HAL open science

Étude des relations entre stimuli cognitifs et la motricité relative à un geste complexe

Tahar Rabahi

▶ To cite this version:

Tahar Rabahi. Étude des relations entre stimuli cognitifs et la motricité relative à un geste complexe. Education. Université Claude Bernard - Lyon I, 2014. Français. NNT : 2014LYO10023 . tel-01235874

HAL Id: tel-01235874

https://theses.hal.science/tel-01235874

Submitted on 30 Nov 2015

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 l'obtention d'un

Doctorat de l'Université Claude Bernard - Lyon 1

Spécialité

Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Présentée par

Tahar RABAHI

le 14 février 2014

ETUDE DES RELATIONS ENTRE STIMULI COGNITIFS ET LA MOTRICITÉ RELATIVE À UN GESTE COMPLEXE

Membres du Jury

Dr. Angela Sirigu, Institut des Sciences Cognitives, CNRS, UCBL
Pr. Pascale Tremblay, CRIUSMQ, Université Laval *(Rapporteuse)*
Dr. Claudine Olivier, IRPHIL, Université Lyon 3
Pr. Charalambos Papaxanthis, INSERM U1093, Université de Bourgogne *(Rapporteur)*
Pr. Angelo Gemignani, Département de Physiologie, Université de Pisa
Dr. Yves Paulignan, Institut des Sciences Cognitives, CNRS, UCBL
Dr. Patrick Fargier, CRIS, UCBL *(Co-Directeur de thèse)*
Pr. Raphael Massarelli, CRIS, UCBL *(Directeur de thèse)*

Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport (EA 647)

Résumé

Plusieurs travaux ont montré que les aires cortico-motrices, localisées dans le cortex frontal et responsables des mouvements volontaires, pouvaient être impliquées dans le processus de compréhension de mots d'action. De ce point de vue, il a été rapporté que la performance d'un acte moteur simple (*e.g.*: *attraper un objet*) pouvait être améliorée par la prononciation, la lecture ou l'écoute de mots évoquant une action. Nous avons approché la relation entre parole et action à travers l'étude de l'effet de verbes d'action ainsi que d'autres stimuli cognitifs, l'imagerie kinesthésique (IK) et la soustraction mentale (SM), sur la performance d'un acte moteur complexe, le Squat Vertical Jump (SVJ, ou saut vertical accroupi). Nous avons mesuré la hauteur du SVJ chez des hommes (7 expériences, n = 114) et des femmes (2 expériences, n = 41) à l'aide de deux systèmes de mesure, l'Optojump® et le Myotest®. Les résultats ont montré que la prononciation silencieuse et à haute voix du verbe d'action spécifique au SVJ (*saute*, conjugué à la première personne de l'impératif), ainsi que l'IK et la SM, améliorent significativement la performance du saut, chez les hommes (jusqu'à + 2,7 cm) et, de manière moins prononcée, chez les femmes (jusqu'à + 1 cm dans 2 expériences). Le reste des résultats obtenus avec les hommes ont indiqué que la prononciation du verbe d'action non spécifique au saut (*pince*) augmente également la hauteur en SVJ, alors que la prononciation ou l'écoute d'autres verbes sans lien avec le saut (*lèche*, *bouge*) n'ont pas eu d'effet significatif sur le SVJ. C'est également le cas du verbe d'état *''rêve''* et d'un verbe incompréhensible par les sujets (*tiào* : saute en Chinois) ou encore des verbes qui contredisent et/ou qui s'opposent au déroulement de l'action de sauter (*tombe* et *stoppe*). La hauteur du saut a été par ailleurs significativement impactée lorsque les sujets ont prononcé des verbes à fort attributs émotifs (*gagne* et son antonyme *perds*). Ces résultats indiquent que la performance d'un acte moteur complexe n'est pas exclusivement améliorée par le verbe d'action spécifique au SVJ *saute*, puisque des stimuli non langagiers, avec (IK) ou sans lien avec l'action (SM) ont pu avoir un effet positif sur le processus d'amélioration de la performance motrice, d'autant plus que des verbes n'évoquant en rien l'action et chargés émotionnellement ont eu le même effet sur la hauteur du SVJ, que le verbe d'action spécifique *''saute''*. Les résultats nous amènent à considérer l'hypothèse que l'amélioration de la performance d'un geste complexe soit dépendante, *à minima*, de l'*intention*, de l'*attention*, de l'*émotivité* et aussi, et peut être surtout, des *concepts* de l'individu (nous appelons concepts les anciennes représentations mentales), car ceux-ci sont induits par le traitement cérébral des mots.

Mots clés : verbes d'action, imagerie kinesthésique, calcul mental, performance motrice, cognition incarnée.

Several studies have shown that cortical motor areas, located in the frontal cortex and responsible for voluntary movement, might be involved in the process of understanding action words. From this point of view, it has been reported that the performance of a simple motor act (*e.g.*: *catching an object*) might be improved by the pronunciation, reading or listening to words referring to the action. We approached the relationship between speech and action through the study of the effect of action verbs and other cognitive stimuli, kinesthetic imagery (KI) and mental subtraction (MS), upon the performance of a complex motor act, the Squat vertical jump (SVJ). We measured the height of SVJ in young naive men (7 experiments, n = 114) and women (2 experiments, n = 41) using an Optojump® and a Myotest® apparatuses. The results showed that the silent and loud pronunciation of specific action verb to SVJ (jump), the KI and the MS improved significantly the performance of the movement, in men (up to 2.7 cm) but less in women (up to + 1 cm in the 2 experiments). The results of other experiments obtained with men indicated that pronunciation of the action verb nonspecific to the jump (*pinch*) increased also the SVJ performance, while the pronunciation or listening to other verbs unrelated to the jump (*lick*, *move*) had no significant effect on the SVJ. A meaningless verb for the French subjects (*tiáo* = jump in Chinese) showed, in turn, no effect as did *dream*, *fall* and *stop*. The verb *win* improved significantly the SVJ height as much as its antonym *lose*, thus suggesting a possible influence of affects in the subjects' performance. It appears that the effects of the specific action verb *jump* did seem effective but not totally exclusive for the enhancement of the SVJ performance, since non-linguistic stimuli (IK) or unrelated to action (MS) may have had a positive effect on the improvement in motor performance. Moreover verbs referring to emotion, unrelated to action, increased the height of SVJ similarly to the specific action verb *jump*. The results led us to consider the hypothesis that improving the performance of a complex gesture is dependent, *a minima*, upon the individual's *intention*, *attention*, *emotions* and also, and perhaps most importantly, *concepts* (we call concepts, the mental representations) as they may be induced by the cerebral processing of words.

Keywords: action verbs, kinesthetic imagery, mental subtraction, motor performance, embodied cognition.

A ceux à qui je ne pourrais jamais rendre leur sacrifice,
leur amour et leur affection pour moi
et à qui je souhaite une longue vie, mes Parents.

A ma Femme qui a su m'apporter son soutien et sa patience
tout au long de ce travail de recherche.

A mes Sœurs et Filleul(e)s, notamment la petite Sarah.

A tous mes Amis.

Avant-propos

Je tiens à remercier en premier mon directeur de thèse, le **Pr. Raphael Massarelli**, sans qui cette thèse n'aurait probablement jamais pu se réaliser. Merci de m'avoir ouvert les portes du CRIS et d'avoir cru en moi. Merci pour votre soutien tout au long de la thèse, pour vos conseils précieux, pour la confiance que vous m'avez accordé, pour votre attention et compréhension, pour votre générosité, pour votre disponibilité, pour vos encouragements dans les moments de doutes, pour votre entière implication, pour votre amitié … Je n'oublie pas mon co-directeur de thèse, le **Dr. Patrick Fargier**, qui m'a également apporté son soutien. Tes conseils et orientations m'ont été d'une grande aide. Ton sens du verbe et tes remarques et corrections très pointilleuses m'ont permis d'avancer à grand pas.

Merci à vous deux de m'avoir permis de participer à plusieurs congrès et rencontres en France (les journées scientifiques de l'EDISS en 2011 et 2012, les journées d'études sur la relation Homme-Animal en avril et octobre 2012 et notamment *le congrès international de la Société Française des Neurosciences* à Marseille en 2011 puis à Lyon en 2013) et à l'étranger (à Beyrouth en 2011 puis à Alger en 2013). J'espère que notre collaboration se poursuivra au-delà de la thèse.

