactiles comme l'envisage la théorie idéomotrice (James, 1890 ; Greenwald, 1970 ; Pfister et al., 2014). Par ailleurs, en référence à Piaget (1936), nous pouvons émettre l'hypothèse que l'enfant anticipe ses actions plus précocement que ce que suggère Verschoor (2010). En utilisant un paradigme de compatibilité entre la réponse et l'effet (Kunde 2001), on s'attend à observer lors d'une phase de test que le nombre de contacts, le temps de maintien en secondes et le nombre de contacts visuels seront supérieurs en situation compatible que incompatible. Cet effet est attendu pour les nourrissons de 9 mois (expérience 1) et 4 mois (expérience 2).

METHODE

RESULTATS

PARTICIPANTS

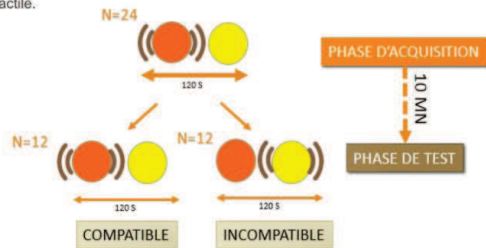
Expérience 1 : 24 enfants de 9 mois
 Expérience 2 : 24 enfants de 4 mois

MATERIEL

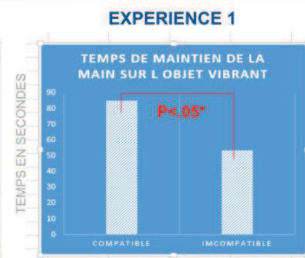
Lors de la séance d'expérimentation, le nourrisson est installé dans une poussette adaptée à son âge et équipée de caméras latérales. Face à l'enfant sont suspendus 2 objets sphériques (équipés de moteur).

PROCEDURE

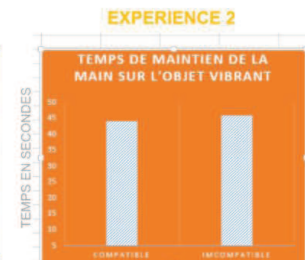
Dans nos deux expériences, le dispositif et la procédure sont identiques. Les nourrissons de 4 mois et ceux de 9 mois ont réalisé une tâche de libre choix simplifiée (Elsner & Hommel 2001) où l'enfant sera libre de toucher deux types d'objets qui lui sont présentés. Un objet est présenté avec un effet tactile (une vibration) et l'autre objet sans effet tactile.



AGE 9 MOIS



AGE 4 MOIS



Pour l'expérience 1, le test T indique un effet significatif de la compatibilité sur le temps de contact de la main sur l'objet vibrant à $p < .05^*$
 Pour l'expérience 2, le test T ne révèle pas de résultat significatif à $p < .05$.

DISCUSSION

Cette étude a pour objectif de mieux comprendre le mécanisme idéomoteur chez l'enfant et plus spécifiquement l'anticipation de l'effet de l'action. Nous nous interrogeons sur la présence de ce mécanisme, dès les prémices du développement, proche de la réaction circulaire développée par Baldwin (1897) et Piaget (1936). Dans notre étude, nous avons recherché des preuves d'acquisitions d'association action-effet chez les nourrissons de 9 mois et de 4 mois. Deux expériences ont tenté de fournir des preuves de convergence pour cette hypothèse. Les résultats vont dans le sens d'une intégration par l'enfant, dès 9 mois, des effets tactiles de ses comportements dans sa connaissance à propos du monde qui l'entoure. Concernant les nourrissons de 4 mois, nous observons des résultats qui marquent le début des conduites exploratoires.

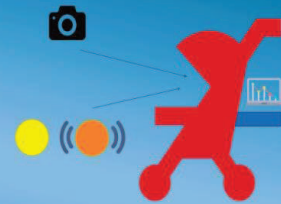


Figure 8 : Influence des effets tactiles sur les comportements du nourrisson (Lancel et al., 2017). L'étude effectuée auprès d'enfants de 4 et 9 mois a mis en évidence que seuls les enfants de 9 mois adoptent un comportement de manipulation de l'objet en fonction d'un effet tactile.

d'interaction offertes par l'environnement. En l'occurrence, les affordances offertes par des objets perçues, par exemple l'anse d'une tasse, activent d'une manière significativement moindre l'hémisphère impliqué dans la prise, potentielle, de cette anse. C'est-à-dire que le participant ayant une contrainte motrice au niveau du membre supérieur droit a une activation de l'hémisphère gauche moindre lorsque l'anse de la tasse est tournée sur la droite que lorsqu'elle est orientée sur la gauche.

Par ailleurs, Casasanto et Chrysikou (2011) ont montré qu'une contrainte au niveau de la main modifiait la fluence motrice. Celle-ci est habituellement liée aux spécificités corporelles individuelles, comme la latéralité (Casasanto, 2009) puisque les droitiers et les gauchers jugeront différemment les objets situés à droite ou à gauche. En résumé, la droite est « bonne » pour les droitiers ; la gauche est « bonne » pour les gauchers. Donc, lorsque les participants ont une contrainte, cet effet ne dépend plus de la latéralité mais de la possibilité d'efficience avec la main : un droitier dont sa main droite est contrainte jugera plus positivement l'espace gauche que l'espace droit. Ce résultat est similaire chez des personnes hémiparétiques (paralysie d'une partie du corps).

À travers une étude de cas, nous avons souhaité observer à titre exploratoire si une déficience motrice (*i.e.* séquelle d'hémiparésie motrice) affectait également l'anticipation de l'action. Si le mouvement est plus difficile à réaliser nous pouvons supposer que des sensations d'effort fournies par le système proprioceptif seront perçues par le sujet (Proske & Gandevia, 2012). Le mouvement du membre déficient peut à ce titre correspondre à un mouvement non-fluent, indépendamment de la latéralité.

Etude de cas. Mr C., 47 ans, a été victime d'un accident vasculaire cérébral sylvien gauche en novembre 2017. Le dossier médical ne comporte pas de compte-rendu radiologique permettant de décrire l'étendue de la lésion et les territoires atteints. Sur le plan clinique, Mr C. présente un déficit moteur de l'hémicorps droit (pour le membre supérieur côté à 4/5) sans trouble du tonus musculaire, et un déficit sensitif tactile sans trouble proprioceptif (évalué par la perception du sens de position des articulations dans l'espace). Les troubles du langage initialement importants (mutisme) se sont rapidement améliorés malgré la présence d'un manque du mot. Le patient retourne rapidement chez lui, 1 mois suivant l'AVC. Les raisons de ce retour au domicile précoce sont d'ordre familial. Toutefois, malgré des capacités fonctionnelles favorables à une indépendance quotidienne, des séquelles rendent la reprise de l'activité quotidienne impossible.

Il est adressé en centre de rééducation fonctionnelle en janvier 2018 pour une hémiparésie et des troubles du langage.

À l'entrée, le patient marche avec une canne simple. Les gestes semblent adaptés mais le déficit moteur droit est visible. Il communique verbalement avec parfois des difficultés qui paraissent venir d'un manque du mot. Toutefois, le discours est cohérent et très compréhensible. De prime abord il est très dynamique et sympathique. Cette attitude relationnelle sera positive tout au long du séjour.

Il précise que qu'il est marié et a 2 enfants de 10 et 17 ans. Il est conducteur d'engin mécanique (et entretien) et a fait de la maçonnerie. Il dit que, par son travail, il est autant habile avec sa main droite que gauche – hormis pour écrire. Au domicile il s'occupe de toutes les tâches de la vie quotidienne. Sa femme, malade, est traitée par chimiothérapie une fois par semaine pour un psoriasis. Ces activités de loisirs sont la marche (10 Km une fois par semaine), le jardinage et le potager.

Evaluations. L'évaluation des capacités sensori-motrices par l'ergothérapeute met en évidence un déficit moteur. La force musculaire est déficitaire (22.5kg/main droite et 46.8 kg/main gauche et au Jamar⁹, respectivement score z=X et score z=X), ainsi que la dextérité globale (48 cubes main droite et contre 62 main gauche et au Box & Block Test¹⁰, respectivement score z=X et score z=X). Cette différence main droite main gauche n'est pas retrouvée lors d'un test de dextérité fine (moyenne de 12.66 main droite contre 12.33 main gauche au Perdue Pegboard¹¹, respectivement score z=X et score z=X). Il n'est pas retrouvé de déficit sensitif au test de Semmes-Wenstein¹², ni de différence droite/gauche. Sur le plan de la commande motrice, l'hémicorps droit est côté à 4/5 contre 5/5 pour l'hémicorps gauche par le kinésithérapeute ; aucun trouble articulaire n'est observé.

Globalement, Mr C. décrit une maladresse et une gêne dans l'utilisation de sa main droite, notamment pour certaines tâches bimanuelles.

L'évaluation neuropsychologique conclut en l'absence de troubles cognitifs hormis ceux du langage.

Expérience. Nous avons proposé à Mr C. de réaliser une expérience de fluence motrice similaire à celle que nous avons présentée précédemment (cf. p.75). Nous nous attendions à observer une anticipation de l'action différente selon la main utilisée. Plus

⁹ Le Jamar consiste à serrer le plus fort possible une poignée tenu verticalement.

¹⁰ Le Box & Block Test consiste à déplacer des cubes le plus vite possible d'une boîte à une autre en 1 minute.

¹¹ Le Perdue Pegboard comporte plusieurs tâches où le sujet doit placer des petites tiges dans des trous.

¹² Le Semmes-Wenstein évalue la baresthésie grâce à des monofilaments exerçant une pression sur la peau.

précisément, notre hypothèse opérationnelle était que les temps de réponse seraient plus rapides lors de l'initiation du mouvement dans la condition fluente que dans la condition non fluente, et lorsque le geste serait effectué avec la main non déficitaire. Nous nous attendions à ce que les mouvements soient effectués plus rapidement dans la condition fluente que dans la condition non fluente, notamment lorsqu'ils sont réalisés avec la main non déficitaire.

La procédure est identique à celle présentée précédemment. Dans l'impossibilité de contrebalancer les conditions expérimentales, nous avons choisi de commencer par la condition de fluence. La condition de non fluence a été réalisée une semaine plus tard, dans les mêmes conditions expérimentales (même lieu et même heure).

Les temps de réponses (TR) ont été analysés par des tests de Student (échantillons indépendants) pour tester l'hypothèse d'une différence entre la condition fluente et non fluente pour la main saine et la main déficitaire lors de l'initiation et l'exécution du mouvement.

Résultats. Les résultats ont montré des différences significatives en faveur de la condition de non fluence que ce soit pour la main saine et la main déficitaire ($ps < 0.01$). Compte tenu de ce résultat inverse à nos prédictions, et somme toute difficilement explicable, nous avons supposé que ce résultat pouvait être lié aux conditions expérimentales particulières, notamment que la seconde tâche ait été effectuée une semaine après l'autre. Les variations de performances motrices – et cognitives – en séjour de rééducation peuvent être très variables. Nous avons donc procédé à une analyse *post-hoc* selon les conditions « fluence vs non fluence » plutôt que selon le membre (sain vs déficitaire) en utilisant également des tests de Student. Concernant l'initiation, les résultats n'ont pas montré de différences significatives entre le membre sain et le membre déficitaire dans les conditions fluente et non fluente : $t(139) = 1.83, p=0.069, d=0.31$ et $t(136) = 0.34, p=0.732, d=0.06$, respectivement. Concernant l'exécution, la vitesse du mouvement effectué avec la main saine dans la condition fluente et dans la condition non fluente est significativement différente que celle du mouvement effectué avec la main déficitaire : $t(135) = -3.21, p=0.002, d=-0.55$ et $t(133) = -4.25, p<0.001, d=-0.73$, pour la condition fluente puis la condition non fluente) (*cf.* figure 9, p.110).

Discussion. Ces résultats nous permettent d'avancer quelques interprétations qui seront prises avec la plus grande prudence tant du fait de la méthode que face à la complexité d'établir avec certitude ce qui est de l'ordre de séquelles motrices ou cognitives suite à un accident vasculaire cérébral.

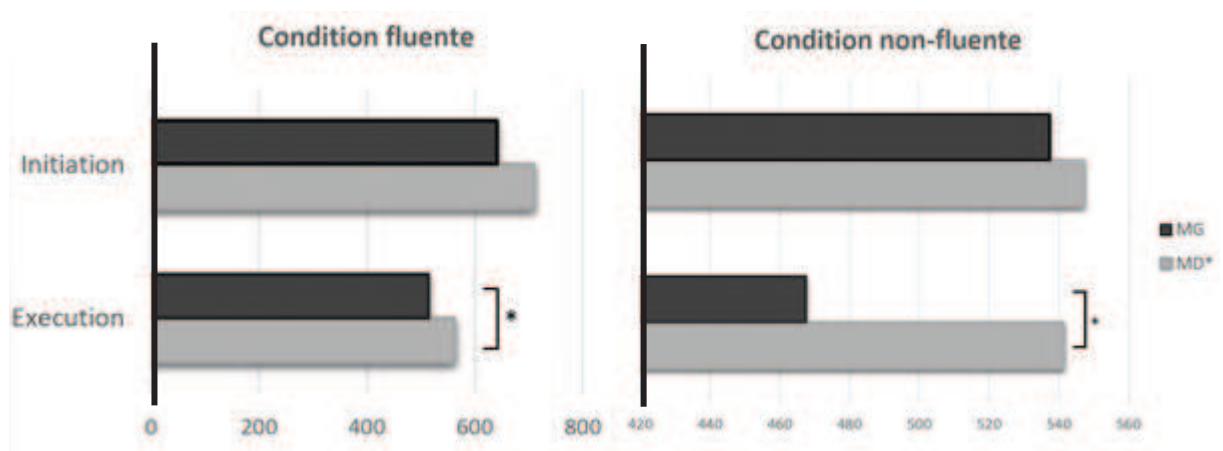


Figure 9 : temps de réponse (msec) de Mr C. lors de l'initiation et de l'exécution du mouvement dans la condition fluente (à gauche) et la condition non fluente (à droite) pour la main gauche (MG en noir) et pour la main droite (MD en gris, l'astérisque indique le côté de la main atteinte). Dans le graphique, l'astérisque indique une différence significative.