Je souhaite également exprimer mes sincères remerciements à mes deux rapporteurs, le **Pr. Pascale Tremblay**, *directrice du Laboratoire des neurosciences de la parole et de l'audition au sein de l'Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec (Université Laval)* et le **Pr. Charalambos Papaxanthis**, *enseignant-chercheur au sein de l'unité INSERM 1093, Cognition, Action et Plasticité Sensorimotrice à l'université de Bourgogne,* d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

J'adresse mes cordiales remerciements au **Dr. Angela Sirigu**, *Directrice de Recherche du groupe de Neuropsychologie au CNRS de Bron*, et au **Dr. Claudine Olivier**, *maître de conférences en sciences du langage à l'Institut de Recherches Philosophiques de Lyon,* pour avoir bien voulu juger la qualité scientifique de ce manuscrit. Au **Dr. Yves Paulignan,** *responsable de l'équipe de recherche Cerveau et Langage à l'Institut des Sciences Cognitives de Bron,* ainsi qu'au **Pr. Angelo Gemignani** *du département de Physiologie à l'Université de Pisa en Italie*, j'adresse mes remerciements les plus sincères pour avoir accepté d'examiner ce travail de recherche.

Un grand merci à **Cyril Clouzeau**, responsable de *l'Unité Recherche à l'Institut Supérieur d'Ostéopathie de Lyon* ainsi qu'au **directeur** de cet établissement, **Mr. Jean Canetos**, de m'avoir accueilli, où la majorité de nos expérimentations ont eu lieu. Merci **Cyril** pour ton dynamisme et ta disponibilité.

A nos collaborateurs, le **Dr. Ahmad Saraj-Rifai**, **Mazen Kabbara** et **Fatima Khaled** du Liban et le **Dr. Hakim Hariti** et **Fahima Lammari** d'Alger, je leur exprime mes chaleureux remerciements et amitiés, pour le travail fourni et tous les bons moments passés ensemble.

Enfin, je n'oublie pas de porter une attention particulière et mes remerciements au centre de recherche qui m'a accueilli, le CRIS, à ses Directeurs successifs (**Professeur Thierry Terret** et **Professeur Christian Collet**), à tous ces membres ainsi qu'aux doctorants et étudiants que j'ai pu côtoyé, **Yoanne, Amine, Jessica, Emeline, Fateh, Sébastien, Emilie, Benjamin, Youcef, Romain** et bien d'autres. Je tiens à remercier plus particulièrement le **Dr. Isabelle Rogowski** et **Anne Ruby** pour leur aide logistique ainsi que le **Dr. Stéphane Champely** pour son aide précieuse dans le traitement statistique des données. Je n'oublie pas le **Dr. Karine Monteil** pour sa bonne humeur et qui est toujours disponible chaque fois que j'ai eu à la solliciter.

Sommaire

I. INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1. LES MECANISMES CEREBRAUX DE LA PAROLE 8

1.1. Neuro-anatomie fonctionnelle de la parole 9

1.1.1. Un court historique sur la découverte dans aires cérébrales de la parole 9

1.1.2. Les modèles classiques du traitement du langage 11

1.1.3. Le cerveau qui parle….....13

1.1.4. Des nouveaux modèles de neuro-anatomie fonctionnelle du langage 19

Compendium n°1.....24

1.2. Les liens fonctionnels entre aires corticales du langage et celles de l'action motrice 25

1.2.1. Effet de la parole sur l'activité du cortex moteur 26

1.2.2. Effet de l'action motrice sur les aires de la parole.....29

Compendium n°2.....32

Chapitre 2. PAROLE D'ACTION ET ACTION MOTRICE : Relation entre verbes et mots d'action et le cortex moteur 33

2.1. Etudes Cinématiques 33

Compendium n°3.....40

2.2. Etudes électrophysiologiques 41

Compendium n°4.....47

2.3. Etude d'imageries cérébrales 47

Compendium n°5.....52

2.4. Etudes par TMS 55

Compendium n°6.....61

Chapitre 3. COMPREHENSION DES VERBES D'ACTION : *Théorie de la cognition incarnée* 63

3.1. Comment la cognition explique-t-elle la compréhension des mots d'action ? 63

3.1.1. L'hypothèse sémantique.....65

Compendium n°7.....77

3.1.2. L'hypothèse de simulation.....78

Compendium n°8.....82

II. CADRE EXPERIMENTAL

Chapitre 4. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE TRAVAIL.....85

Chapitre 5. MATERIEL ET METHODES 88

5.1. Les sujets 88

5.2. La procédure expérimentale 88

5.2.1. Le mouvement choisi : Squat Vertical Jump 89

5.2.1. Le protocole expérimental 91

5.3. L'analyse statistique 92

5.4. Les expériences 92

Expérience 1 : sauts de sujets « Référence » 93

Expérience 2 : effet de la prononciation du verbe d'action spécifique ''saute'' sur la performance en SVJ.....93

Expérience 3 : effet de la lecture du verbe d'action ''saute'' sur la performance en SVJ 94

Expérience 4 : effet de la prononciation de verbes d'action non spécifiques sur la performance en SVJ 94

Expérience 5 : effet de l'écoute de verbes d'action spécifique et non spécifiques sur la performance en SVJ.....95

Expérience 6 : effet de la prononciation de verbes ayant une charge émotionnelle sur la performance en SVJ 95

Expérience 7 : effet de l'écoute des verbes contradictoires à ''saute'' sur la performance en SVJ 96

Chapitre 6. RESULTATS 97

6.1. Résultats des expériences obtenus chez les FEMMES : expérience 2 et 4 97

6.2. Résultats des expériences chez les FEMMES expertes obtenus avec nos collaborateurs algériens 100

6.3. Résultats des expériences obtenus chez les HOMMES : expérience 1 et 7 102

Expérience 1 : sauts de sujets « Référence » 102

Expérience 2 : effet de la prononciation du verbe d'action spécifique ''saute'' sur la performance en SVJ.....103

Expérience 3 : effet de la lecture du verbe d'action ''saute'' sur la performance en SVJ 105

Expérience 4 : effet de la pronocoiation de verbes d'action non spécifiques sur la performance en SVJ 107

Expérience 5 : effet de l'écoute de verbes d'action spécifique et non spécifiques sur la performance en SVJ.....108

Expérience 6 : effet de la prononciation de verbes ayant une charge émotionnelle sur la performance en SVJ 110

Expérience 7 : effet de l'écoute des verbes contradictoires à ''saute'' sur la performance en SVJ 111

Effet général des stimuli cognitif sur la hauteur en SVJ : Résumé des résultats 112

6.4. Résultats de l'effet de divers stimuli cognitifs obtenus avec nos collaborateurs libanais 144

III. DISCUSSION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Chapitre 7. DISCUSSION GENERALE 117

7.1. *Préambule* : quelles relation existe-t-elle stimuli cognitif et l'action motrice 118

7.1.1. Que sont-elles ces perceptions ?..... 120

7.1.2. Pourquoi la parole stimule l'action ?..... 123

7.1.3. Pourquoi s'intéresser à un mouvement complexe ?..... 124

7.1.4. Qu'entendons-nous par stimuli cognitif ? 125

7.2. Evidences expérimentales 126

7.2.1. Effet des verbes..... 126

7.2.1.1. Effet de l'entraînement..... 127

7.2.1.2. Verbes d'action 128

7.2.1.3. Verbes incompréhensible (nonsense).....129

7.2.1.4. Verbes à forts contenu émotif..... 129

7.2.1.5. Verbe décrivant un état mental *130*

7.2.1.6. Verbes s'opposant ou empêchant l'action *130*

7.2.1.7. Conclusion concernant l'effet des verbes *131*

7.2.2. Effet d'autres stimuli cognitifs *132*

7.2.3. Différence entre Hommes et Femmes *135*

7.2.3.1. Pourquoi de telles différences ? *137*

Chapitre 8. CONCLUSIONS (TEMPORAIRES) **138**

8.1. Comment définir un état de riposte ***144***

Chapitre 9. PERSPECTIVES **149**

BIBLIOGRAPHIE 151

PUBLICATIONS 172

I. INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1. LES MECANISMES CEREBRAUX DE LA PAROLE

Le premier chapitre de cette revue de question sera dédié à la compréhension des mécanismes cérébraux sous-tendant le traitement du langage. Dans un premier temps on développera l'historique de la neuro-anatomie fonctionnelle de l'organisation du langage, à partir des modèles classiques du 19ème siècle jusqu'aux plus récentes découvertes obtenues au début du 21ème siècle, notamment grâce aux développements des techniques d'investigation cérébrale. La seconde partie de ce chapitre sera consacrée aux liens fonctionnels qu'entreprennent les aires corticales du langage avec celles impliquées dans l'exécution du mouvement.

1.1. Neuro-anatomie fonctionnelle de la parole

La neuro-anatomie fonctionnelle est l'une des spécialités de l'anatomie qui étudie non seulement la morphologie mais aussi le fonctionnement du cerveau. Il sera notamment question dans cette partie du descriptif des aires corticales responsable de la fonction du langage.