Que la méthode expérimentale, employée ici, s'applique à l'étude d'un cas est possible en augmentant le nombre d'essais. Ce qui n'a pas été possible dans notre expérience pour des raisons éthiques puisque face à cette étude exploratoire incertaine il apparaissait logique de ne pas allonger le temps de l'expérience déjà couteuse en temps et en attention. Une piste aurait été d'effectuer la moitié des blocs en condition fluente puis la moitié des blocs en condition non fluente lors de la première entrevue et inversement lors de la seconde rencontre (la semaine suivante). Ce n'est pas le choix qui a été fait afin de respecter au plus près l'expérience initiale et le paradigme de compatibilité entre la réponse et l'effet (Kunde, 2001). Cette éventualité est à prendre en compte pour une prochaine étude.

En ce qui concerne les séquelles motrices, il devient clair, à travers l'histoire d'une cognition incarnée, qu'une séparation stricte entre ce qui est de l'ordre d'un déficit moteur et gestuel et d'un déficit neuropsychologique affectant la gestuelle est difficile à argumenter conceptuellement, voir épistémologiquement. Bien sûr, une atteinte du faisceau pyramidal stricte mise en évidence par imagerie sera un élément en faveur d'une séquelle d'origine motrice (voir à ce sujet Dinomais et al., 2015 chez les enfants avec lésion cérébrale). Mais ces lésions circonscrites sont rares lors d'un accident vasculaire cérébral. En outre, l'évaluation neuropsychologique repose souvent sur la gestuelle, à plus forte raison lors d'une suspicion d'apraxie. Bien que cette dernière ne soit diagnostiquée que par exclusion de troubles moteurs (ou autres troubles cognitifs), la distinction entre troubles moteurs et l'apraxie motrice (ou frontale) est ténue.

Malgré ces contraintes et limites, nous proposons une interprétation compatible avec les propos théoriques avancés dans cette thèse et l'observation clinique de Mr C. Pour rappel, celui-ci relate une maladresse gestuelle, qui se concrétise notamment lors de tâches bimanuelles. Les résultats effectués lors de l'expérience d'anticipation de la fluence motrice mettent en évidence la difficulté à réaliser un geste moteur : les mouvements sont significativement plus lents avec la main déficitaire qu'avec la main saine que ce soit dans la condition fluente ou la condition non fluente. Or, nous pouvons suggérer que cette difficulté, ou plutôt la sensation de l'effort nécessaire pour produire un mouvement, n'est finalement pas intégrée dans le comportement puisque l'anticipation de ces mouvements n'est pas distincte de l'anticipation des mouvements avec la main saine. Si bien que si se pose la question du déficit moteur, la question de la proprioception et de la relation entre mouvement et anticipation est également centrale dans cette hypothèse.

Ce résultat et cette interprétation sont assez contre-intuitifs vis-à-vis de notre hypothèse initiale. L'augmentation de l'échantillon permettrait d'analyser les régularités

comportementales chez les patients cérébrolésés en fonction de leurs séquelles sensori-motrices et éventuellement du territoire affecté. Ce travail aurait également un grand intérêt à suivre l'évolution de ces séquelles et d'en mesurer les résultats dans une expérience d'anticipation des effets reliés au corps, par exemple, en tissant des liens plus étroits entre proprioception et fluence motrice, voire faire l'hypothèse d'une consubstantialité entre les deux.

III – DISCUSSION GÉNÉRALE

1. Rappels des principaux résultats

L'objectif de cette thèse était d'apporter des arguments en faveur du rôle des sensations corporelles au cours de l'action. Plus précisément, nous avons pour ambition de montrer que le toucher et la proprioception sont anticipés à chaque moment de l'action. Cette idée n'est pas nouvelle puisque nous la retrouvons dans des travaux du milieu du XIX^{ème} siècle d'où émerge la théorie de l'action idéomotrice. Elle est énoncée en ces termes par James (1890) mais les fondements théoriques avaient été formulés bien avant lui et avant même que la notion « idéomoteur » soit liée au comportement volontaire et aux actes de la vie quotidienne (*cf.* Stock & Stock, 2004). Ainsi, nous avons vu que dans la formulation initiale de la théorie idéomotrice les effets liés au mouvement (« *resident effects* ») font partis de l'équation idéomotrice. Néanmoins, ils sont d'emblée reconnus comme moins prégnants que les effets auditifs et visuels qui surviennent au cours de l'action. Depuis les années 2000, de nombreux travaux ont étayé l'hypothèse d'une anticipation des effets visuels et auditifs (*e.g.* Kunde, 2001 ; Elsner et Hommel, 2001 ; Kunde et al., 2004). Lorsqu'une caractéristique, ou dimension, lie une réponse et un effet, une anticipation de l'action est retrouvée. Le fait que cette dimension puisse correspondre à une contingence liée à l'intensité semble montrer qu'anticiper une action repose sur la manière avec laquelle nous interagissons avec les effets de l'action. Ce n'est que récemment que les effets liés au corps ont été explorés (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016).

Notre hypothèse d'une anticipation des sensations corporelles est basée sur une conception phénoménologique de la cognition incarnée. Elle stipule que notre corps est le moteur de nos actions. Chaque interaction avec l'environnement provoque des couplages, des liens bidirectionnels, corporels et auditifs/visuels. Autrement dit, c'est de cette interaction, dont le corps est l'absolu médiateur, que s'établissent des couplages sensori-moteurs à partir desquels la connaissance se développe, émerge, se construit et se modifie (Piaget, 1937 ; Varela et al., 1991). Ainsi, d'un point de vue phénoménologique, chaque action constitue une expérience du corps. Le corps expérimente l'environnement et en même temps s'expérimente lui-même, comme un objet de l'interaction avec l'environnement (*i.e.* exafférences) et comme un sujet de sensations intrinsèques (*i.e.* réafférences).

C'est cette singularité du corps que nous avons tenté de mettre en lumière au cours de cette thèse.

En premier lieu, nous avons testé l'hypothèse d'une anticipation de l'action à partir d'un effet relié au corps lorsque la contingence entre la réponse et cet effet était basée sur l'intensité (Thébault et al., 2018a, *cf.* p.47), et non plus comme dans les travaux précédents basés sur une dimension spatiale (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016). À partir du paradigme Response-Effect Compatibility (REC, Kunde, 2001) qui sera utilisé tout au long des expérimentations, notre procédure consistait à comparer une condition de compatibilité dans laquelle une réponse (*i.e.* un appui sur une touche) et un effet (*i.e.* une vibration tactile) partageaient une intensité commune (*i.e.* fort/fort ou faible/faible) à une condition d'incompatibilité où réponse et effet variaient en intensité (*i.e.* fort/faible ou faible/fort). Cette expérience a mis en évidence que les effets tactiles étaient davantage anticipés dans la condition de compatibilité. Les résultats, qui indiquent une différence significative lors des temps de réponses élevés, sont typiques d'un effet anticipatoire. Cette similarité soulève néanmoins la question de la manière dont la sensation tactile est délivrée. Celle-ci s'apparente à une exafférence puisque c'est un signal tactile que le sujet peut attribuer à l'environnement (Proske & Gandevia, 2012). Si le « corps objet » semble fournir un effet propice à être anticipé (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016 ; Thébault et al., 2018a), le « corps sujet » pourrait également jouer un rôle crucial dans le mécanisme anticipatoire.

Cette réflexion nous a menés à réaliser de nouvelles expérimentations portant sur les influences respectives des exafférences et des réafférences dans l'anticipation de l'action.

Ainsi, en second lieu, nous avons testé l'hypothèse qu'une vibration tactile pouvait moduler la réponse qui survenait lors de l'appui qui implique le toucher et la proprioception. Cette idée avait été initialement explorée par Kunde et al. (2004). L'intensité de l'effet auditif influençait la force d'appui sur une touche. C'est-à-dire qu'un son fort avait pour conséquence d'atténuer la force d'appui sur la touche de réponse par rapport à l'effet d'un son faible. Cette conséquence était retrouvée quel que soit la condition d'appui (*i.e.* fort ou faible). Faire l'hypothèse analogue à partir d'une vibration tactile n'est pas si évidente car l'atténuation sensorielle a principalement été montrée à partir de modalités sensorielles distinctes (*e.g.* Aschersleben & Prinz, 1997), à moins d'une prise en compte différenciée des effets exafférents et réafférents. La procédure de cette expérience est identique à celle présentée ci-avant mais la force d'appui exercée sur les touches a été mesurée pour chacune des conditions. Nos résultats sont en faveur d'une atténuation de la force d'appui anticipée des vibrations tactiles fortes. Autrement dit, la réponse tactile/proprioceptive dépend de l'intensité

tactile. Il est intéressant de noter que ces liens communs qui unissent la réponse et l'effet à travers l'atténuation ne reposent sur aucune dimension ou caractéristique partagée. En partant du principe que les effets reliés au corps participent à l'anticipation de l'action, la sensation tactile/proprioceptive qui découle de la réponse pourrait même s'influencer elle-même, comme une réaction circulaire. Quoiqu'il en soit, tous ces effets reliés au corps, et ceux multiples associés au cours d'une action, ont une influence relative et différenciée (Pfister, 2019 ; Janczyk et al., 2017). Nous pouvons donc suggérer que l'influence de la sensation tactile/ proprioceptive lors de l'appui est minime puisque la sensation tactile provoquée par la vibration est très perceptible.

Notre troisième expérience a alors porté sur l'anticipation des sensations proprioceptives provoquées par un mouvement volontaire (*i.e.* réafférence). En termes de perception de mouvement, la fluence motrice désigne la perception de facilité avec laquelle un mouvement est réalisé (Casasanto, 2009). La fluence motrice influence les jugements et fournit une coloration hédonique aux objets de notre environnement (Milhau et al., 2015 ; Brouillet et al., 2015). Une plus grande fluence motrice est retrouvée lors d'un mouvement de la main dans l'espace ipsilatéral que lors d'un mouvement effectué dans l'espace controlatéral à la main utilisé. Fisk et Goodale (1985) ont montré que cette compatibilité entre la main et l'espace influence les performances motrices : les gestes sont mieux réalisés et ils sont initiés plus rapidement. L'hypothèse de Fisk et Goodale (1985) est cérébrale. Pour déclencher un mouvement dans l'espace controlatéral, un transfert entre hémisphères *via* le corps calleux serait coûteux en temps, expliquant les différences temporelles lors de l'initiation. Toutefois, cette hypothèse n'explique pas la raison pour laquelle les sujets sont plus lents à initier un mouvement ipsilatéral qui nécessite une plus grande amplitude (20° vs 10°). Nous appuyant sur la fluence motrice, nous avons suggéré que l'initiation du mouvement dépend de phénomènes proprioceptifs analogues à ceux observés dans les études sur l'anticipation de l'action et le principe idéomoteur. Notre expérience consistait à produire des gestes selon une condition fluente où la main droite (ou gauche) appuie sur un bouton situé dans l'espace droit (ou gauche), ou une condition non fluente où la main droite (ou gauche) appuie sur un bouton situé dans l'espace gauche (ou droit). La procédure expérimentale est similaire aux travaux présentés auparavant. L'effet, implicite, reposait sur la perception du mouvement et la fluence motrice qui lui était associée. Les résultats indiquent que la fluence motrice est anticipée. Les participants perçoivent, puis anticipent, la sensation de facilité produite par le mouvement. Nous avons suggéré ainsi des liens étroits entre proprioception et fluence motrice.

Plusieurs travaux expérimentaux complémentaires viennent compléter ces articles publiés, en révision ou soumis.

La précédente expérience montrait que l'expérience phénoménologique d'un mouvement fournissait une perception de facilité, la fluence, qui était anticipée lors des mouvements futurs. Si bien que si les effets proprioceptifs opérant au cours d'un mouvement réalisé simultanément à une réponse peuvent être anticipés, des effets tactiles perçus au cours d'une manipulation d'un objet pourraient également donner lieu à une anticipation. Au cours d'une expérience à but exploratoire, nous avons testé si les sensations découlant de l'expérience de la densité d'une mousse (*cf.* O'Regan, 2011) étaient anticipées. Les résultats, recueillis auprès de 7 participants, sont encourageants, mais nécessitent un développement supplémentaire. À l'inverse des précédents travaux, il n'y a pas d'atténuation sensorielle provoquée par l'effet tactile procurée par la densité de mousse élevée. Il semblerait que les participants opèrent uniquement en fonction d'une compatibilité entre la réponse et l'effet.