1.1.1. Un court historique sur la découverte des aires cérébrales de la parole

Selon les travaux de Brodmann[1] (Brodmann, 1909 ; voir aussi l'atlas neuro-anatomiques de Talairach et Tornoux, 1988), il existe deux régions principales responsables du traitement du langage parlé qui se distinguent par une cyto-architecture différente des autres aires : 1. L'aire de *Broca* (Aire de Brodmann, AB44 et 45) située au niveau inférieur du cortex frontal, à proximité de l'aire motrice primaire (AB4 ou M1 pour motrice primaire) responsable des mouvements articulatoires de la bouche ; 2. L'autre région se situe aux alentours de la partie postérieure de l'aire

[1] *Korbinian Brodmann* (1868-1918) fut l'un des neuroanatomistes les plus influents de son époque. Il avait proposé une subdivision du cortex humain en cinquante-deux aires distinctes, sur la base des propriétés histologiques des neurones ainsi que leur rôle fonctionnel. Ainsi, l'aire de Broca, connue pour son rôle langagier est représentée par les aires de Brodmann 44 et 45 alors que les régions motrices se situent au niveau des aires de Brodmann 4 et 6.

supérieure temporale et pariétale inférieure[2], appelée aire de *Wernicke* (AB39 et AB40), voisinant le cortex auditif (AB41 et AB42).

L'aire de *Broca,* habituellement impliquée dans la production du langage oral, a été découverte par le médecin *Pierre Paul Broca*. Le 18 avril 1861, il présenta devant la *société d'anthropologie* à Paris, le cas d'un patient dénommé *Le Borgne* qui avait perdu la capacité de parler, et qui fut baptisé plus tard *Tan*, le seul mot qu'il était capable de prononcer. Après la mort de *Tan*, *Broca* trouva une lésion au niveau de son lobe frontal inférieur gauche (Figure 1A), certainement la cause de ses problèmes d'élocution. Cette région corticale prendra par la suite le nom du médecin.

La seconde aire impliquée dans le traitement du langage a été découverte en 1874 par le médecin allemand *Carl Wernicke*. En examinant deux patients qui venaient d'avoir un accident vasculaire cérébral, ce médecin constata une difficulté de compréhension de la parole, avec un discours fluide mais dépourvu de sens. Au décès de ces patients, *Carl Wernicke* découvrit une lésion dans la région postérieure du gyrus temporal supérieur (Figure 1B), qui selon lui contribuait au stockage auditif des mots, en raison de sa proximité avec l'aire temporale auditive. Cette région portera plus tard le nom d'aire associative[3] de *Wernicke*.

L'aire de *Broca* et de *Wernicke* sont reliées par plusieurs faisceaux de matière blanche, dont le plus important est *le faisceau arqué* (voir Figure 1B). Ce dernier est plus développé dans l'hémisphère gauche, donnant ainsi une place plus importante à cet hémisphère cérébral dans le traitement du langage (Catani *et al*, 2005).

On a démontré par la suite qu'un trouble du langage appelé *aphasie*, était consécutif à des lésions cérébrales présentes dans l'aire de Broca et dans celle de Wernicke. Une lésion dans l'aire de *Broca* produit, entre autre, une *aphasie* d'*expression* puisque le patient *Tan* avait beaucoup de mal à tenir un discours fluide ; alors que les

---

[2] Ils existent dans la littérature des avis différents quant à la localisation anatomique de l'aire de *Wernicke* (Binder et al, 1997 ; Ojemann et al, 2008 ; voir aussi Price, 2012).

[3] Selon les concepts de Korbinian Brodamnn, le cortex cérébral est constitué d'aires primaires spécialisées dont la motricité et les fonctions sensorielles. Le reste du cortex est essentiellement dévoué à des fonctions diverses et complexes regroupées dans des aires associatives notamment dans les cortex frontal et pariétal.

patients ayant une lésion dans l'aire de *Wernicke* présentent une *aphasie* de *réception*, entravant la compréhension du langage qui se manifeste par une difficulté à comprendre le langage oral et écrit mais aussi à proférer un discours cohérent (Gazzaniga et al, 2001).

1.1.2. Les modèles classiques du traitement du langage

La conception de l'organisation du langage établie par *Broca* et *Wernicke,* resta dominante au cours du 19^{éme} siècle et une bonne partie du 20ème siècle. D'autant plus que les deux médecins avaient contribué à instaurer l'un des premiers modèles explicatifs des mécanismes cérébraux du langage, dans lequel le traitement de l'information linguistique se référerait aux deux aires classiques du langage décrites ci-haut, *i.e.:* l'aire frontale inférieure de *Broca* et l'aire temporale supérieure de *Wernicke*, ainsi que le *faisceau arqué* qui les relie.

Ce modèle a été implémenté par les travaux de *Lichtheim* (1885, rapporté par Gazzaniga et al, 2001) incluant un troisième niveau ''théorique'' dédié au traitement sémantique des mots. Cet auteur introduisit l'idée d'un hypothétique « centre des concepts », qui, toutefois, n'a pas encore trouvé de localisation anatomique. Selon ce modèle, les sons correspondants aux mots entrent par le système auditif et l'information atterrit dans l'aire de *Wernicke*, siège des propriétés sonores des mots. A partir de là, le message linguistique est acheminé via le *faisceau arqué* jusqu'à l'aire de *Broca*, où les propriétés grammaticales des mots sont stockées (ceci a été confirmé par plusieurs auteurs ; pour revue: Gazzaniga et al, 2001 ; Weems et Reggia, 2006 ; Price, 2012). La compréhension des mots se fait alors au niveau d'un « siège » théorique de la conceptualisation (voir Gazzaniga et al, 2001).

Dans le cas de la production de la parole, ce centre conceptuel s'activerait en générant une représentation phonologique dans l'aire de *Wernicke* afin que l'aire de Broca programme l'activité articulatoire. D'après les prédictions de *Lichtheim* (1885), l'interruption du flux d'information suite à la lésion de l'un des trois centres (l'inconnu conceptuel et ceux de *Broca* et de *Wernicke*) ou de leurs connexions, induirait inévitablement plusieurs formes d'aphasie

Le modèle de *Lichtheim* resta dominant jusque dans les années 1970, date d'apparition des travaux du neuropsychologue américain *Norman Geschwind*. Ses recherches (voir sa revue de 1970) ont permis de préciser les voies neuro-anatomiques permettant le décodage des mots écrits ainsi que celles impliquées dans la production de la parole. Cette variante du modèle de *Wernicke* (appelé depuis modèle de *Wernicke-Geschwind*) stipule que la lecture des mots fait décharger les neurones de l'aire visuelle primaire du cortex occipital et transmet le flux d'information linguistique au gyrus angulaire et, par la suite, via le complexe *Wernicke - faisceau arqué,* à l'aire de *Broca*. (Figure 2). L'information, selon ce modèle, atteindra le cortex moteur dans le cas de la répétition à haute voix des mots.

À noter que le développement le plus significatif apporté par *Geschwind* au modèle de *Wernicke*, fut l'intégration des aires associatives de la région pariétale inférieure, tels que le gyrus angulaire et supramarginal, unissant les entrées visuelles et auditives.

La résultante de l'ensemble de ces modèles dits ''neurologiques'' (Posner et Raichle, 1998), donna naissance à la théorie d'organisation générale du langage de *Wernicke-Lichtheim-Geschwind*, qui bénéficie aujourd'hui d'une influence conséquente dans le domaine de l'étude des bases neuronales du langage, même si la définition des régions anatomiques impliquées restent incomplètes (pour revue voir Damasio et al, 2004). Selon cette théorie, l'aire de *Wernicke* serait le centre réceptif du langage, tandis que le traitement expressif se ferait au niveau de l'aire de *Broca*. En outre, le lobe pariétal inférieur, avec les gyrus angulaire et supramarginal, jouerait un rôle important dans la signification des mots, alors que le *faisceau arqué* est considéré comme essentiel pour la répétition des mots (Geschwind, 1965).

Ils existent par ailleurs d'autres modèles qui essayent de cadrer le déroulement du processus du langage humain en permettant de comprendre comment le cerveau parvient à traiter les mots, qu'ils soient lus (et donc vus) ou entendus. Dans cette optique, selon le modèle (qualifié de cognitif) de LaBerge et Samuels (1974), ce serait l'accès lexical qui nous permet d'activer les représentations mentales liées aux mots perçus. Cela reposerait sur une organisation parallèle des flux d'informations

linguistiques. Exprimé d'une autre façon, ce modèle suggère que le cerveau est capable de traiter maintes informations à la fois (voir : Posner et Raichle, 1998).