Faisant une parenthèse sur les liens entre réponse et effets reliés au corps, nous avons exploré plus loin l'idée de l'atténuation sensorielle à travers une expérience portant sur le jugement de l'effet. En lien avec les travaux portant sur l'atténuation sensorielle (Kunde et al., 2004 ; Aschersleben & Prinz, 1997 ; Blakemore et al., 2000), nous avons proposé une expérience basée sur le paradigme REC et adaptée de façon à permettre à des participants de juger l'intensité des vibrations. Ainsi, l'expérience était composée de trois phases. La première correspondait à la procédure classique. Au cours de la seconde phase, les participants étaient informés de l'intensité forte ou faible des vibrations tactiles. Puis au cours d'une troisième phase, la séquence stimulus-réponse-effet était de nouveau proposée aux participants. L'effet variait selon dix intensités, allant d'une intensité faible à forte selon celles délivrées au cours de la première phase. Après chaque vibration, les participants devaient indiquer si celle-ci était faible ou forte. Globalement, les résultats ont indiqué que les participants jugeaient l'intensité comme plus faible que ce qu'elle était réellement. Par ailleurs, nos résultats ont montré que dans la condition compatible, la force d'appui (*i.e.* appui faible vs appui fort) entraînait une différence de jugement des vibrations, c'est-à-dire que l'intensité de la vibration était jugée encore plus faiblement lors d'un appui faible, alors qu'aucune différence de jugement n'a été mise en évidence dans la situation incompatible en fonction de l'appui. À travers cette expérience, nous montrons qu'une situation de compatibilité pourrait être considérée comme une action auto-générée, comme en témoigne l'atténuation sensorielle. Le fait que les vibrations faibles seraient sous estimées lors d'un appui faible en situation compatible va dans le sens d'une atténuation sensorielle similaire à

celle observée lors de l'utilisation de la mousse de densité faible. À l'inverse, des travaux ont montré qu'une surestimation de la force auto-générée ne concernait que des niveaux de force faible (Proske & Gandevia, 2012 ; Walsh et al., 2011).

Pour finir, nous avons suggéré que l'ensemble de ces travaux étaient pertinents dans l'étude du développement et dans le contexte de troubles moteurs après lésion cérébrale.

Chez l'enfant, l'anticipation des effets de l'action a été montrée à partir d'effets reliés à l'environnement (Verschoor et al., 2010 ; 2013) à partir de 7 et 9 mois. Compte tenu de la primauté du toucher chez l'enfant, et dans la continuité des travaux portant sur les couplages sensori-moteurs précoces (*e.g.* Piaget, 1937), une action idéomotrice pourrait être présente plus précocement qu'à 7 mois si elle reposait principalement sur des effets reliés au corps. L'expérience de Lancel (Lancel et al., 2017) a testé cette hypothèse. Les résultats sont contrastés. Ils montrent de manière intéressante, une influence de l'effet tactile chez les enfants de 9 mois. Néanmoins, ils n'ont pas pu mettre en évidence une influence de l'effet relié au corps chez les enfants de 4 mois.

Concernant les troubles moteurs, nous avons réalisé une étude de cas auprès d'une personne présentant des séquelles motrices suite à une lésion cérébrale. Étant donné que la perception de facilité avec laquelle nous réalisons un geste est anticipée (*cf.* p.75, sur la fluence motrice), nous pouvions nous attendre à ce qu'une séquelle motrice entraîne une perception de difficulté modifiant l'initiation et l'exécution du geste. Étonnamment, nous avons observé que le temps pour initier un geste avec le côté déficitaire était identique au côté sain malgré une difficulté effective à réaliser le geste. Ce résultat nous conduit à penser que l'anticipation de la (non) fluence motrice n'est pas intégrée dans l'action.

Pris ensemble, ces travaux mettent en lumière le rôle des effets reliés au corps dans l'anticipation de l'action. Ce rôle longtemps négligé mérite d'être discuté au regard de la théorie idéomotrice actuelle, notamment vis-à-vis de la question de la temporalité. Enfin, nous aborderons une nouvelle fois la question de l'application de ces travaux dans le domaine de la santé.

2. L'unité de l'action et sa temporalité

Tout au long de cette thèse nous avons considéré l'ensemble des effets reliés au corps qui surviennent au cours d'une action. Nous avons exploré tour à tour les effets reliés au corps

suivant une réponse (effets vibro-tactiles exafférents), ceux intervenant au cours de la réponse (effets tactiles et proprioceptifs réafférents), puis ceux qui émergent de l'action (effets proprioceptifs – la fluence motrice – et tactiles, réafférents). Pour être tout à fait exact, les effets observés dans Thébault et al. (2018a, *cf.* p.47) suivent et à la fois chevauchent la réponse car rien ne permet de déterminer la fin de la réponse.

Même si les résultats témoignent à chaque fois d'une anticipation des effets reliés au corps, il s'agit de savoir néanmoins si les variations temporelles séparant réponse et effet peuvent jouer un rôle sur l'anticipation de l'effet, et si cette question est pertinente dans le contexte des effets liés au corps.

2.1. La temporalité de l'effet

Le temps peut constituer une dimension commune entre la réponse et l'effet, tout comme l'espace ou l'intensité. Par exemple, Kunde (2003), en associant un temps similaire ou un effet distinct pour la réponse et l'effet (par exemple long/long ou long/court), a montré qu'une compatibilité temporelle était facilitatrice de l'anticipation de l'effet.

Plus récemment, des travaux ont étudié l'influence du délai temporel séparant la réponse et l'effet (Dignath et al., 2014 ; Wirth et al., 2016). Si le temps qui sépare une réponse et un effet est long, cela est appris et devient congruent (compatible) par la suite, c'est-à-dire que les participants, intégrant le délai, initieront lentement la réponse (Dignath et al., 2014). Le délai temporel est intégré à l'action caractérisant les liens qui se tissent au cours de l'action entre la réponse et l'effet. Ainsi, ces travaux montrent que l'effet ne doit pas nécessairement suivre immédiatement la réponse pour avoir une influence sur celle-ci. Les actes de la vie quotidienne sont ponctués de telles situations où nous anticipons le temps aussi bien que l'effet, auquel cas nous anticipons une plus ou moins grande attente de la survenue de l'effet.

Janczyk et al. (2017) ont récemment exploré l'influence de deux effets visuels séparés par un laps de temps. Leur procédure, basée sur un paradigme de compatibilité spatiale entre la réponse et l'effet (Kunde, 2001), consistait classiquement à produire une réponse sur une touche suite à la présentation d'une lettre sur un écran. La réponse donnée sur une touche placée sur la droite ou sur la gauche déclenchait un effet visuo-spatial compatible (du côté de la réponse) ou incompatible (côté opposé de la réponse). En l'occurrence, il s'agissait de l'apparition d'un cercle à l'écran. Puis, survenait un deuxième effet suivant le même schéma de compatibilité, c'est-à-dire que le cercle se déplaçait à l'écran du côté de la main de réponse (condition compatible) ou du côté opposé (condition incompatible). Comme le disent les

auteurs, les résultats sont simples (et sans appel) : un effet de compatibilité entre la réponse et l'effet a uniquement été retrouvé pour le deuxième effet, quel que soit la condition de compatibilité survenant pour le premier effet. Ainsi, dans une situation de compétition d'effets (intra modaux), l'effet le plus éloigné temporellement est celui qui semble le plus à même d'influencer l'action. Cette compétition intra modale n'est pas sans rappeler nos expériences, notamment « Une extension de Kunde et al., 2004 » (p.51), bien que le premier effet (tactile et proprioceptif lors de l'appui) ne soit pas aussi éloigné de la réponse.

Malgré leur intérêt, tous ces travaux portent sur des effets liés à l'environnement. Reproduire ces études en utilisant des effets liés au corps est tentant, notamment afin de discuter des performances vis-à-vis de l'éloignement des effets (distaux). Toutefois, ce ne serait que peu écologique dans la mesure où si un effet d'action lié à l'environnement peut se concevoir distant de l'action, ce n'est pas toujours le cas en ce qui concerne les effets liés au corps.

En effet, si cela est possible, et écologique, pour les sensations corporelles provenant de l'environnement (exafférence ; par exemple, au tennis, la sensation corporelle perçue lors de l'impact de la balle dans la raquette est déclenchée après le mouvement), ce n'est plus possible dès lors qu'il s'agit de sensations corporelles issues d'une réafférence. Pour ces dernières, elles se définissent, comme nous l'avons souvent évoqué, par leur caractère *online*. Pour autant, de nombreux travaux peuvent être entrepris pour explorer dans quelle mesure le temps influence un effet relié au corps perçu *online*.

Ces travaux peuvent s'inspirer des études montrant la réciprocité entre la perception du temps et l'intéroception (Craig, 2009), *via* le rythme cardiaque ou la fréquence du pouls (Wittmann, 2009), et entre surtout entre la perception du temps, le mouvement et les états moteurs (Orgs et al., 2013 ; Tomassini & Morrone, 2016) ainsi qu'avec le toucher (Tomassini et al., 2014). Ces travaux suggèrent que notre perception du temps varie en fonction des sensations tactiles et des mouvements. Par exemple, une sensation tactile amorçant un mouvement a pour conséquence une compression temporelle qui n'a lieu que lorsque cette sensation est appliquée sur la main réalisant le mouvement (Tomassini et al., 2014).

En tenant compte du fait que la perception du temps est modulée par l'action et que le temps est intégré dans l'action comme l'est l'espace ou la manière avec laquelle nous exécutons une action, il apparaît crucial de contrôler le temps avec lequel est réalisé un effet lié au corps au cours de l'action (comme nous l'avons proposé dans l'expérience sur la fluence motrice, p.75 et dans l'expérience de la mousse, p.90). Par exemple, en ce qui concerne la fluence motrice, ce qui apparaît maintenant comme une critique de cette

expérience est que le temps de réalisation du mouvement est intégré à la sensation perçue. Le temps de latence observé dans l'initiation du mouvement dans la condition non fluente pourrait alors être lié à cette idée sensorielle et temporelle (plutôt que motrice) de l'action future.

2.2. La temporalité de l'action

Comme nous l'avons stipulé dans notre introduction théorique, les sensations liées au mouvement sont considérées comme jouant un rôle dans l'anticipation de l'action dès l'origine de la théorie idéomotrice. Pour rappel, James (1890) distingue les effets résidents des effets éloignés. Les premiers, déclenchés à chaque fois que nous réalisons un mouvement *via* les tendons, les ligaments, la peau (*cf.* p.24), constituent un effet sensoriel. S'il note ce type d'effets comme moins prégnants que les effets éloignés, découlant des sens auditifs et visuels, James (1890) semble soutenir l'hypothèse que les effets résidents sont associés, nous pourrions aujourd'hui dire intégrés, aux effets éloignés à chaque fois qu'une action idéomotrice est déclenchée, et même, « *sometimes very remote indeed* » (p.521).

Bien que nos résultats permettent d'envisager que nos actions soient anticipées à partir des effets reliés au corps, le flux d'effets présents en permanence au cours d'une action laisse aussi présager que nous ne pouvons pas tenir compte de tous ces effets, notamment les effets reliés au corps. En effet, l'idée d'une minimisation de leur effet, ou d'un estompage, vis-à-vis des effets reliés à l'environnement est soutenue dans le domaine moteur. Il a été montré qu'un apprentissage basé sur des instructions focalisant sur les effets externes du corps, le matériel par exemple, améliorerait davantage les performances qu'un apprentissage basé sur les mouvements (Wülf et al., 1998), et l'apprentissage est d'autant plus performant qu'il repose sur des effets éloignés (McNevin et al., 2003). Une récente revue de littérature rapporte que les résultats inverses, ou l'absence de différences entre les deux types d'apprentissage observés dans certaines études pourraient être essentiellement liées à des aspects méthodologiques (Wülf 2013). Par ailleurs, la proposition d'une primauté du distal est étayée par les travaux portant sur l'intégration multisensorielle, intermodale ou intramodale (Ladwig et al., 2012 ; Sutter & Ladwig, 2012).

Pour Jordan (2013), ce n'est pas tant une question de poids ou de primauté, mais plutôt une question de temps et de contexte. Il donne l'exemple du tango : simultanément, nous contrôlons nos membres pour effectuer les pas et les mouvements de la danse (effets proximaux), nous ajustons la distance qui nous sépare du partenaire (effets distaux, on peut

surtout ajouter les autres personnes ou les meubles notamment pour les novices), et le fait de réaliser une séquence spécifique de la danse qu'il nomme un effet abstrait¹³. Jordan (2013) soutient que ces trois types d'effets qui résultent du mouvement sont anticipés et contrôlés dans différentes échelles de temps (Multi-Scale Effect Control, MSEC) et de manière simultanée. En résumé, selon le MSEC, la prédiction des effets proximaux, distaux et abstraits se font en permanence en fonction des contraintes temporelles imposées par le contexte, c'est-à-dire la tâche ou l'intention du participant.

Empruntons-lui un autre exemple qui nous sera utile pour nos propos du chapitre suivant. Tout en marchant et en discutant avec quelqu'un, nous sommes en permanence en train d'anticiper ce qu'il va dire, faisant également, d'une manière inconsciente des prédictions sur les sensations à venir au niveau des pieds. Si une marche survient sans que nous l'ayons anticipée, les sensations prévues sont erronées par rapport aux sensations perçues. La surprise que provoque la détection de cet écart rend consciente cette anticipation inconsciente.

À partir de ces exemples, illustrant la théorie du contrôle de Jordan (2013), nous pouvons suggérer que la similitude des patterns de résultats retrouvés lors de nos expérimentations, spécifiques aux effets reliés au corps, aux précédentes pourraient provenir d'une similitude intentionnelle (*i.e.* répondre à un stimulus), contextuelle (*i.e.* réaliser une expérience) et temporelle (*i.e.* 250ms). Les différences caractérisées par des effets moins significatifs, peuvent être liées à une différence intentionnelle, contextuelle et temporelle en relation directe avec les contraintes continues d'effets distaux lors du mouvement. Autrement dit, comme le stipule Jordan (2013), le système d'événement distal rend ignorant les systèmes d'événement proximaux dont l'échelle temporelle est brève.

Une hypothèse ambitieuse découlant de cette approche permet de reconsidérer les conditions de compatibilité réponses – effets décrits dans le paradigme de Kunde (2001) comme un rapport entre l'écart existant dans la prédiction et la sensation. L'écart plus important produit lors de la condition incompatible témoignerait d'une augmentation de la perception de l'effet car l'écart avec la prédiction était plus surprenant et donc coûteux en temps. Cette hypothèse est conciliable avec nos résultats sur le jugement de l'effet qui tendent à indiquer un meilleur jugement des effets faibles.

¹³ Jordan (2013) suggère que le terme « *very remote* » utilisé par James (1890, p.521) correspond à l'effet qu'il nomme « *abstract effect* ». Il utilise également le terme de « *cognitive effect* ». En outre, il utilise les termes effets proximaux et effets distaux.

Mais cette théorie illustre également les résultats de Kunde et al. (2004) et notre étude (Extend to Kunde et al., 2004, *cf.* p.54) puisque les effets reliés au corps seraient contrôlés et contraints par la prédiction des effets reliés à l'environnement. Effectivement, les pressions exercées sur la touche de réponse (*i.e.* effets reliés au corps) sont contrôlées par les effets reliés à l'environnement futurs qu'ils soient tactiles (*i.e.* effets reliés au corps) ou visuels (*i.e.* effets reliés à l'environnement). Ceci revient bien à considérer la temporalité de l'effet et le contexte de la tâche comme des principes plus distinctifs du mécanisme idéomoteur que le type d'effet (*i.e.* effets reliés au corps et effets reliés à l'environnement). À noter également que cette contrainte n'est pas uniquement distale puisque le modèle envisage que les effets reliés à l'environnement soient contraints par les effets plus éloignés et proximaux (Jordan, 2013).

Il nous semble possible de rapprocher cette contrainte proximale de ce que prétend la théorie de l'énergie libre et l'inférence active (Friston, 2010 ; Brown et al., 2013, *cf.* p.100) qui suggère que les sensations sont contrôlées par l'action, c'est-à-dire la proprioception. Selon cette théorie, tout organisme vivant a comme but premier de maintenir son état d'équilibre (homéostasie) face au désordre de l'environnement (entropie). Le maintien de l'équilibre résulte de la minimisation des erreurs prédites par notre cerveau et l'optimisation des futures prédictions. Pour ce faire, l'action est centrale car c'est par elle que seront sélectionnés les inputs sensoriels les plus proches des prédictions. Dès lors, ce sont les conséquences sensorielles qui déclenchent l'action. Pour revenir à notre propos, on peut dire que l'action repose sur des inférences proprioceptives. Disant cela, la proximité avec l'action idéomotrice (James, 1890) nous semble évidente.

De la même manière que la théorie de Jordan (2013), l'inférence active (Friston, 2010) apporte des arguments explicatifs de l'atténuation sensorielle que nous avons observée dans nos travaux (*cf.* également Kunde et al., 2004) par un mécanisme de contrôle des effets, proche des postulats de James (1890).

Tenant compte du principe d'autopoïèse décrit par Maturana et Varela (1980, *cf.* p.35), et l'idée d'une cognition unifiée et incarnée, la Théorie de l'Énergie Libre (Friston, 2010) et la Théorie du contrôle de l'effet multi-échelles (Jordan, 2013), se basent sur le fait que notre cerveau prédit (*i.e.* anticipe) continuellement les effets sensoriels futurs qui déclenchent nos actions. Ces théories succinctement évoquées au vu de leur complexité, reviennent à considérer des actions anticipées en permanence, prédéfinies par les systèmes sensori-moteurs. Ce sont les écarts (surprise) survenant entre la prédiction des sensations corporelles

et les sensations corporelles réellement perçues qui font émerger ces sensations et par voie de conséquence la situation, le monde.

3. La clinique à l'épreuve de la théorie idéomotrice

3.1. Anticiper des changements corporels

Les changements corporels interviennent tout au long de la vie, par le développement, l'expertise, au cours de maladies physiques ou psychologiques. C'est le cas lors d'un trouble moteur suite à une lésion cérébrale acquise, allant, généralement, de l'hémiplégie à une hémiparésie, c'est-à-dire une paralysie partielle, puis à une faiblesse musculaire ou des troubles de la dextérité manuelle, jusqu'à parfois l'absence de séquelles. Cliniquement, l'hémiplégie est un trouble moteur que l'on distingue de la sensibilité et de la cognition.

Tout en ayant émis certaines réserves, notre travail (*cf.* p.111) a mis en évidence que l'anticipation d'un effet relié au corps (*i.e.* la fluence motrice) avec un membre dont les capacités motrices étaient altérées se distingue de participants n'ayant pas ce déficit. Rappelons une nouvelle fois que, chez Mr C., le temps d'initiation du mouvement du côté de la main déficitaire est similaire à celui du côté de la main non déficitaire, cependant le mouvement est significativement plus lent pour la main déficitaire que pour la main non déficitaire.

Selon les propositions de Jordan (2013) nous pourrions dire qu'il existe un écart entre les prédictions des effets reliés au corps et les effets réellement ressentis. Nous pourrions ainsi soutenir l'idée que cet écart est expliqué par un déficit lié à la perception du mouvement, auquel cas les prédictions des effets reliés au corps ne pourraient pas s'ajuster dans le futur. Toutefois, les évaluations de la sensibilité et de la proprioception n'avaient pas relevé de déficit. Une hypothèse alternative est de penser que les expériences sensorielles ne permettent pas une intégration dans les réseaux cérébro-cérébelleux responsables du contrôle des effets reliés au corps. En bref, le changement corporel ne modifie pas les prédictions établies antérieurement.

Ces hypothèses interrogent sur le fait qu'un déficit moteur, et plus largement tout changement corporel, a un impact sur l'anticipation de l'action, tout du moins le temps de redéfinir de nouvelles prédictions.

Cette idée d'une relation d'interdépendance entre le mouvement et *a minima* l'anticipation de l'action est développé dans de nombreuses théories que nous avons évoqués dans cette thèse (Friston, 2010 ; James, 1890 ; Jordan, 2013 ; Proske & Gandevia, 2012 ; Thelen & Smith, 1991 ; Varela et al., 1991 ; Wolpert & Ghahramani, 2000). Par analogie, il serait donc normal de retrouver cette interdépendance lors d'un déficit moteur.

À notre connaissance, il n'existe pas de travaux montrant une relation entre la présence d'une hémiplégie, ou d'un trouble moteur liée à une lésion cérébrale, et une modification des comportements en général, et plus spécifiquement sur l'anticipation de l'action (voir néanmoins Scandola et al., 2019). Outre le fait de reproduire notre expérience sur un groupe de personnes présentant un déficit moteur afin de confirmer nos résultats, il serait intéressant d'observer dans quelle mesure l'importance du changement corporel intervient dans ces erreurs de prédiction. De plus, une analyse plus rigoureuse des capacités proprioceptives et tactiles apporterait des résultats complémentaires sur l'influence des effets reliés au corps, notamment en tenant compte de l'évolution des réponses anticipatoires.

Dans le prolongement de ces perspectives, nous pouvons nous demander si ces écarts de prédiction peuvent provoquer des erreurs dans l'utilisation des objets, voir des troubles praxiques. En effet, des erreurs dans la réalisation du mouvement pour atteindre l'objet ou une maladresse d'utilisation de l'objet sont des symptômes cliniques d'un trouble praxique suite à une lésion cérébrale (*cf.* Etcharry-Bouyx et al., 2017). L'origine de ces erreurs est toujours difficile à déterminer. En premier lieu, il s'agit d'exclure toutes les autres causes possibles d'erreur de manipulation, à commencer par les troubles sensori-moteurs (Le Gall et al., 2000). Mais la limite est parfois très mince entre un niveau sensori-moteur et les composantes sensori-motrices de plus haut niveau (Goldenberg, 1995) et tout le système de production tel qu'il est décrit dans les modèles de l'apraxie (Rothi et al., 1991 ; Buxbaum, 2001) dès lors qu'il s'agit d'observer un trouble dans le contexte d'une lésion cérébrale. Par exemple, Pellicano et al. (2011) proposent qu'un contrôleur collecte les retours sensori-moteurs au moment de l'utilisation d'un objet. Ce contrôleur joue également un rôle de sélection de l'objet en fonction des buts de l'action. Par extension, nous pouvons également imaginer que ce contrôleur renseigne sur les retours sensori-moteurs dévolus au mouvement, voir au contrôle des effets reliés à l'environnement du mouvement, revenant à une conception similaire à celle de l'action idéomotrice (James, 1890) et celle du contrôle de l'effet multi-échelles (Jordan, 2013). Il est intéressant de noter que pour Pellicano et al. (2011) ce contrôleur agit online, comme nous l'avons également suggéré lors des effets reliés au corps. Pellicano et al. (2011) suggèrent que le but à atteindre se construit au moment de l'action,

sous l'effet du contrôle permanent des effets reliés au corps et des effets de l'environnement. Le terme de contrôle, sans être évoqué par les auteurs, suppose que ces effets soient anticipés et donc prédits antérieurement. Cette conception est similaire à la thèse que nous avons défendue, montrant ainsi la proximité théorique entre mouvement et utilisation des objets.

Pour aller plus loin dans le domaine l'apraxie¹⁴, le modèle proposé par Osiurak (2014) présente un certain nombre d'analogies avec la conception que nous venons de décrire (Pellicano et al., 2011) et donc avec les propos de cette thèse. Toujours sur la base du modèle de Rothi et al. (1991, un système de conception et un système de production), Osiurak (2014) propose que le système de production pour l'utilisation des objets repose sur quatre contraintes : mécanique, spatiale, temporelle, d'effort. Chacune des contraintes s'opérationnalise dans un des systèmes conceptuels. Selon nous, ces contraintes sont proches conceptuellement des effets sensoriels. La contrainte spatiale (*i.e.* raisonnement sémantique) mentionne que l'utilisateur doit être capable de « penser » aux objets qui ne sont pas présents dans l'espace de travail. Cela suggère que l'utilisateur anticipe les effets reliés à l'environnement (*i.e.* les objets) et abstraits (*i.e.* la séquence de l'action) ; nous sommes dans le contexte du « *very remote* » de James (1890). La contrainte spatiale (*i.e.* mémoire de travail) indique que l'utilisateur doit *prévoir* les objectifs de l'action et son déroulement dans le temps. Ici, nous pouvons évoquer les mêmes effets (reliés à l'environnement et abstraits), mais dans une temporalité plus courte. La contrainte d'effort (*i.e.* simulation basée sur la prise de décision) stipule qu'un coût est inhérent à l'action, le système doit donc opter pour la meilleure option. Cette contrainte renvoie aux effets reliés au corps et à l'environnement et au contrôle online de ces effets. Elle renvoie également à la minimisation de l'énergie libre (Friston, 2010). Enfin, la contrainte mécanique (*i.e.* connaissance mécanique et connaissance basée sur l'objet) propose que l'individu doive être capable de transformer un objet en un autre. Osiurak (2013) donne l'exemple d'un pain qui doit être coupé en tranches. Cette transformation suppose des prédictions complexes sur l'ensemble des effets sensoriels possibles. Toutefois, une différence conceptuelle de taille est que contrairement à l'approche d'Osiurak (2013), nous pouvons proposer que les objets du monde ne sont pas prédonnés (*i.e.* le couteau n'a pas d'état courant dans le monde) mais plutôt que leurs propriétés adviennent (énactent) dans le monde en fonction de l'action et l'intention de l'individu (*i.e.* le couteau est prédonné car il peut couper le pain).

¹⁴ Nous sommes conscients que ce regard lapidaire mériterait un développement théorique plus rigoureux et plus exhaustif, sur une thématique aussi complexe que l'utilisation des objets, comportement de haut niveau cognitif.

Le point de vue par contraintes s'appuie sur un modèle systèmes multiples (système de connaissance mécanique, système de raisonnement sémantique), alors que le point de vue du contrôle et de l'anticipation des effets de l'action fournit une conception plus unifiée de la cognition. Par ailleurs, il semblerait que dans le domaine de l'apraxie et de l'utilisation des objets, la question de l'anticipation des effets sensoriels ne semble pas avoir été abordée, quoiqu'elle reste latente dans l'ensemble du système conceptuel, comme nous l'avons montré par la similarité des quatre contraintes (système conceptuel) et des effets sensoriels.

Dans la même veine, il a été récemment avancé qu'une supervision des erreurs et de l'action pouvait jouer un rôle dans les apraxies bucco-faciale (Canzano et al., 2014 ; 2016). La supervision des erreurs et de l'action paraît proche de l'idée de la perception de l'écart entre les prédictions et les sensations réelles (Jordan, 2013) puisqu'elle porte sur la détection de l'erreur. Rejoindre ces conceptions permettrait d'introduire plus précisément dans les modèles de l'apraxie l'anticipation des effets sensoriels.

Finalement, la théorie de l'utilisation d'objet est un domaine de recherche riche du fait que pour expliquer ce comportement de la vie de tous les jours elle devra probablement formuler une théorie générale du fonctionnement humain tenant compte de la manière dont sont produites les actions (James, 1890 ; Varela et al., 1991). Une idée est de suggérer que les troubles praxiques sont imputables à des erreurs de prédiction au niveau temporel et en fonction du type d'effet (*i.e.* reliés au corps vs. reliés à l'environnement).