Ces représentations mentales, que les auteurs appellent également ''codes'', sont les éléments de base de ce modèle. La lecture d'un mot, active dans un premier temps les codes visuels, qui se chargeront de vérifier, par exemple l'orthographe du mot, alors que les codes phonologiques analysent le son émit par le mot, et sa signification est interprétée par les codes sémantiques (LaBerge et Samuels, 1974). De plus, les voies provenant des codes visuelles peuvent activer directement les représentations sémantiques sans pour autant passer par les voies phonologiques. Ceci diverge fortement avec les modèles neurologiques et notamment celui de Wernicke (1874) qui plaidait pour une organisation sérielle entre ces différentes voies, installant ainsi une chronologie dans le traitement des mots isolés et allant de l'analyse visuelle jusqu'à l'analyse sémantique en passant impérativement par le traitement phonologique.

Mis à part ces circuits classiques du traitement du langage que nous venons brièvement de rappeler, existerait-il d'autres aires cérébrales qui pourraient être impliquées dans ce complexe processus ? D'où vient l'idée que le langage prend ces racines en dehors des aires classiques du langage ? Telles seront les questions auxquelles on essayera de répondre dans la suite, à travers une revue de question consacrée à la localisation des aires cérébrales du langage lors de la prononciation, de l'écoute et de la lecture de mots isolés.

1.1.3. Le cerveau qui parle…..

L'idée de chercher d'autres contributions au traitement du langage, autres que celles données par les aires traditionnelles de Broca et de Wernicke, est venue suite aux observations cliniques réalisées sur des patients cérébrolésés (Ojemann, 1991 ; Nobre et al, 1994 ; Martin et al, 1995 ; Damasio et al, 1996 ; Silveri et al, 1997 ; Tranel et al, 1997, 1998 ; Grossman, 1998 ; Chatterjee et al, 1999 ; Saffran et Sholl, 1999; pour une revue voir Gazzaniga et al, 2001 ; Damasio et al, 2004). En effet, il a été rapporté que des patients ayant subi des lésions antérieures du lobe temporal gauche, avaient beaucoup

de difficulté à nommer des visages célèbres (Figure 3A ; Damasio et al, 1996). Si la même lésion est localisée dans l'hémisphère droit, la reconnaissance des visages est intacte, alors que la dénomination demeure perturbée (Figure 3C). Par ailleurs, ces mêmes auteurs, ont constaté une autre forme de trouble du langage, à savoir l'incapacité de se souvenir les mots relatifs à des objets manipulables, présentés visuellement (des outils) lorsque la lésion est située postérieurement, au niveau de la jonction temporo-occipitale gauche (Figure 3B). Enfin, une lésion du cortex inféro-temporal gauche a été fortement corrélée avec un déficit de dénomination de noms d'animaux (Damasio et al, 1996).

Il est intéressant de noter que toutes ces lésions engendrent différentes formes de troubles du langage malgré qu'elles soient loin des aires de Broca et Wernicke habituellement dédiées au langage, comme il a été suggéré soit par électrophysiologie (Ojemann, 1991 ; Nobre et al, 1994) que par imagerie cérébrale (Petersen et al, 1988 ; Mazoyer et al, 1993).

L'une des recherches qui a montré pour la première fois des images fonctionnelles d'un cerveau humain fut celle de Petersen et al (1988)[4]. Ces auteurs ont réalisé cette étude à l'aide de la TEP (Tomographie par Emission de Positrons), afin d'identifier les aires cérébrales activées lorsqu'on présentait des mots isolés à des sujets sains. La TEP étant une technique d'imagerie médicale permettant de visualiser l'activité cérébrale, à partir de la détection de rayonnements β^+ d'un électron positif, le *positron*, produite par un isotope radioactif à demi-vie très courte (^{15}O souvent[5]), administré aux sujets par voie intraveineuse.

Petersen et ses collègues (1988) ont ainsi testé un certain nombre de tâches linguistiques partagées sur quatre niveaux hiérarchiques, de la tâche cognitive la plus

[4] L'expérience de Petersen et al (1988) a été choisie dans cette partie de notre texte parce qu'elle présente un paradigme expérimental comprenant à la fois l'étude de modalités lues, écoutées et parlées du langage, comme dans notre expérimentation (*cf.* partie méthode). Par conséquent, cette expérience nous a permis de passer en revue les études sous-tendant ces modalités et ainsi les comparer à celles obtenues par Petersen et collègues. Cependant, il est utile de préciser que la méthodologie TEP ne permet pas de cerner avec précision les aires cérébrales impliquées au vu de sa faible résolution spatio-temporelle.

[5] Dans ce cas, sous forme de H_2O, la TEP mesure l'augmentation de flux hémodynamique, en ressemblance avec l'effet BOLD (voir § 2.3).

simple (**niveau 1** : fixer le signe moins ''-'' sur un écran) à la plus complexe (**niveau 4** : générer un verbe correspondant au nom écrit sur l'écran ou écouter via des hauts parleurs : *e.g.: clouer* en réponse à *marteau*), en passant par le **second niveau** où les sujets devaient lire ou écouter des noms communs, ainsi que le **troisième niveau** dédié à la prononciation des noms affichés sur l'écran. Ainsi et à travers ce design expérimental, les opérations cognitives ont été identifiées et surtout elles ont pu être analysées lors de l'enregistrement de l'activité corticale par TEP.

Ce type de protocole hiérarchique a permis à la fin de l'expérience de soustraire les images cérébrales enregistrées lors du **premier niveau** (fixer un symbole) de celle du **second niveau** (celui de la lecture ou de l'écoute de noms), pour isoler les aires corticales responsables de *la perception visuelle et auditive des mots* (tâche sensorielle). Pour cerner les zones cérébrales impliquées dans *la production de la parole* (tâche de prononciation), les images du **niveau 2** (celui de la lecture ou de l'écoute) ont été soustraites à celles du **niveau 3** (prononciation de noms). En soustrayant les activations obtenues au **troisième niveau** (celui de la prononciation) de celles obtenues au **quatrième niveau** (tâche d'association), les auteurs ont eu une indication sur le comment les circuits cérébraux accèdent à *la signification des mots*. Cette expérience a ainsi suggéré que les différentes tâches cognitives opérées activent des aires cérébrales distinctes, localisées dans différents lobes (Figure 4)

Nous analyserons par la suite les quatre points suscités par l'expérience de Petersen et al (1988) et décrits dans la Figure 4, à savoir les activations cérébrales liées à la lecture, l'écoute, la prononciation et la compréhension de mots.

Lecture de mots selon Petersen et al (1988): la lecture silencieuse de mots semble stimuler une aire située dans le lobe occipital, en l'occurrence le cortex extrastrié gauche, au sein du cortex visuel (Figure 4, image d'en haut à gauche). Lors de l'expérience de Petersen et al, cette région a été exclusivement activée lorsque les mots ont été lus silencieusement. D'ailleurs, la lésion du cortex extrastrié pourrait être la cause d'une *alexie pure*, dite aussi *cécité visuelle* (Damasio et Damasio, 1983 ; Henderson, 1986 ; Behrmann et al, 1990 ; Beversdorf et al, 1997 ; Cohen et al, 2003 ; Behrmann et Plaut, 2012), qui est une forme d'incapacité à lire les mots écrits, sans pour

autant montrer d'autres formes de déficits langagiers. Par ailleurs, la lecture de mots recrute, en particulier, une région du cortex extrastrié, connue sous le nom d'*aire de la forme visuelle des mots* (en anglais *Visual Word Form Area* ''VWFA'' ; Cohen et al, 2000 ; Dehaene et al, 2002 ; Kronbichler et al, 2004 ; Vigneau et al, 2005 ; Vinckier et al, 2007 ; pour une revue voir Dehaene et Cohen, 2011). Cette aire aborde latéralement le gyrus fusiforme gauche (Tarkiainen et al, 1999 ; Cohen et Dehaene, 2000) et on s'accorde à la faire correspondre avec l'aire 37 de Brodmann[6] (Cohen et al, 2003). Cette région serait, entre autre, impliquée dans le traitement de diverses caractéristiques typographiques de mots, comme la position spatiale des lettres, leur taille ou encore la police de caractère (Cohen et al, 2003).

Ecoute de mots selon Petersen et al (1988): Dans l'étude de Petersen et al (1988) l'écoute de mots a suscité une activité fonctionnelle bilatérale au niveau du cortex auditif primaire, ainsi que du cortex temporo-pariétal gauche (dont l'aire de Wernicke), la portion antérieure du cortex temporal supérieur et enfin la partie inférieure du cortex cingulaire inférieur (Figure 4, coupe supérieure droite). L'implication de l'aire de Wernicke dans l'écoute de la parole a été corroborée par plusieurs études (Zatorre et al, 1992 ; Paus et al, 1996 ; Pulvermüller et al, 2003 ; Wilson et al, 2004 ; pour un revue voir Pulvermüller, 2005). Cette distribution cérébrale au sein même du cortex temporal, laisse présager que l'aire de Wernicke n'est pas la seule région temporo-pariétale à traiter un mot entendu. Aujourd'hui, on connait mieux le rôle de l'aire de Wernicke, notamment grâce au développement des techniques d'imagerie cérébrale. Il a été rapporté à titre d'exemple, que la région située autour de la partie postérieure de la scissure temporale supérieure, joue un rôle important lors de l'écoute de texte narratif (Papathanassiou et al, 2000). Elle est, par ailleurs, impliquée dans le décodage visuel de chaine de caractères formant un pseudo-mot (Caplan et al, 2002 ; Shtyrov et al, 2003).

Prononciation de mots selon Petersen et al (1988): Quant à la tâche de prononciation de mots, opérée au niveau 3 de leur protocole expérimental hiérarchique (celui de la prononciation des mots), Petersen et al (1988), ont observé des activations

[6] Cohen et al (2003) ont proposé que la VWFA est représentée par l'aire 37 de Brodmann afin de simplifier le débat concernant la localisation exacte de cette région dédiée à la reconnaissance des mots écrits (pour revue voir McCandliss et al, 2003).

dans le cortex pré-moteur gauche pour coder les mouvements d'articulation de la bouche (Figure 4). Par ailleurs ces auteurs affirment que l'aire du cortex moteur primaire, directement concernée par les mouvements de la bouche, a été également impliquée lors de cette tâche, ainsi que le cortex insulaire antérieur gauche. De même, les structures corticales qui entourent la scissure de Sylvius, ont été mobilisées dans les deux hémisphères. Par contre, l'aire de Broca qui fait partie de cette région péri-sylvienne, n'a pas fait l'objet d'une quelconque activité fonctionnelle, ni lors de la répétition à haute voix des mots, ni lors de la lecture passive des mots (Petersen et al, 1988). Le moins que l'on puisse dire, est que cette observation discréditerait l'éventuelle spécialisation « exclusive » de l'aire de Broca dans la production de la parole (Broca, 1861 ; Geschwind, 1979).

L'avènement d'outils d'investigation cérébrale autres que la TEP, a permis d'attribuer divers rôles fonctionnels à l'aire de Broca, notamment lors de l'exécution d'une action motrice (Binkofski et Buccino, 2004), ou lorsqu'on joue ou on écoute de la musique (pour revue voir Fadiga et al, 2009) et dans bien d'autres domaines inattendus, comme le fait d'observer ou d'imiter l'action motrice accomplie par l'autre (Rizzolatti et al, 1996 ; Grafton et al, 1997 ; Decety et a, 1997 ; Grèzes et al, 1998 ; Buccino et al, 2001 ; Heiser et al, 2003 ; Fazio et al, 2009 ; pour une revue voir, Rizzolatti et Sinigaglia, 2011), ou même lorsqu'on réalise un calcul mental (pour revue voir, Burbaud et al, 1999 ; Dehaene et al, 1999 ; Dehaene, 2011). Par ailleurs, l'aire de Broca est aussi impliquée dans la compréhension des mots lus et écoutés (Pugh et al, 1996 ; Stromswold et al, 1996 ; Zatorre et al, 1996 ; Friederici, 1997 ; Chee et al, 1999 ; pour une récente revue voir Hickok et al, 2011).

Ces fonctions diversifiées de l'aire de Broca pourraient être liées aux neurones miroirs, contenus dans sa partie ventrale, découverts dans le cerveau du singe macaque au niveau d'une aire pré-motrice (F5) correspondante à la localisation de celle de Broca chez l'homme (Craighero et al, 2007. Pour revue voir ; Fadiga et al, 2009 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2011). Certains auteurs ont émis des doutes quant à l'existence de ces neurones miroirs dans le cerveau humain (pour revue voir Turella et al, 2009). Mais une observation, faite sur des patients opérés pour épilepsie pharmaco-résistante, par

mesure ECG avec électrodes extracellulaires (Mukamel et al 2010) a montré leur existence dans l'humain.

Compréhension de mots selon Petersen et al (1988): Les dernières conclusions de Petersen et al (1988) ont concerné la tâche d'association, où les sujets devaient générer un verbe associé sémantiquement au nom commun présenté sur l'écran. Les images TEP obtenues ont mis en évidence plusieurs foyers d'activation distribués de l'avant à l'arrière du cerveau, contrairement aux tâches précédentes, qui se caractérisaient par une activité localisée (Figure 4, image inférieure droite). L'aire frontale inférieure gauche a été clairement impliquée, dont l'aire de Broca, qui a engendrée cette fois-ci une nette réponse neuronale. La région correspondante à l'aire de Broca dans la tâche d'association (de compréhension) pourrait être impliquée dans le stockage temporaire des informations, au niveau d'une région du cortex frontal qui a été considérée responsable de la *mémoire représentationnelle à court terme* (Goldman-Rakic, 1987 ; Fuster, 1989 ; pour une revue voir Goldman-Rakic, 1995 ; Fuster, 2008). Le cerveau ferait alors appel à cette mémoire afin de guider notre comportement en absence de repères externes porteurs d'informations (Posner et Raichle, 1998). La tâche d'association mise en place par Petersen et al (1988) et les modalités de son déroulement, justifieraient peut-être l'implication de cette mémoire *temporaire* frontale. D'autres régions du cerveau ont également répondu au stimulus de génération de verbes, parmi elles, le cortex cingulaire antérieur et le cervelet droit ainsi que le cortex temporal postérieur gauche (aire de Wernicke). Il a été suggéré, par ailleurs, que l'aire de Wernicke agit en tandem avec l'aire de Broca lors de la compréhension de la parole (Pulvermüller et al, 2003).

Au vu de l'ensemble de ces résultats qui confirmeraient l'existence de patterns d'activation corticale distribués très loin des modèles localisationnistes[7]. Cette hypothèse est soutenue par les résultats qui proviennent des études portées sur des patients cérébrolésés qui ont mis en avant des réseaux neuronaux, indépendant des aires de Broca et de Wernicke, et participant activement au traitement des mots. On

[7] Font références aux théories selon lesquelles les aires cérébrales auraient un lien avec les fonctions cognitives. Dans notre cas d'étude, il serait question du langage.

pourrait alors prétendre à des modèles plus dynamiques, qui intégreraient ces nouvelles données anatomiques. Il serait alors légitime de se questionner sur la manière dont ces aires cérébrales se structurent entre elles, en passant en revue les nouveaux modèles d'organisation du langage qui découlent de ces travaux.

1.1.4. Des nouveaux modèles de neuro-anatomie fonctionnelle du langage

L'ensemble des recherches que nous venons de résumer, montre que les modèles *localisationnistes* du fonctionnement cérébrale lors du traitement du langage doivent être actualisés, tant au niveau de la localisation anatomique des aires impliquées, qu'au niveau, surtout, des liens fonctionnelles entre les différents substrats neuronaux impliqués. Ceci a été rendu possible grâce au développement de diverses méthodologies d'imagerie cérébrale, qui ont constitué un excellent outil pour étudier les circuits cérébraux impliqués dans le langage. Dans la suite, nous présenterons deux nouveaux modèles qui se sont inspirés d'études d'imagerie cérébrale dans ce domaine.

Le premier de ces modèles que nous souhaitons présenter a été développé par Hickok et Poeppel (2000), à partir d'une découverte pionnière en neurophysiologie (Ungerleider et Mishkin, 1982) démontrant, sur le cerveau animal (Ingle, 1967, 1973 ; Trevarthen, 1968 ; Schneider, 1969), que les systèmes neuro-fonctionnelles du cerveau sont organisés en deux voies corticales, l'une ventrale et l'autre dorsale. Ungerleider et Mishkin (1982) en ont fait une distinction anatomique fondamentale pour le système visuel, soutenant que la voie ventrale se projette du lobe occipital vers les régions temporales inférieures, impliquées dans la compréhension des propriétés des objets (voie du *quoi*). Tandis que la voie dorsale se projette vers les zones pariétales et est responsable de la localisation spatiale des objets (voie du *où*). Or, il a été suggéré que la caractérisation de la voie dorsale par le concept du *où* serait insuffisante (Milner et Goodale, 1995). Ces derniers auteurs ont proposé une spécialisation de la voie dorsale dans le contrôle de l'action, mais cette affirmation ne correspond pas aux tableaux cliniques consécutifs à des lésions du lobe pariétal (Rizzolatti et Sinigaglia, 2011). En effet, les patients atteints de lésions au niveau du lobe pariétal inférieur droit ne perçoivent plus les stimuli qui proviennent du côté controlatéral à la lésion (Bisiach et Vallar, 2000). Par exemple, ils ne peuvent reproduire que la moitié droite d'un dessin et

lorsqu'ils mangent ils négligent la moitié gauche de leur assiette (Rizzolatti et Sinigaglia, 2011). Cette voie dorsale pourrait donc intervenir également dans les traitements perceptifs liés à l'espace.