3.2. Accident vasculaire cérébral néonatal : un modèle d'étude de l'effet d'une contrainte subie à la naissance

À l'inverse de l'hémiplégie de l'adulte, considérée comme un déficit moteur que l'on pourrait qualifier comme pur, l'hémiplégie infantile est assimilée au concept de paralysie cérébrale (PC, Cans et al., 2000) dans lequel les « *troubles permanents du développement du mouvement et de la posture, causant une limitation de l'activité [peuvent altérer] les processus cognitifs globaux et spécifiques* » (Rosenbaum et al., 2007).

La PC est un trouble clinique. C'est-à-dire basé sur l'appréciation subjective de cliniciens à l'aide d'évaluations standardisées. Si la définition de la PC augure une description des relations (causales) entre un corps paralysé et l'interaction de l'individu avec son environnement, la taxonomie motricité – cognition perdure. La PC, principalement évaluée à l'aide d'évaluations de la dextérité manuelle ou de la motricité globale, est associée ou non à des troubles cognitifs (*e.g.* Murias et al., 2014), si bien que pour certains auteurs le lien entre

une PC et troubles cognitifs n'est pas clair (Jenni et al., 2013 ; Studer et al., 2014). Ces travaux illustrent l'idée d'une séparation entre développement moteur et développement cognitif.

De nombreuses études ont montré de manière très intéressante que les capacités à anticiper les actions étaient altérées sélectivement chez les enfants présentant une PC. Par exemple, à partir d'une tâche d'imagerie, Williams et al. (2012) ont montré que les enfants avec une PC échouaient lors des tâches impliquant une action motrice (imagerie motrice) alors que les tâches n'impliquant pas d'action motrice (imagerie mentale) étaient réussies (Craje et al., 2010). Par contre, Molina et al. (2015) ont trouvé que le type de déficiences motrices (contraintes corporelles distinctes : atteinte au membre supérieur ou au membre inférieur par exemple) n'influçait pas le temps pour imaginer un déplacement.

Ces travaux suggèrent qu'une modification corporelle suite à une lésion cérébrale survenue très tôt au cours du développement influence notre aptitude à prédire les effets de l'action. Il n'est pas dit que cette modification corporelle a un effet négatif sur le développement puisque de nombreux enfants suivent un développement typique malgré une paralysie cérébrale. À ce propos, les enfants ayant une amyotrophie spinale infantile affectant fortement les capacités motrices, ont un développement intellectuel normal, voire supérieure en ce qui concerne le langage (von Gontard et al., 2002 ; Sieratzki & Woll, 2002).

Toutefois, une des difficultés de ce champ d'étude est l'hétérogénéité des facteurs déterminant le développement du fait du type de lésion cérébrale et du mécanisme lésionnel (*e.g.* ischémie vs hémorragie), de la présence de symptômes associés (*e.g.* épilepsie) ou de l'âge à la survenue de la lésion. Étudier les relations entre la présence d'une contrainte corporelle (PC) et le développement nécessite de circonscrire au maximum ces facteurs.

L'accident vasculaire cérébral néonatal (NAIS pour Neonatal Arterial Ischemic Stroke) se caractérise par la temporalité définie de l'événement (survenant quelques jours avant ou quelques jours après la naissance), la localisation de la lésion ischémique bien précisée par l'IRM, la présence d'une PC unilatérale dans un tiers des cas. Le NAIS affecte le développement au moment crucial de la naissance tandis que le mécanisme ischémique limite la lésion à une zone précise du cerveau. Dans ce contexte, nous avons montré que la PC n'est pas en soi un facteur développemental limitant.

En effet, nous avons étudié le développement d'une cohorte d'enfants ayant eu un NAIS (Chabrier et al., 2016) à partir de trois facteurs : la dextérité manuelle de la main non

paralysée (l'efficacité motrice), la PC (la déficience motrice), et l'intelligence¹⁵ (la cognition) en contrôlant le niveau socio-culturel, l'âge et en excluant de l'étude les enfants présentant une épilepsie (Thébault et al., 2018b, *cf.* Annexe 3). Les résultats ont montré que l'intelligence est prédite en fonction des capacités de dextérité que les enfants aient ou non une PC. Donc, bien que les enfants avec PC aient des performances intellectuelles moindres que les enfants n'ayant pas de PC, c'est en fait la dextérité de la main non paralysée qui prédit le développement intellectuel de manière indépendante.

Dans une perspective optimiste, nous avons conclu que le développement des enfants ayant eu un NAIS reposait sur le développement sensori-moteur, comme dans le développement typique (Piaget, 1937 ; Smith & Thelen, 1991). Notre idée étant que la PC, conçue comme un trouble moteur, n'est pas en soi un phénomène prédictif indépendant d'un développement atypique (*cf.* Thébault, 2017).

En fait, la réalité du développement est ici plus complexe que les raccourcis cliniques qui ont été faits dès lors que sont recherchés des relations causales entre des systèmes encapsulés et réducteurs. Définir la motricité, la cognition ou la PC comme des éléments dissociés n'autorise à en mesurer qu'un aspect pour déterminer des dissociations, ou, à l'inverse, y trouver des similitudes à partir de processus communs. Nous n'avons pas échappé à ce paradoxe, considérant que « déplacer des cubes », épreuve d'un des tests de dextérité manuelle, relevait de la motricité alors qu'une anticipation permanente des effets reliés au corps et à l'environnement sont nécessaires au cours de cette tâche. Similairement, la WISC, mesure du développement cognitif, est ponctuée d'épreuves impliquant une activité sensori-motrice.

Malgré cette critique, le NAIS est un modèle pertinent pour étudier dans quelle mesure des contraintes corporelles influencent le développement et l'anticipation de l'action, car il minimise et circonscrit les facteurs déterminants du développement.

Notre recherche consiste désormais à définir le temps d'adaptation face au changement corporel. Cette question du temps est cruciale car elle est éminemment liée au développement, à la PC et à l'anticipation. L'enfant avec une PC est confronté à la fois à son évolution physique et l'évolution de sa PC. L'évolution physique est lente, et dans le développement normal, nous pouvons suggérer que les changements physiques normaux améliorent les prédictions antérieures et donc l'anticipation. Notre question devient : comment l'enfant avec PC s'adapte face aux erreurs de prédictions qui surviennent lors de

¹⁵ Évaluée par la Wechsler Intelligence Scale for Children, 4^{ème} édition.

l'évolution de la PC – plus rapide que l'évolution physique normale, plus coûteuse en temps et en effort, puis par voie de conséquence, plus contraignante en termes de relation à l'autonomie. Autrement dit, comment l'enfant intègre les erreurs de prédiction du membre paralysé au cours de son développement pour garantir son adaptation et poursuivre son développement ?

Opérationnaliser cette thématique n'est pas sans poser des problèmes méthodologiques complexes, d'autant que la PC ne s'observe cliniquement qu'à partir des premiers mois (Hadders-Algra, 2000 ; Chen, 2013). Une des pistes est d'étudier la proprioception. Nous avons vu avec Friston (2010) et Brown et al. (2013) que la proprioception était un élément clé pour détecter les erreurs de prédictions et surtout optimiser le fonctionnement prédictif – et donc pour adapter des comportements en fonction des contraintes physiques.

Le pas est court vers la détermination de la dominance manuelle, sous influence corporelle et environnementale (Fagard, 2013), d'autant que la proportion de gaucher est plus élevée chez les enfants ayant eu un NAIS (Dinomais et al., 2017).

4. Conclusion générale

L'objet de cette thèse était de considérer l'action idéomotrice au plus près du concept initial (*e.g.* Lotze, 1852 ; James, 1890), c'est-à-dire en s'intéressant aux effets reliés au corps suivant l'action. Cette ambition était animée, d'une part, par les travaux récents sur le sujet (Pfister et al., 2014 ; Wirth et al., 2016) et, d'autre part, par la théorie de l'énaction. À l'image des traces de pas qui fait apparaître un chemin, l'énaction stipule que les connaissances surviennent au moment de l'action et donc à partir de nos sensations corporelles.

Afin de démêler la complexité du corps physique et psychologique, nous nous sommes attachés à définir par quoi (des mécanorécepteurs et des propriocepteurs) et comment (par une expérience phénoménologique), le corps guidait nos actions. À travers les notions d'exafférence et de réafférence, nous avons démontré qu'une sensation corporelle pouvait avoir des fonctions différentes au regard de l'origine de cette sensation. Puis, avec les notions de corps-objet et du corps-sujet, nous avons été amenés à considérer que les sensations corporelles étaient le moteur de nos intentions et de nos actions. À l'aune de ces considérations théoriques, il s'agissait alors d'apporter des éléments nouveaux sur l'anticipation des effets reliés au corps.

Nos expérimentations ont tout d'abord montré la proximité fonctionnelle des différents effets sensoriels (Thébault et al., 2018a ; Thébault et al., en révision(a) ; Thébault et al., en révision(b)). Cette proximité augure un rôle aux effets reliés au corps dans l'anticipation de l'action ; autrement dit, l'idée d'une sensation corporelle, tactile et proprioceptive, serait suffisante pour déclencher l'action, ou, tout du moins, participerait avec les autres sensations à ce déclenchement. Ces données empiriques ont été complétées par deux travaux en préparation. Ceux-ci apportent également des arguments en faveur d'une anticipation des effets reliés au corps.

Si ces résultats confirment nos hypothèses, ils ne sont pas sans poser des questions sur comment un individu unifie l'ensemble des effets sensoriels prédits et perçus dans une action cohérente. Les postulats théoriques de Friston (2010) et de Jordan (2013), faisant de l'action un processus prédictif, ont orienté notre discussion sur la notion de la temporalité de l'action. Elle permet de mieux comprendre certains résultats obtenus sans s'affranchir des notions corps-sujet/corps-objet ou réafférence/exafférence qui reposent également sur la temporalité de l'action.

Malgré ces questionnements, l'action idéomotrice, qui porte semble-t-il bien son nom, fournit un cadre théorique pertinent pour étudier l'influence des changements corporels dans des domaines appliqués. Nous avons esquissé quelques perspectives dans le développement auprès d'enfant ayant eu un accident vasculaire cérébral artériel néonatal et chez l'adulte présentant une déficience motrice. Le cadre théorique sied également au domaine de l'apraxie et de l'utilisation des objets. Ces quelques exemples d'application montrent combien la théorie idéomotrice s'enracine dans nos actes à la fois les plus quotidiens et les plus complexes comme le présentait James (1890). Ce cadre théorique traduit ainsi le caractère généralisable de l'action dans l'ensemble des recherches sur la cognition (Varela et al., 1993).

Cette thèse met en lumière le rôle du corps dans l'anticipation de l'action, notamment l'expérience du toucher et l'expérience du mouvement (*i.e.* la proprioception).

Bibliographie

- Anema, H. A., de Haan, A. M., Gebuis, T., & Dijkerman, H. C. (2012). Thinking about touch facilitates tactile but not auditory processing. *Experimental Brain Research*, 218(3), 373–380.
- Anzieu, D. (1974). Le moi-peau. *Nouvelle revue de psychanalyse*, 9(19), 5–208.
- Aschersleben, G., & Prinz, W. (1997). Delayed auditory feedback in synchronization. *Journal of Motor Behavior*, 29(1), 35–46.
- Badets, A., & Pesenti, M. (2011). Finger-number interaction. *Experimental Psychology*, 58(4), 287–292.
- Badets, A., & Rensonnet, C. (2015). Une approche idéomotrice de la cognition. *L'Année Psychologique*, 115(4), 591–635.
- Bain, A. (1855). *The senses and the intellect*. London, England: John W Parker & Son, West Strand.
- Bain, A. (1902). *The senses and the intellect*. 4^{ème} édition. New-York: Appleton and Company.
- Baldwin, J. M. (1897). *Le développement mental chez l'enfant et dans la race*. Alcan.
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 577–660.
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2002). *Neurosciences à la découverte du cerveau*. Éditions Pradel.
- Berthoz, A., & Debru, C. (2015). *Anticipation et prédiction: du geste au voyage mental*. Odile Jacob.
- Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J. P., & Coello, Y. (2011). Rôle des représentations motrices dans la perception visuelle des mouvements humains. *L'Année psychologique*, 111(2), 409–445.
- Björnsdotter, M., Löken, L., Olausson, H., Vallbo, Å., & Wessberg, J. (2009). Somatotopic organization of gentle touch processing in the posterior insular cortex. *Journal of Neuroscience*, 29(29), 9314–9320.
- Björnsdotter, M., Morrison, I., & Olausson, H. (2010). Feeling good: on the role of C fiber mediated touch in interoception. *Experimental Brain Research*, 207(3–4), 149–155.
- Björnsdotter, M., Morrison, I., & Olausson, H. (2010). Feeling good: on the role of C fiber mediated touch in interoception. *Experimental Brain Research*, 207(3–4), 149–155.
- Blakemore, S. J., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (1999). Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(5), 551–559.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D., & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself? *Neuroreport*, 11, 11–16.
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756.
- Brouillet, D., Michalland, A. H., Guerineau, R., Draushika, M., & Thebault, G. (2018). How does simulation of an observed external body state influence categorisation of an easily graspable object? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1747021818801484.
- Brouillet, D., Milhau, A., & Brouillet, T. (2015). When “good” is not always right: effect of the consequences of motor action on valence-space associations. *Frontiers in Psychology*, 6, 237.