A cet égard, Rizzolatti et Matelli (2003) ont proposé une subdivision de la voie dorsale en deux voies : une voie *dorso-ventrale* et une voie *dorso-dorsale*. La voie dorso-ventrale emprunte le lobe pariétal inférieur pour rejoindre le cortex pré-moteur, constituant ainsi les circuits sous-tendant les transformations visuo-motrices, comme l'organisation de l'action (*e.g.:* saisir un objet) ou encore la compréhension de cette action, alors que la voie dorso-dorsale se projette vers le lobe pariétal supérieur et renseignerait sur les informations visuelles concernant l'espace ainsi que le contrôle en temps réel du mouvement (Rizzolatti et Matelli, 2003).

Au sein du système auditif, il a été suggéré l'existence de substrats cortico-fonctionnels organisés en double voie, ventrale et dorsale, similaires à celles du système visuel (Rauschecker, 1998 ; scott, 2005). A partir de cette hypothèse Hickok et Poeppel (2000) ont esquissé une nouvelle anatomie fonctionnelle du langage, à travers la proposition d'un modèle de traitement du langage, se reposant sur la perception auditive de la parole, un aspect largement étudié dans le domaine du langage, qui permet de dresser une cartographie fonctionnelle de la fonction langagière. Ce modèle (Figure 5) soutient que les portions supérieure et médiane du lobe temporal répondent au traitement des signaux sonores émis par la parole dont le but est de reconnaitre les mots entendus (voie ventrale), alors que les structures postérieures du lobe frontal ainsi que la partie postérieure du lobe temporal sont impliquées dans la fonction articulatoire du lobe frontal (voie dorsale).

Il a été proposé que la parole écoutée implique en premier lieu une analyse spectro-temporelle du son dans le gyrus temporal supérieur incluant le cortex auditif bilatéral (Figure 5, respectivement en bleu clair et en vert), ensuite les parties médiane et postérieure de la scissure temporale supérieure bilatérale s'occupent de l'analyse phonologique des mots (Figure 5, en jaune). Selon Hickok et Poeppel (2000), c'est seulement à partir de cette étape, que la subdivision ventro-dorsale s'opère. Ainsi, une fois le traitement acoustique terminé, ces auteurs proposent un passage du flux

d'information par la voie ventrale, en recrutant les parties médiane et inférieure du gyrus temporal ainsi que le lobe temporal antérieur (Figure 5, en violet). Ces circuits cérébraux de la voie ventrale ont pour principal but, toujours d'après ces auteurs, de comprendre l'information qui lui parvient, exactement dans le même esprit de la voie du *quoi* propre au système visuel (Hickok, 2009). Il reste toutefois un certain nombre de questionnement quant aux mécanismes précis ainsi qu'aux régions impliquées dans la voie ventrale (Rauschecker, 1998 ; Hickok et Poeppel, 2000, 2004 ; Scott et Wise, 2004 ; Scott, 2005).

D'un autre côté, Hickok et Poeppel (2000) désignent aussi une seconde voie, dorsale, qui est exclusivement latéralisée à gauche, englobant le cortex pré-moteur et l'aire de Broca (Figure 5, en bleu foncé) ainsi que la jonction temporo-pariétale (correspondant à l'abréviation ''Spt'' dans la Figure 5). Cette voie dorsale serait le siège des représentations motrices articulatoires induites par les représentations phonologiques et sensorielles (pour une revue voir Hickok et Poeppel, 2000, 2007). Conformément à ces auteurs, cette voie dorsale partage une interface de connexion, *i.e.:* elle emprunte les mêmes circuits cérébraux que le système moteur (voir Figure 5), une hypothèse qui a aussi été avancée par d'autres chercheurs (Luce et Pisoni, 1998 ; Wise et al, 2001 ; Scott et Johnsrude, 2003). Cette hypothèse remonte au modèle classique de Wernicke (1874) qui avait jadis proposé de probables liens fonctionnels entre les circuits sensoriels du langage et le système moteur. Ce rôle d'intégration sensorimotrice attribué à la voie dorsale, entrevoit une relation fonctionnelle entre les sites dévoués au traitement du langage et ceux permettant le déroulement d'une action motrice. Ce point sera développé dans la partie dédiée aux interactions entre la parole et l'action.

Outre le modèle de Hickok et Poeppel (2000) le second modèle qu'on va ici présenter, est celui de Garagnani et al (2008) qui repose sur le principe d'apprentissage hebbien, selon lequel lorsqu'un ensemble de neurones interagit avec des potentiels d'action répétés sur un autre ensemble post-synaptique, cela contribue à la création d'un circuit neuronal fortement connecté et pouvant se regrouper, une fois élargi, en

unités fonctionnelles distribuées dans le cortex cérébral (Hebb, 1949; Palm, 1982; Gerstein et al, 1989; Aertsen and Arndt, 1993; Fuster, 1995; Braitenberg, Schüz, 1998).

C'est à partir de ce qui est devenue la « règle de Hebb » qu'il a été proposé l'existence de « réseaux » cérébraux, chacun montrant, une haute spécialisation, par exemple sémantique. Ainsi, les mots d'action recruteraient exclusivement des réseaux fronto-centraux, les mots à fort attributs visuels la région péri-sylvienne et une partie du cortex occipitale, les noms d'animaux activent les aires occipitales de l'hémisphère droit, alors que les mots décrivant des outils seraient traités plutôt par le cortex pré-moteur gauche et la partie médiane du gyrus temporale gauche (Martin et al, 1996 ; pour une revue voir Pulvermüller, 2001).

Dans le modèle de Garagnani et al (2008), les circuits cérébraux distribués opèrent autour des aires inférieures frontales et supérieures temporales du cortex humain. Leurs connexions sont représentées dans la Figure 6a.

Six régions sont impliquées dans ce modèle. D'après Garagnani et al (2008), la production de sons et de mots active simultanément les neurones de l'aire motrice primaire (M1) et ceux de l'aire auditive primaire (A1), ce qui engendre une propagation de l'activation touchant la globalité du circuit neuronal (Figure 6b). Le reste des aires impliquées sont, l'aire pré-motricer (PM), la région du cortex préfrontale (PFC), et les aires auditives du gyrus temporal supérieur, à savoir l'aire auditive associative, appelée par ces auteurs l'aire paraceinture (*Auditory Parabelt*, PB), ainsi que la ceinture d'aires auditives, correspondant à l'aire auditive secondaire (*Auditory Belt*, AB). Toujours selon Garagnani et al (2008), la simple stimulation de l'aire auditive primaire actionne l'ensemble du circuit neuronal décrit dans la Figure 6, pour atteindre l'autre bout de la chaîne, *i.e.*: l'aire motrice primaire, et vice versa, puisque, selon ces auteurs, les gestes articulatoires de la bouche opérés dans les aires frontales inférieures (M1, PM, PFC) génèrent des signaux qui causent la stimulation des aires temporales supérieures (A1, AB, PB) (voir aussi Garagnani et al, 2007, 2009).

Ce modèle, que Garagnani et al (2008) appellent « Perception-Action » (voir aussi Berthoz[8], 2013), pourrait par ailleurs, expliquer les caractéristiques de certains déficits du langage qui affectent la production, l'écoute et la compréhension de la parole : ces déficits peuvent survenir suite à des lésions relatives aux régions centrales du circuit perception-action (*i.e.*: les aires PM, PF, PB et AB), en compromettant ainsi la propagation de l'information linguistique (Garagnani et al, 2008 ; voir aussi Pulvermüller et Fadiga, 2010). Cependant, il peut y avoir une prédominance de ces déficits soit dans le domaine de l'action ou de la perception. Ainsi, les lésions frontales inférieures tendent à causer des difficultés de prononciations, alors que les lésions temporales supérieures ont plus d'effets sur l'écoute des mots (Garagnani et al, 2008).

[8] En support de cette hypothèse, déjà Berthoz en 1997 rappellait l'existence d'un modèle perception-action dont il partage la functionnalité.

****** Compendium n°1 ******

Il semblerait que les conclusions de Petersen et al (1988) ne corroborent pas les anciens modèles neurologiques qui expliquent les mécanismes cérébraux du traitement du langage, dont celui de Wernicke-Lichtheim-Geschwind, toutefois, ils sont en accords avec d'autres modèles (LaBerge et Samuels, 1974 ; Coltheart et al, 1977 ; Humphreys et Evett, 1985). En effet, les modèles neurologiques de manière générale s'appuient sur une organisation sérielle pour traiter le flux linguistique. Ainsi, comme il a été mentionné précédemment (§ 1.1.2), le mot est tout d'abord traité visuellement dans le cortex occipital, puis phonologiquement dans le gyrus angulaire, ensuite sémantiquement dans le cortex temporal postérieur (aire de Wernicke), et enfin ''mécaniquement'' dans le cortex moteur (ce qui équivaut à l'acte de prononciation proprement dit). Il se trouve que Petersen et al (1988) n'ont observé aucune activité fonctionnelle, pendant la tâche de lecture silencieuse des mots, ni au niveau de l'aire de Wernicke, ni même au gyrus angulaire, ce qui démontre les limites de cette étude (probablement en raison de la méthode TEP qui manque, comme déjà noté, de bonne résolution spatio-temporelle).

Ainsi, il est évident que le traitement d'un mot isolé, revêt un processus beaucoup plus complexe que celui prédit par les modèles classiques développés à la fin du 19ème siècle, restreints aux aires de Broca et de Wernicke. De ce fait, les conclusions exposées jusqu'ici tendent à conforter le concept du ''cerveau qui parle'', tant avec son cortex occipital pour une lecture passive d'un mot, qu'avec son cortex temporal pour l'écouter, que son cortex frontal pour le prononcer et enfin la participation d'un ensemble de régions cérébrales pour analyser sémantiquement l'information langagière, dont le cortex frontal, temporal et cingulaire ainsi que le cervelet.

L'arrivée de nouveaux modèles d'organisation de la fonction du langage a permis une refonte plus fine des mécanismes cérébraux qui la régissent, notamment grâce à la modernisation des techniques d'imagerie cérébrale. Deux modèles ont été présentés dans cette partie (Hickok et Poeppel, 2000 et Garagnani et al, 2008), chacun vise à mettre en avant les théories les plus récentes qui tentent à y voir plus clair dans le domaine du traitement du langage, car la neuro-anatomie fonctionnelle sous-tendant les fonctions cognitives supérieures demeure difficile à cerner.

Sur la base des conclusions de Hickok et Poeppel (2000) et de Garagnani et al (2008), les liens supposés entre le langage et l'action ne font que se renforcer. A partir de ce constat, quelle serait alors la conséquence de la production verbale sur l'activité corticale des aires motrices ? À l'inverse, est-ce que l'exécution d'une action motrice dirigée par le cortex moteur pourrait influencer le processus d'analyse linguistique ?

1. 2. Les liens fonctionnels entre les aires corticales du langage et celles de l'action motrice

Les systèmes corticaux du langage et de l'action motrice ont été traditionnellement considérés comme relativement ''indépendants'' l'un de l'autre (Fodor, 1983 ; Shallice, 1988). Les perspectives de recherche les plus récentes, offrent un point de vue différent, basé sur un système fonctionnel distribué et interactif (Fuster, 2003 ; pour une revue voir Pulvermüller, 2005 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2011). Les études issues des travaux expérimentaux menés sur le singe Macaque (di Pellegrini et al, 1992 ; Rizzolatti et al, 1996 ; Saure et al, 2008 ; Petrides et Pandya, 2009), ont donné naissance à une riche littérature traitant des connexions neuro-anatomiques entre les aires du langage et de l'action (Young et L, 1994 ; Makris et al, 1999 ; Pulvermüller et al, 2005a ; Pulvermüller et Fadiga, 2010). Ainsi, il existe des connexions entre le cortex pré-moteur, représenté par ses parties dorsale et ventrale, l'aire de Broca dans le cortex frontale inférieur et l'aire de Wernicke dans le cortex temporal supérieur (Pulvermüller, 2005). Les autres connexions anatomiques sont représentées dans la Figure 7.

Afin de discuter ces liens fonctionnels entre les aires corticales du langage et de l'action, nous passerons en revue la littérature traitant de l'éventuel effet de la production de la parole et de sa perception sur l'activité corticale des aires responsables de l'action motrice. Le second champ possible pour l'étude de la relation langage-action, très peu exploité, concerne les effets que pourrait produire l'exécution, proprement dite, d'une action motrice sur le déroulement du traitement de langage[9]. Nonobstant ces limitations, ces deux champs de recherche ont considérablement contribué à

[9] Des études ont montrées que l'action motrice pouvait affecter le déroulement d'une tâche langagière, mais la plupart de ces études ont utilisées l'observation de l'action et non pas l'exécution de celle-ci par le sujet, *i.e.*: les sujets effectuaient une tâche langagière tout en observant une action motrice effectuée par l'expérimentateur (Gentilucci, 2003 ; Gentilucci et al, 2004).

comprendre les mécanismes cérébraux qui sont à la base des liens fonctionnels entre les systèmes du langage et de l'action.

1.2.1. Effet de la parole sur l'activité du cortex moteur

Un nombre croissant d'études expérimentales a confirmé les suggestions théoriques (Liberman et al, 1967 ; Liberman et Whalen, 2000) suggérant que les aires motrices cérébrales, localisées dans la partie postérieure du cortex frontal et responsables des mouvements volontaires, peuvent être impliquées dans le traitement du langage (Binder et al, 2000 ; Benson et al, 2001 ; Fadiga et al, 2002 ; Rizzolatti et al, 2002 ; Watkins et al, 2003 ; Wilson et al, 2004 ; Alario et al, 2006 ; Meister et al, 2007). Des chercheurs ont rapporté par exemple que « *l'écoute et la prononciation de syllabes module l'activité du cortex pré-moteur »* (Wilson et al, 2004). Ces derniers auteurs ont utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) pour analyser les activations cérébrales fonctionnelles, lorsque les sujets écoutaient des syllabes pendant 16s, puis reproduisaient oralement les mêmes syllabes pendant 3s. Les conditions contrôles consistaient à effectuer des tâches non verbales (*e.g.*: écouter une rafale de sons monotones, comme des ''*white noises*''[10], ou un son de cloche ou réaliser une tâche motrice manuelle comme un mouvement d'opposition des doigts au pouce et ce, simultanément avec les deux mains). Dans ces expériences (Wilson et al, 2004), l'écoute des syllabes a produit des activations, dans la partie supérieure de l'aire pré-motrice ventrale et dans le cortex moteur primaire (M1). De plus, Wilson et al ont remarqué qu'environ 73% des régions motrices impliquées dans l'écoute de la parole, l'ont également été lors de la production de la parole.

Ces résultats confirment la spécificité du M1 et du pré-moteur ventrale dans la production et la perception de la parole, puisque la tâche manuelle, effectuée en guise de stimulus de contrôle, a suscitée des patterns d'activation au sein de la région motrice de la main, située sur les bords médians, supérieurs et postérieurs de l'aire pré-motrice impliquée dans la perception et la production de syllabes (Wilson et al, 2004). Ce rôle essentiel du cortex pré-moteur dans le traitement du langage a été confirmé plus tard

[10] Un *white noise* est un signal randomisé avec une densité de puissance spectrale constante.

par Meister et al (2007), qui ont observé une altération de la tâche linguistique (*i.e.*: discrimination de syllabes présentées visuellement) suite à la stimulation magnétique de l'aire pré-motrice gauche.

Fadiga et al (2002) ont eux aussi montré cet effet du langage sur le cortex moteur. Ils ont appliqué une stimulation magnétique transcrânienne (TMS) sur l'aire motrice gauche de la langue pendant que les sujets écoutaient des mots et des pseudo-mots avec, soit la double consonne 'rr' (qui, en langue italienne, mobilise fortement la langue, *e.g.*: *terra* = terre), ou la double consonne 'ff' (qui mobilise faiblement la langue, *e.g.*: *tuffo* = plongeon). Des capteurs reliés au muscle de la langue, ont permis d'enregistrer les amplitudes de potentiels évoqués moteur (PEMs) pendant l'écoute des stimuli auditives. La TMS a été délivrée 100ms après le début de la double consonne, ou 100ms après le changement de fréquence dans la condition contrôle bitonal (écouter un son qui a deux tonalités).

L'enregistrement des amplitudes des PEMs dans l'aire motrice de la langue dans l'hémisphère gauche, a mis en évidence une augmentation significative de l'activité corticale, lors de l'écoute des mots 'rr' par rapport à toutes les autres conditions (Figure 8). Par ailleurs, l'écoute des mots contenant le double 'ff' et des pseudo-mots contenant le double 'rr' ont suscité plus de réponse dans l'aire motrice de la langue, en comparaison aux pseudo-mots 'ff', alors que l'écoute du son bitonal a produit les mêmes activations cérébrales que les stimuli contenant la double consonne 'ff'. Ces activations, toutefois, demeurent significativement inférieures à celles induites par les mots et les pseudo-mots contenant 'rr'. Ces résultats indiquent l'existence d'un effet de facilitation des mouvements de la langue consécutif à l'écoute des mots et pseudo-mots contenant 'rr'. Cet effet est très fortement lié aux mots et moins par rapport aux pseudo-mots, ce qui voudrait dire, selon Fadiga et al (2002), que la signification des stimuli langagiers faciliterait d'avantage les mouvements de la langue.