- Buxbaum, L. J. (2001). Ideomotor Apraxia: A call to action. *Neurocase*, 7, 445–448.
- Byrge, L., Sporns, O., & Smith, L. B. (2014). Developmental process emerges from extended brain–body–behavior networks. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(8), 395–403.
- Cannon, P. R., Hayes, A. E., & Tipper, S. P. (2010). Sensorimotor fluency influences affect: Evidence from electromyography. *Cognition & Emotion*, 24(4), 681–691.
- Cans, C. (2000). Surveillance of cerebral palsy in Europe: a collaboration of cerebral palsy surveys and registers. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 42(12), 816–824.
- Canzano, L., Scandola, M., Gobetto, V., Moretto, G., D’Imperio, D., & Moro, V. (2016). The representation of objects in apraxia: From action execution to error awareness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 39.
- Canzano, L., Scandola, M., Pernigo, S., Aglioti, S. M., & Moro, V. (2014). Anosognosia for apraxia: Experimental evidence for defective awareness of one's own bucco–facial gestures. *Cortex*, 61, 148–157.
- Cardoso–Leite, P., Mamassian, P., Schütz–Bosbach, S., & Waszak, F. (2010). A new look at sensory attenuation: Action–effect anticipation affects sensitivity, not response bias. *Psychological Science*, 21(12), 1740–1745.
- 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.
- Casasanto, D. (2009). Embodiment of abstract concepts: good and bad in right–and left–handers. *Journal of Experimental Psychology: General*, 138(3), 351.
- Casasanto, D., & Chrysikou, E. G. (2011). When left is “right” motor fluency shapes abstract concepts. *Psychological Science*, 22(4), 419–422.
- Cascio, C. J. (2010). Somatosensory processing in neurodevelopmental disorders. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 2(2), 62.
- Case, L. K., Pineda, J., and Ramachandran, V. S. (2015). Common coding and dynamic interactions between observed, imagined, and experienced motor and somatosensory activity. *Neuropsychologia* 79, 233–245.
- Ceunen, E., Vlaeyen, J. W., & Van Diest, I. (2016). On the origin of interoception. *Frontiers in Psychology*, 7, 743.
- Chabrier, S., Peyric, E., Drutel, L., Deron, J., Kossorotoff, M., Dinomais, M., ... & Fluss, J. (2016). Multimodal outcome at 7 years of age after neonatal arterial ischemic stroke. *The Journal of Pediatrics*, 172, 156–161.
- Cole, J., Bushnell, M. C., McGlone, F., Elam, M., Lamarre, Y., Vallbo, Å., & Olausson, H. (2006). Unmyelinated tactile afferents underpin detection of low-force monofilaments. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 34(1), 105–107.
- Collins, D. F., Refshauge, K. M., Todd, G., & Gandevia, S. C. (2005). Cutaneous receptors contribute to kinesthesia at the index finger, elbow, and knee. *Journal of Neurophysiology*, 94(3), 1699–1706.
- Craig, A. D. (2002). How do you feel? Interoception: the sense of the physiological condition of the body. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(8), 655.
- Craig, A. D. (2003). Interoception: the sense of the physiological condition of the body. *Current Opinion in Neurobiology*, 13(4), 500–505.

- Craig, A. D. (2009). How do you feel—now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(1).
- Craïé, C., van Elk, M., Beeren, M., van Schie, H. T., Bekkering, H., & Steenbergen, B. (2010). Compromised motor planning and motor imagery in right hemiparetic cerebral palsy. *Research In Developmental Disabilities*, 31(6), 1313–1322.
- Damasio A. R. (1995). *L'erreur de Descartes. La raison des émotions*. Odile Jacob, Paris.
- Delhaye, B., Hayward, V., Lefèvre, P., & Thonnard, J. L. (2012). Texture-induced vibrations in the forearm during tactile exploration. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 6, 37.
- Depraz, N. (2006). Le paradigme éactif à l'épreuve de sa pragmatique expérientielle en première personne. *Intellectica*, 43(1), 59–65.
- Dignath, D., Pfister, R., Eder, A. B., Kiesel, A., & Kunde, W. (2014). Representing the hyphen in action–effect associations: Automatic acquisition and bidirectional retrieval of action–effect intervals. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(6), 1701–1712.
- Dinomais, M., Thébault, G., Hertz-Pannier, L., Gautheron, V., Fluss, J., & Chabrier, S. (2017). Is there an excess of left-handedness after neonatal stroke? *Cortex*, 96, 161-164.
- Edin, B. B. (2001). Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans. *The Journal of Physiology*, 531(1), 289–297.
- Ekstrand, C., Neudorf, J., Lorentz, E., Gould, L., Mickleborough, M., & Borowsky, R. (2017). More than a feeling: The bidirectional convergence of semantic visual object and somatosensory processing. *Acta Psychologica*, 181, 1–9.
- Elsner, B., & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(1), 229–240.
- Etcharry–Bouyx, F., Le Gall, D., Jarry, C., & Osiurak, F. (2017). Gestural apraxia. *Revue Neurologique*, 173(7–8), 430–439.
- Fagard, J. (2013). The nature and nurture of human infant hand preference. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1288(1), 114-123.
- Fourkas, A. D., Bonavolontà, V., Avenanti, A., & Aglioti, S. M. (2008). Kinesthetic imagery and tool-specific modulation of corticospinal representations in expert tennis players. *Cerebral Cortex*, 18(10), 2382–2390.
- Francis, S., Rolls, E. T., Bowtell, R., McGlone, F., O'Doherty, J., Browning, A., ... & Smith, E. (1999). The representation of pleasant touch in the brain and its relationship with taste and olfactory areas. *Neuroreport*, 10(3), 453–459.
- Friston, K. (2010). The free–energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127.
- Gallese, V. (2011). Embodied simulation theory: imagination and narrative. *Neuropsychanalysis*, 13(2), 196–200.
- Gallese, V., & Goldman, A. (1998). Mirror neurons and the simulation theory of mind–reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(12), 493–501.
- Gapenne, O. (2014). The co–constitution of the self and the world: action and proprioceptive coupling. *Frontiers in Psychology*, 5, 594.
- Gerald, E. (1992). *Biologie de la conscience*. Odile Jacob, Paris.

- Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69(6), 477.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA.
- Glenberg, A. M., & Kaschak, M. P. (2002). Grounding language in action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(3), 558–565.
- Goldenberg, G. (1995). Imitating gestures and manipulating a manikin: The representation of the human body in ideomotor apraxia. *Neuropsychologia*, 33, 63–72.
- Goodman, J. M., & Bensmaia, S. J. (2018). The Neural Basis of Haptic Perception. *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience, Sensation, Perception, and Attention*, 201.
- Gottlieb, G. (1992). *Individual development and evolution: The genesis of novel behavior*. New York: Oxford University Press.
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideomotor mechanism. *Psychological Review*, 77 (2), 73–99.
- Hadders-Algra, M. (2000). The neuronal group selection theory: promising principles for understanding and treating developmental motor disorders. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 42(10), 707-715.
- Harleß, E. (1861). Der apparat des willens. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 38(50–73), 47.
- Hauf, P., & Aschersleben, G. (2008). Action–effect anticipation in infant action control. *Psychological Research*, 72(2), 203–210.
- Held, R., & Hein, A. (1963). Movement–produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 56(5), 872.
- Hemachudha, T., Laothamatas, J., & Rupprecht, C. E. (2002). Human rabies: a disease of complex neuropathogenetic mechanisms and diagnostic challenges. *The Lancet Neurology*, 1(2), 101–109.
- Herbart, J. F. (1825). *Psychologie als Wissenschaft: neu gegründet auf Erfahrung, Metaphysik und Mathematik* (Vol. 2). AW Unzer.
- Herbert, B. M., & Pollatos, O. (2014). Attenuated interoceptive sensitivity in overweight and obese individuals. *Eating Behaviors*, 15(3), 445–448.
- Herwig, A., & Waszak, F. (2012). Action–effect bindings and ideomotor learning in intention– and stimulus–based actions. *Frontiers in Psychology*, 3, 444.
- Hoffmann, J., Lenhard, A., Sebald, A., & Pfister, R. (2009). Movements or targets: What makes an action in action–effect learning?. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(12), 2433–2449.
- Von Hofsten, C. (2004). An action perspective on motor development. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(6), 266-272.
- Von Hofsten, C. (2007). Action in development. *Developmental Science*, 10(1), 54-60.
- Hommel, B. (1996). The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects. *Psychological Research*, 59(3), 176–186.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 849–878.

- Hoover, A. E., & Harris, L. R. (2012). Detecting delay in visual feedback of an action as a monitor of self recognition. *Experimental Brain Research*, 222(4), 389–397.
- Hughes, G., & Waszak, F. (2011). ERP correlates of action effect prediction and visual sensory attenuation in voluntary action. *Neuroimage*, 56(3), 1632–1640.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*, Vol. 2. NY, US: Henry Holt and Company.
- James, W. (1909). *Précis de psychologie*. Paris : Marcel Rivière.
- Janczyk, M., Durst, M., & Ulrich, R. (2017). Action selection by temporally distal goal states. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(2), 467–473.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, 14(1), S103–S109.
- Jenni, O. G., Chaouch, A., Caflisch, J., & Rousson, V. (2013). Correlations between motor and intellectual functions in normally developing children between 7 and 18 years. *Developmental Neuropsychology*, 38(2), 98–113.
- Johansson, R. S., & Flanagan, J. R. (2009). Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(5), 345.
- Johansson, R. S., & Vallbo, A. B. (1979). Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *The Journal of Physiology*, 286(1), 283–300.
- Jordan, J. S. (2013). The wild ways of conscious will: What we do, how we do it, and why it has meaning. *Frontiers in Psychology*, 4, 574.
- Jordan, J. S., & Ghin, M. (2006). (Proto-) consciousness as a contextually emergent property of self-sustaining systems. *Mind and Matter*, 4(1), 45–68.
- Jouen, F., & Molina, M. (2007). *Naissance et connaissance: la cognition néonatale*. Editions Mardaga.
- Kühn, S., Werner, A., Lindenberger, U., & Verrel, J. (2014). Acute immobilisation facilitates premotor preparatory activity for the non-restrained hand when facing grasp affordances. *NeuroImage*, 92, 69–73.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 387.
- Kunde, W. (2003). Temporal response-effect compatibility. *Psychological Research*, 67(3), 153–159.
- Kunde, W., Koch, I., & Hoffmann, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection, initiation, and execution of actions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 57(1), 87–106.
- Ladwig, S., Sutter, C., & Müsseler, J. (2012). Crosstalk between proximal and distal action effects when using a tool. *Journal of Psychology*, 220, 10–15.
- Lancel, S., Martin, S., Thébault, G. (2017). Influence des effets tactiles dans les comportements précoces du nourrisson. Communication affichée présentée au Workshop TRACE. Nanterre.
- Laycock, T. (1840). *A treatise on the nervous diseases of women; comprising an inquiry into the nature, causes, and treatment of spinal and hysterical disorders*. London: Longmans.
- Legrand, D. (2005). Le soi corporel. *L'Evolution Psychiatrique*, 70(4), 709–719.

- Liljencrantz, J., & Olausson, H. (2014). Tactile C fibers and their contributions to pleasant sensations and to tactile allodynia. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 8, 37.
- Loeffler, J., Raab, M., & Cañal-Bruland, R. (2016). A lifespan perspective on embodied cognition. *Frontiers in Psychology*, 7, 845.
- Lotze, R. H. (1852). *Medizinische Psychologie oder Physiologie der Seele* (pp. 287–325). Leipzig, Germany: Weidmannsche Buchhandlung.
- Manfredi, L. R., Saal, H. P., Brown, K. J., Zielinski, M. C., Dammann III, J. F., Polashock, V. S., & Bensaïa, S. J. (2014). Natural scenes in tactile texture. *Journal of Neurophysiology*, 111(9), 1792–1802.
- Marzoli, D., Menditto, S., Lucafò, C., & Tommasi, L. (2013). Imagining others' handedness: visual and motor processes in the attribution of the dominant hand to an imagined agent. *Experimental Brain Research*, 229(1), 37–46.
- Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1980). Autopoiesis: The organization of the living. *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*, 42, 59–138.
- McGlone, F., Vallbo, A. B., Olausson, H., Loken, L., & Wessberg, J. (2007). Discriminative touch and emotional touch. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 61(3), 173.
- McNevin, N. H., Shea, C. H., & Wulf, G. (2003). Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. *Psychological Research*, 67(1), 22–29.
- McNevin, N. H., Shea, C. H., & Wulf, G. (2003). Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. *Psychological Research*, 67(1), 22–29.
- Merleau-Ponty, M. (1976). *Phénoménologie de la perception* (1945). Paris, Éditions Gallimard.
- Michalland, A., Thébault, G., Briglia, J., Fraise, P., & Brouillet, D. (2019). Grasping a chestnut burr: Manual laterality in action's coding strategies. *Experimental Psychology*.
- Milhau, A., Brouillet, T., & Brouillet, D. (2015). Valence–space compatibility effects depend on situated motor fluency in both right–and left–handers. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(5), 887–899.
- Milne, R. J., Aniss, A. M., Kay, N. E., & Gandevia, S. C. (1988). Reduction in perceived intensity of cutaneous stimuli during movement: a quantitative study. *Experimental Brain Research*, 70(3), 569–576.
- Molina, M., & Jouen, F. (2014). Les compétences précoces des nourrissons: réalité ou illusion d'un point de départ. *Enfance*, (3), 263–281.
- Molina, M., Kudlinski, C., Guilbert, J., Spruijt, S., Steenbergen, B., & Jouen, F. (2015). Motor imagery for walking: A comparison between cerebral palsy adolescents with hemiplegia and diplegia. *Research in Developmental Disabilities*, 37, 95–101.
- Morrison, I., Löken, L. S., Minde, J., Wessberg, J., Perini, I., Nennesmo, I., & Olausson, H. (2011). Reduced C-afferent fibre density affects perceived pleasantness and empathy for touch. *Brain*, 134(4), 1116–1126.
- Murias, K., Brooks, B., Kirton, A., & Iaria, G. (2014). A review of cognitive outcomes in children following perinatal stroke. *Developmental Neuropsychology*, 39(2), 131–157.
- Myowa-Yamakoshi, M., & Takeshita, H. (2006). Do human fetuses anticipate self-oriented actions? A study by four-dimensional (4D) ultrasonography. *Infancy*, 10(3), 289–301.

- Niedenthal, P. M., Mermillod, M., Maringer, M., & Hess, U. (2010). The Simulation of Smiles (SIMS) model: Embodied simulation and the meaning of facial expression. *Behavioral and Brain Sciences*, 33(6), 417-433.
- Olausson, H., Cole, J., McGlone, F., Kramer, H., Rylander, K., Stark, G., & Wallin, B. G. (2007). CT afferents, affective touch and interoception. *Clinical Neurophysiology*, 5(118), e162.
- Olausson, H., Lamarre, Y., Backlund, H., Morin, C., Wallin, B. G., Starck, G., ... & Bushnell, M. C. (2002). Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex. *Nature Neuroscience*, 5(9), 900.
- Olausson, H., Wessberg, J., McGlone, F., & Vallbo, Å. (2010). The neurophysiology of unmyelinated tactile afferents. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2), 185–191.
- O'Regan, J. K. (2011). *Why red doesn't sound like a bell: Understanding the feel of consciousness*. Oxford University Press.
- O'Regan, J. K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939–973.
- Orgs, G., Kirsch, L., & Haggard, P. (2013). Time perception during apparent biological motion reflects subjective speed of movement, not objective rate of visual stimulation. *Experimental Brain Research*, 227(2), 223–229.
- Osiurak, F. (2013). Apraxia of tool use is not a matter of affordances. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 890.
- Osiurak, F. (2014). What neuropsychology tells us about human tool use? The four constraints theory (4CT): mechanics, space, time, and effort. *Neuropsychology Review*, 24(2), 88–115.
- Pellicano, A., Thill, S., Ziemke, T., & Binkofski, F. (2011). Affordances, adaptive tool use and grounded cognition. *Frontiers in psychology*, 2, 53.
- Petitmengin, C. (2006). L'énaction comme expérience vécue. *Intellectica*, 43(1), 85–92.
- Pfister, R. (2019). Effect-based action control with body-related effects: Implications for empirical approaches to ideomotor action control. *Psychological Review*, 126(1), 153.
- 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.
- Pfister, R., Kiesel, A., & Hoffmann, J. (2011). Learning at any rate: Action-effect learning for stimulus-based actions. *Psychological Research*, 75(1), 61–65.
- Piaget, J. (1967). *Biologie et connaissance : essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs*. Paris : Gallimard.
- Piaget, J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Neuchâtel; Paris : Delachaux et Niestlé.
- Poapongsakorn, P., & Kanchanomai, C. (2011). Time-dependent deformation of closed-cell PVC foam. *Journal of Cellular Plastics*, 47(4), 323–336.
- Prinz, W. (1992). Why don't we perceive our brain states?. *European Journal of Cognitive Psychology*, 4(1), 1–20.
- Proske, U., & Gandevia, S. C. (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews*, 92(4), 1651–1697.


- R Core Team. (2014). R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Reissland, N., Francis, B., Aydin, E., Mason, J. & Schaal, B. The development of anticipation in the fetus: A longitudinal account of human fetal mouth movements in reaction to and anticipation of touch. *Developmental Psychobiology*, 56, 955–963 (2014).
- Reznik, D., Henkin, Y., Levy, O., & Mukamel, R. (2015). Perceived loudness of self-generated sounds is differentially modified by expected sound intensity. *PloS one*, 10(5), e0127651.
- Ribot, T. (1896). L'abstraction des émotions. *L'Année Psychologique*, 3(1), 1–9.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9), 661.
- Rosenbaum, P., Paneth, N., Leviton, A., Goldstein, M., Bax, M., Damiano, D., ... & Jacobsson, B. (2007). A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Developmental Medicine & Child Neurology, Supplement 109*, 8–14.
- Rothi, L. J. G., Ochipa, C., & Heilman, K. M. (1991). A cognitive neuropsychological model of limb praxis. *Cognitive Neuropsychology*, 8, 443–458.
- Roussel, C., Hughes, G., & Waszak, F. (2013). A preactivation account of sensory attenuation. *Neuropsychologia*, 51(5), 922–929.
- Roussel, C., Hughes, G., & Waszak, F. (2014). Action prediction modulates both neurophysiological and psychophysical indices of sensory attenuation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 115.
- Sato, A. (2008). Action observation modulates auditory perception of the consequence of others' actions. *Consciousness and Cognition*, 17(4), 1219–1227.
- Scandola, M., Aglioti, S. M., Avesani, R., Bertagnoni, G., Marangoni, A., & Moro, V. (2019). Anticipation of wheelchair and rollerblade actions in spinal cord injured people, rollerbladers, and physiotherapists. *PLoS one*, 14(3), e0213838.
- Shao, Y., Hayward, V., & Visell, Y. (2016). Spatial patterns of cutaneous vibration during whole-hand haptic interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 4188–4193.
- Shen, H., & Sengupta, J. (2012). If you can't grab it, it won't grab you: The effect of restricting the dominant hand on target evaluations. *Journal of Experimental Social Psychology*, 48(2), 525–529.
- Sherrington, C. S. (1906). Observations on the scratch-reflex in the spinal dog. *The Journal of Physiology*, 34(1–2), 1–50.
- Sheya, A., & Smith, L. B. (2009) Development through sensory-motor coordinations. In J. Stewart, O. Gapenne, & E. Di Paolo (Eds.), *Enaction: Towards a new paradigm for cognitive science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Shimada, S., Qi, Y., & Hiraki, K. (2010). Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements. *Experimental Brain Research*, 201(2), 359–364.
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, 136(6), 943.
- Sieratzki, J. S., & Woll, B. (2002). Toddling into language: precocious language development in motor-impaired children with spinal muscular atrophy. *Lingua*, 112(6), 423–433.
- Smith, L. B. (2005a). Cognition as a dynamic system: Principles from embodiment. *Developmental Review*, 25(3-4), 278–298.

- Smith, L. B. (2005b). Action alters shape categories. *Cognitive Science*, 29(4), 665–679.
- Smith, L. B., Thelen, E., Titzer, R., & McLin, D. (1999). Knowing in the context of acting: the task dynamics of the A–not–B error. *Psychological Review*, 106(2), 235.
- Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo–motor action. *Psychological Research*, 68(2–3), 176–188.
- Studer, M., Boltshauser, E., Mori, A. C., Datta, A., Fluss, J., Mercati, D., ... & Ramelli, G. P. (2014). Factors affecting cognitive outcome in early pediatric stroke. *Neurology*, 82(9), 784–792.
- Sutter, C., & Ladwig, S. (2012). Mirrored visual feedback limits distal effect anticipation. *Experimental Brain Research*, 218, 247–258.
- Thébault, G. (2017). *Développement post infarctus cérébral artériel néonatal : Motricité vs. Action – Apport de la cohorte AVCnm*, Thèse Doctotat, Université Jean Monnet, Saint-Étienne.
- Thébault, G., Michalland, A. H., Derozier, V., Chabrier, S., & Brouillet, D. (2018a). When the vibrations allow for anticipating the force to be produced: An extend to Pfister et al.(2014). *Experimental Brain Research*, 236(4), 1219–1223.
- Thébault, G., Martin, S., Brouillet, D., Brunel, L., Dinomais, M., Presles, É., ... & Décano, C. (2018b). Manual dexterity, but not cerebral palsy, predicts cognitive functioning after neonatal stroke. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 60(10), 1045–1051.
- Thébault, G., Pfister, R., Michalland, A.H., & Brouillet, D. (En révision, a). Influence of tactile effects on action production: An extend of Kunde et al. (2014). *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Thébault, G., & Brouillet, D. (En révision, b). Motor fluency occurring during a movement influences the triggering of future movement. *Psychonomic Bulletin & Review*.
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1996). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT press.
- Thelen, E., Schönner, G., Scheier, C., & Smith, L. B. (2001). The dynamics of embodiment: A field theory of infant perseverative reaching. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 1–34.
- Thompson, E. (2005). Sensorimotor subjectivity and the enactive approach to experience. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4(4), 407–427.
- Thompson, E. (2007). *Mind in life: Biology, phenomenology, and the sciences of mind*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Tomassini, A., & Morrone, M. C. (2016). Perceived visual time depends on motor preparation and direction of hand movements. *Scientific Reports*, 6, 27947.
- Tomassini, A., Gori, M., Baud–Bovy, G., Sandini, G., & Morrone, M. C. (2014). Motor commands induce time compression for tactile stimuli. *Journal of Neuroscience*, 34(27), 9164–9172.
- Tucker, M., & Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(3), 830.
- Tuthill, J. C., & Azim, E. (2018). Proprioception. *Current Biology*, 28(5), R194–R203.
- Vallbo, Å. B., Olausson, H., & Wessberg, J. (1999). Unmyelinated afferents constitute a second system coding tactile stimuli of the human hairy skin. *Journal of Neurophysiology*, 81(6), 2753–2763.

- van der Meer, A. L. (1997). Visual guidance of passing under a barrier. *Infant and Child Development*, 6(3-4), 149-158.
- van Kemenade, B. M., Arikan, B. E., Kircher, T., & Straube, B. (2016). Predicting the sensory consequences of one's own action: first evidence for multisensory facilitation. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(8), 2515–2526.
- Varela, F. I., E. Thompson, and E. Rosch (1991), *Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Varela, F. J. (1992). Autopoiesis and a biology of intentionality. In *Proceedings of the workshop "Autopoiesis and Perception"* (pp. 4–14). Dublin City U.
- Varela, F. J. (1996). Neurophenomenology: A methodological remedy for the hard problem. *Journal of consciousness studies*, 3(4), 330–349.
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., & Martinerie, J. (2001). The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(4), 229.
- Verschuur, S. A., Spapé, M., Biro, S., & Hommel, B. (2013). From outcome prediction to action selection: developmental change in the role of action–effect bindings. *Developmental Science*, 16(6), 801–814.
- Verschuur, S. A., Weidema, M., Biro, S., & Hommel, B. (2010). Where do action goals come from? Evidence for spontaneous action–effect binding in infants. *Frontiers in Psychology*, 1, 201.
- Visetti, Y. M., & Rosenthal, V. (2006). Les contingences sensori–motrices de l'éraction. *Intellectica*, 43(1), 105–116.
- Von Gontard, A., Zerres, K., Backes, M., Laufersweiler–Plass, C., Wendland, C., Melchers, P., ... & Rudnik–Schöneborn, S. (2002). Intelligence and cognitive function in children and adolescents with spinal muscular atrophy. *Neuromuscular Disorders*, 12(2), 130–136.
- Waddington, C. H. (1957). *The Strategy of the Genes: a Discussion of Some Aspects of Theoretical Biology*. New-York: Macmillan.
- Walsh, L. D., Moseley, G. L., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2011). Proprioceptive signals contribute to the sense of body ownership. *The Journal of Physiology*, 589(12), 3009–3021.
- Williams, J., Anderson, V., Reid, S. M., & Reddihough, D. S. (2012). Motor imagery of the unaffected hand in children with spastic hemiplegia. *Developmental Neuropsychology*, 37(1), 84–97.
- Wirth, R., Pfister, R., Brandes, J., & Kunde, W. (2016). Stroking me softly: Body-related effects in effect-based action control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(6), 1755–1770.
- Wolfensteller, U., & Ruge, H. (2011). On the timescale of stimulus-based action–effect learning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(7), 1273–1289.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3(11s), 1212.
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880–1882.
- Wulf, G., Höß, M., & Prinz, W. (1998). Instructions for motor learning: Differential effects of internal versus external focus of attention. *Journal of Motor Behavior*, 30(2), 169–179.
- Yamada, Y., Kanazawa, H., Iwasaki, S., Tsukahara, Y., Iwata, O., Yamada, S., & Kuniyoshi, Y. (2016). An embodied brain model of the human foetus. *Scientific Reports*, 6, 27893.

- Yoo SS, Freeman DK, McCarthy JJ, Jolesz FA (2003). Neural substrates of tactile imagery: a functional MRI study. *Neuroreport* 14(4):581–585
- Yoshioka, T., Bensmaia, S. J., Craig, J. C., & Hsiao, S. S. (2007). Texture perception through direct and indirect touch: An analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration. *Somatosensory & Motor Research*, 24(1–2), 53–70.
- Yoshioka, T., Craig, J. C., Beck, G. C., and Hsiao, S. S. (2011). Yoshioka, T., Craig, J. C., Beck, G. C., & Hsiao, S. S. (2011). Perceptual constancy of texture roughness in the tactile system. *Journal of Neuroscience*, 31(48), 17603–17611.. *Journal of Neurosciences*, 31, 17603–17611.
- Ziessler, M., & Nattkemper, D. (2011). The temporal dynamics of effect anticipation in course of action planning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(7), 1305–1326.
- Zoia, S., Blason, L., D’Ottavio, G., Bulgheroni, M., Pezzetta, E., Scabar, A., & Castiello, U. (2007). Evidence of early development of action planning in the human foetus: a kinematic study. *Experimental Brain Research*, 176(2), 217–226.
- Zwaan, R. A., Stanfield, R. A., & Yaxley, R. H. (2002). Language comprehenders mentally represent the shapes of objects. *Psychological Science*, 13(2), 168–171.

How does simulation of an observed external body state influence categorisation of an easily graspable object?

Quarterly Journal of Experimental Psychology
1–12
© Experimental Psychology Society 2018
Article reuse guidelines:
sagepub.com/journals-permissions
DOI: 10.1177/1747021818801484
qjep.sagepub.com


Denis Brouillet¹, Arthur-Henri Michalland^{1,2}, Ronan Guerineau⁴,
Mooruth Draushika¹ and Guillaume Thebault^{1,3}

Abstract

Several works have provided evidence of a resonant motor effect while observing a hand interacting with painful stimuli. The aim of this work is to show that participants are sensitive to the observation of an injured hand when they have to categorise an easily graspable object with their own hand. In Experiment 1, participants indicated whether or not photographs of objects (graspable or non-graspable, left or right oriented) could be grasped with their dominant hand, by tapping a key on a keyboard. Target objects were preceded by primes consisting of photographs of hands (injured vs healthy) in a grasping posture (power grasp). Experiment 2 consisted of two phases: In the first phase, participants had to categorise square or circle shapes. After their response (Group 1: tapping a key vs Group 2: constricting a hand grip), photograph of two types of hand (injured vs healthy) was displayed on the computer screen. In the second phase, participants had to indicate whether objects could be easily grasped with their dominant hand. Target objects were preceded by primes (square and circle) as shown in the first phase. Results show that response times were slower when the graspable target objects were right oriented and preceded by the photograph or a geometric shape associated with an injured hand. This response delay was accentuated in the handgrip condition. These results highlight that the view of an injured hand activates motor programme and pain mechanisms associated with participants relative to the consequences of the simulated grasping action.

Keywords

Simulation; injured hand; action consequences; pain; graspable objects

Received: 10 October 2017; revised: 6 June 2018; accepted: 19 July 2018

According to the embodied approach to cognition (Barsalou, 2010), when we interact with an object, we code motor and sensory components required to perform the expected action (Ambrosini, Scorolli, Borghi, & Costantini, 2012; Bonfiglioli, Finocchiaro, Gesierich, Rositani, & Vescovi, 2009; Borghi, 2004, 2005; Borghi & Cimatti, 2010; Borghi & Riggio, 2009; D. Brouillet, Vagnot et al., 2015; T. Brouillet, Heurley, Martin, & Brouillet, 2010; Camus, Brouillet, & Brunel, 2016; Fischer & Zwaan, 2008; Glenberg & Gallese, 2012; Jirak, Menz, Buccino, Borghi, & Binkofski, 2010; Kent & Lamberts, 2008; Labeye, Oker, Badard, & Versace, 2008; Noë, 2004; Slotnick, 2004). Thus, the theory of event coding (Hommel, 1997, 1998, 2001, 2004, 2015; Hommel & Elsner, 2009; Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; Prinz, 1990, 1997) proposes that perceived events (i.e., perceptual components) and

action events (i.e., motor components) are integrated in a unified representation and share common neural codes. A neuroimaging study (Kühn, Keizer, Colzato, Rombouts, & Hommel, 2011) supports the evidence that repeating a

¹Epsilon Laboratory, University Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France

²LIRMM, CNRS, Interactive Digital Humans, University Montpellier, Montpellier, France

³SAINBIOSE—INSERM U 1059, Dysfonction Vasculaire et Hémostase, University Jean-Monnet, Saint-Etienne, France

⁴CeRSM, Paris Nanterre University, France

Corresponding author:

Denis Brouillet, Epsilon Laboratory, University Paul Valéry Montpellier 3, Route de Mende, 34199 Montpellier Cedex 5, France.
Email: denis.brouillet@univ-montp3.fr

ANNEXE 2

Running head: MANUAL LATERALITY IN ACTION'S CODING STRATEGIES

1

Grasping a chestnut burr: Manual laterality in action's
coding strategies

Arthur-Henri Michalland^{1,2}; Guillaume Thébault^{1,3}; Johan Briglia¹; Philippe Fraise²; Denis
Brouillet¹

MANUAL LATERALITY IN ACTION'S CODING STRATEGIES

2

Abstract

This work aimed to assess the role of manual laterality in action coding strategies and, subsequently, in environmental features relevant for each hand's action. Relying on Eder and Hommel's (2013) proposal, we distinguished stimulus-related and end state-related consequences in a Simon paradigm where right-handed participants were divided in two groups, one responding with gloves and one without. Two objects were presented pictorially: one for which sensory consequences of grasping were negatively valenced (a chestnut burr), and one for which they were positively valenced (an apricot). By these means, stimulus and end-state effects could be assessed separately, along with the relevance of each feature of the experimental settings. Results showed that the use of one's dominant or non dominant hand gives rise to different repercussions of stimulus-related and end state-related effects on response: Responses made with the right (dominant) hand were based on an elaborated coding (representing features of stimulus-related and end state-related consequences of action). In contrast, responses made with the left (non dominant) hand seemed to be based on a less elaborated coding (not taking into account end-state consequences of an action).

Keywords: manual laterality, grasping, coding strategies, action

Manual dexterity, but not cerebral palsy, predicts cognitive functioning after neonatal stroke

GUILLAUME THÉBAULT^{1,2}  | SOPHIE MARTIN² | DENIS BROUILLET² | LIONEL BRUNEL² | MICKAËL DINOMAS^{3,4} | ÉMILIE PRESLES¹ | JOEL FLUSS⁵ | STÉPHANE CHABRIER^{1,6} | AVCNN STUDY GROUP*

1 INSERM, UMR1059 Sainbiose, University of Saint-Étienne, University of Lyon, Saint-Étienne; **2** University Paul Valéry Montpellier 3, University Montpellier, Montpellier; **3** Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés (LISA), University of Angers, Angers; **4** Physical and Rehabilitation Medicine Department, LUNAM, CHU Angers, Angers, France. **5** Paediatric Neurology Unit, Geneva University Hospitals, Geneva, Switzerland. **6** Paediatric Physical and Rehabilitation Medicine Department, French Centre for Paediatric Stroke, INSERM CIC1408, CHU Saint-Étienne, Saint-Étienne, France.

Correspondence to Guillaume Thébault at Université Paul Valéry Montpellier 3, Laboratory Epsilon EA 4556, 34090 Montpellier, France. E-mail: guillaume.thebault@univ-st-etienne.fr

*See Appendix S1 (online supporting information) for names and affiliations of the AVCnn Study Group.

PUBLICATION DATA

Accepted for publication 6th February 2018.
Published online

ABBREVIATIONS

BBT	Box and Blocks Test
BFMF	Bimanual Fine Motor Function
FSIQ	Full-scale IQ
MDI	Manual Dexterity Index
NAIS	Neonatal arterial ischaemic stroke
NHPT	Nine-Hole Peg Test
PSI	Processing Speed Index
SES	Socio-economic status
WISC-IV	Wechsler Intelligence Scale for Children, Fourth Edition
WMI	Working Memory Index

AIM To disentangle the respective impacts of manual dexterity and cerebral palsy (CP) in cognitive functioning after neonatal arterial ischaemic stroke.

METHOD The population included 60 children (21 females, 39 males) with neonatal arterial ischaemic stroke but not epilepsy. The presence of CP was assessed clinically at the age of 7 years and 2 months (range 6y 11mo–7y 8mo) using the definition of the Surveillance of CP in Europe network. Standardized tests (Nine-Hole Peg Test and Box and Blocks Test) were used to quantify manual (finger and hand respectively) dexterity. General cognitive functioning was evaluated with the Wechsler Intelligence Scale for Children, Fourth Edition. Simple and multiple linear regression models were performed while controlling for socio-economic status, lesion side, and sex.

RESULTS Fifteen children were diagnosed with CP. In simple regression models, both manual dexterity and CP were associated with cognitive functioning ($\beta=0.41$ [$p=0.002$] and $\beta=-0.31$ [$p=0.019$] respectively). However, in multiple regression models, manual dexterity was the only associated variable of cognitive functioning, whether or not a child had CP ($\beta=0.35$; $p=0.007$). This result was reproduced in models with other covariables ($\beta=0.31$; $p=0.017$).

INTERPRETATION As observed in typically developing children, manual dexterity is related to cognitive functioning in children having suffered a focal brain insult during the neonatal period.

Studies on cognitive and motor development after perinatal stroke provide interesting insights not only into the capacity, but also into the limits of brain plasticity.¹ However, debate still persists on the impact of early brain focal insult on later cognitive outcome. Some studies have reported a decrease of cognitive functioning, emphasizing brain vulnerability.² Other studies have shown stability in cognitive scores, suggesting that the developing brain can buffer the effect of an early focal insult.³

In most studies, the determinants of outcome have been primarily focused on presumably deleterious factors (lesion size or diagnosis of epilepsy, or a disorder of motor function like cerebral palsy [CP]),^{1,4,5} but potentially protective factors have not been addressed. In addition, several studies have included various perinatal stroke syndromes where the timing, localization, and type of insults are diverse. Neonatal arterial ischaemic stroke (NAIS) represents a unique model to study the impact of an early brain insult

on development, as the lesion and its timing are well circumscribed.^{6,7}

In typically developing children, cognitive development is related to early sensorimotor abilities and experiences.⁸ At 3 months, the motor repertoire is correlated with global intelligence, attention, and visual–motor integration at school age.⁹ In children with early brain insult, CP and epilepsy segregate with lower cognitive functioning,^{1,10} while high socio-economic status (SES) is protective.¹¹ Yet despite this generally accepted overview, the intimate relation between motor and cognitive functioning deserves further exploration.

In summary, studying children with NAIS may allow disentanglement of the respective contributions of CP on its own and manual dexterity to childhood cognitive functioning. We hypothesized (1) that a diagnosis of CP and manual dexterity are both associated with cognitive functioning; (2) that these associations are mutually

RÉSUMÉ

Le travail de thèse que nous avons réalisé se proposait d'étudier l'anticipation des effets reliés au corps. La théorie idéomotrice de James (1890) qui soutient que c'est l'idée du mouvement qui déclenche une action constitue le sous-bassement théorique de cette thèse. Dans le prolongement des rares travaux portant sur l'anticipation des effets reliés au corps, nous avons émis l'hypothèse que les effets tactiles et proprioceptifs étaient anticipés en fonction de la manière dont était réalisée l'action. Plus précisément, nous avons étudié dans une première expérience l'effet d'une contingence d'intensité entre une réponse et un effet tactile ; une seconde expérience a porté sur le phénomène d'atténuation proprioceptive à partir d'un effet tactile ; une troisième expérience a mis l'emphase sur l'anticipation de la fluence motrice, comprise comme un effet proprioceptif fourni au cours du mouvement. Ces expériences ont été enrichies de deux autres études portant sur (1) l'anticipation d'un effet tactile concomitant avec l'action et (2) le jugement perceptif d'un effet tactile. Enfin, nous avons entrepris d'appliquer ces recherches dans le développement de l'enfant et dans le domaine de la déficience motrice suite à une lésion cérébrale. Pris ensemble, les données empiriques de ces travaux mettent en lumière le rôle des effets reliés au corps dans l'anticipation de l'action. Ces résultats sont discutés au regard des théories récentes sur la prédiction des effets de l'action d'où émerge la notion de temporalité et fournissent une contribution supplémentaire à l'idée motrice de James. En outre, elles offrent un cadre théorique pertinent afin d'étudier les effets reliés au corps dans le champ de la lésion cérébrale. Enfin, en nous appuyant sur les données obtenues ainsi que sur leur discussion en termes de prédiction, nous proposons des perspectives de recherche auprès de personnes présentant une déficience motrice, des troubles d'utilisation des objets ou des enfants ayant eu un accident vasculaire cérébral artériel néonatal.

ABSTRACT

The following thesis proposes to study the anticipation of body-related effects. Our work is based on the ideomotor theory (James, 1890) in which the idea of movement triggers an action. Following the few studies on the anticipation of body-related effects, we hypothesized that tactile and proprioceptive effects were anticipated depending on how the action was performed. More precisely, we have studied in a first experiment the effect of a contingency of intensity between a response and a tactile effect; a second experiment focused on the phenomenon of proprioceptive attenuation from a tactile effect; a third experiment emphasized the anticipation of motor fluency, understood as a proprioceptive effect provided by movement. These experiments were enriched by two other studies on (1) the anticipation of a tactile effect during an action and (2) the perceptive judgment of a tactile effect. Finally, we have extended these studies into a child developmental perspective and in the field of motor impairment following brain injury. Taken together, the empirical evidence of this work highlights the role of body-related effects in anticipating an action. These results are discussed in light of recent theories on the prediction of effects of action, which rests on the notion of temporality. They provide an additional contribution of ideomotor action. In addition, they provide a relevant theoretical framework for studying body-related effects in the field of brain injury. Finally, based on our empirical data and their discussion in terms of prediction, we propose research perspectives in motor impairment, tool use disorders or children with a neonatal arterial ischemic stroke.