Des résultats similaires par TMS ont montré un changement dans l'excitabilité du cortex moteur lors de l'écoute d'une prose continue (Watkins et al, 2003). De même, lors de la prononciation à haute voix d'un texte écrit, il y a augmentation de l'amplitude des PEMs des muscles de la main droite, chez des sujets droitiers, suite à la stimulation

magnétique du cortex moteur gauche (Tokimura et al, 1996). D'un autre côté, la stimulation de l'aire motrice de l'hémisphère droit, chez les sujets gauchers, a induit aux mêmes résultats au niveau des PEMs des muscles de la main gauche. Cette étude de Tokimura et ses collègues a été l'une des premières à suggérer que la production du langage (la prononciation) est latéralisée au niveau cérébrale.

Quelques années plus tard, Meister et ses collègues (2003) ont répliqué la même expérience de Tokimura et al (1996), à l'exception près que les sujets ne devaient pas lire à haute voix un texte, mais une suite de noms communs. Les sujets ont ainsi été invités à lire des mots isolés (*e.g.*: *maison*) et des mots triplés qui n'ont aucun lien sémantique (*e.g.*: *tigre-brouillard-baril*). Pendant la lecture des mots, une stimulation magnétique transcrânienne a été appliquée sur les aires motrices primaires de la main et du pied des deux hémisphères. Des électrodes ont été placées sur les muscles de la main droite afin d'enregistrer l'activité des PEMs et l'amplitude de ces derniers a augmenté seulement après stimulation de l'aire motrice de la main dans l'hémisphère dominant (Figure 9). Par ailleurs, l'activité électrique de l'aire motrice primaire relative aux mouvements de pieds n'a pas été affectée par la lecture des mots (Meister et al, 2003). Ce résultat n'a pas été confirmé par les conclusions de Liuzzi et al (2008) qui ont observées, aussi par une étude TMS, une recrudescence de l'activité corticospinale dans l'aire motrice du pied, suite à la lecture silencieuse et à haute voix, ainsi que pendant l'écoute d'un texte narratif.

Les résultats de Meister et al (2003) supportent l'hypothèse que certaines tâches linguistiques sont en mesure d'affecter l'excitabilité de l'aire motrice primaire de la main dans l'hémisphère dominant du langage et corroborent des études précédentes (Tokimura et al, 1996 ; Seyal at al, 1999) rapportant une augmentation de l'excitabilité de l'aire motrice gauche de la main durant la lecture des mots ou de texte. Par ailleurs Meister et al (2003) ont observé un lien entre la durée de la tâche verbale et la persévérance de l'excitabilité corticale, car les mots triplés ont suscité une activité plus longue (ou plus significative) que les mots isolés (Figure 9). *L'ensemble des résultats de Meister et al (2003) démontrent les liens fonctionnels qui pourraient exister entre la*

lecture de mots sans liens avec l'action motrice et l'aire primaire motrice de la main, suggérant de fortes connexions entre le langage et l'action.

Mais alors, est-ce que la modulation du cortex moteur par le langage pourrait justifier l'inverse, c'est-à-dire, est-ce que la production d'une action motrice, qui ne soit pas une gestuelle, pourrait stimuler les aires spécifiques du langage ? Autrement dit, la relation langage-action est-elle bidirectionnelle ?

1.2.2. Effet de l'action motrice sur les aires de la parole

Afin d'examiner les effets probables que pourrait procurer l'exécution d'une action motrice sur le déroulement d'une tâche langagière, une étude récente (Rueschemeyer et al, 2010a) s'est intéressée à cette problématique en étudiant les liens entretenus par les circuits cérébraux sous-tendant l'acte moteur intentionné (volontaire) avec les structures corticales responsables de la production de la parole. Ces auteurs ont mis en place une procédure expérimentale connue en psychologie cognitive sous le nom de *paradigme d'amorçage*, qui consiste dans la présentation d'un stimulus (*l'amorce*) dans le but d'influencer le déroulement d'un deuxième stimulus (*la cible*). Dans le cas où les sujets exposés à *l'amorce* reconnaissent plus rapidement *la cible*, on dit alors qu'il y a un effet d'amorçage ; *l'amorce*, dans l'étude en question, est un mouvement et la *cible* est représentée par un mot.

Dans une première expérience, Rueschemeyer et al (2010a) ont mis les sujets devant un écran d'ordinateur, afin de réaliser une tâche de décision lexicale, entre 80 mots et 20 pseudo-mots. Les mots sélectionnés décrivaient, soit un objet qui nécessite une manipulation constante quand on l'a entre les mains (*e.g.*: *tasse*), soit un objet qui n'exige aucune manipulation lors de son utilisation (*e.g.*: *horloge*). Les auteurs ont justifié l'utilisation de ces mots par le fait que, précédemment, différents patterns d'activation corticale ont été rapporté lorsque les sujets donnaient leurs jugements sur la manière dont un objet était utilisé (*i.e.*: objet non manipulable) ou déplacé (*i.e.*: objet manipulable) (Kellenbach et al, 2003 ; Boronat et al, 2005 ; Canessa et al, 2008 ; Rueschemeyer et al, 2010b).

Les sujets ont été invités à effectuer une lecture à haute voix dans le cas de la présentation d'un mot, et à s'abstenir lorsque les pseudo-mots s'affichaient. Ces deux variables ont été répétées au sein de deux conditions; dans l'une, les sujets devaient utiliser leur index droit pour suivre le bord d'un disque fixé sur une table (condition *mouvement actif* ou intentionné), et dans l'autre leur index a été fixé à un système motorisé imitant le mouvement actif (condition *mouvement passif* ou non intentionné). Les tâches de décision lexicale et de mouvement ont été réalisées simultanément.

Les résultats ont montré que la précision de la réponse dans la tâche de décision lexicale (taux de performance) a révélé une différence significative entre les deux conditions *mouvement*. Ainsi, les sujets ont été plus précis en répondant aux mots manipulables qu'aux mots non manipulables dans la condition *mouvement actif*, alors qu'aucune différence n'a été enregistrée entre ces deux catégories de mots au sein de la condition *mouvement passif.* En d'autres termes, *répondre à un mot manipulable bénéficie de l'intentionnalité du mouvement accompli*. Par ailleurs, aucune différence statistique n'a été rapportée concernant le temps de réponse vocale (la rapidité avec laquelle les sujets reconnaissent les mots). Quant au caractère intentionné ou pas de l'action utilisée dans l'expérience de Rueschemeyer et al (2010a), il est bien connu que les aires pré-motrice et motrice supplémentaire[11] sont beaucoup plus sollicitées lors d'un mouvement intentionné que lors d'un mouvement passif, non volontaire (Mima et al, 1999 ; Passingham, 1993 ; Kennerly et al, 2004). Un mouvement passif ne nécessite, selon Rueschemeyer et al (2010a), ni planification, ni initiation, ni même un contrôle de la part du sujet performeur de l'action.

Dans une seconde expérience, Rueschemeyer et al (2010a) ont répliqué la tâche de décision lexicale réalisée lors de la première expérience, à la différence que la réponse des sujets à haute voix n'était plus la lecture du mot affiché, mais de dire *oui* lors de la présentation du mot. De cette façon, le temps de réponse vocale ne dépendra

[11] L'aire motrice supplémentaire correspond à la partie dorsale du cortex pré-moteur (AB6) exactement dans la portion dorso-médiane du cortex frontal (Picard et Strick, 1996, 2001). Cette aire semble jouer un rôle important dans le déroulement du mouvement volontaire (Passingham, 1995) ainsi que pendant la phase préparatoire de celui-ci (Tanji et Kurata, 1982). Elle peut également intervenir lors de la simple observation d'un geste de saisie d'un objet (Grezes et Decety, 2002). De manière générale, les théories relatives aux fonctions exactes de l'aire motrice supplémentaire varient considérablement (pour une revue voir Nachev et al, 2008).

plus de la longueur du mot présenté. De la même manière que dans la première expérience, deux conditions ont été testées ; dans l'une, les sujets devaient presser une commande (pour la condition *mouvement*), alors que l'autre condition ne requérait aucune tâche motrice (pour la condition *non mouvement*). La tâche de décision lexicale est réalisée en même temps que la tâche motrice. Les résultats de cette expérience montrent que pendant la tâche de décision lexicale, la précision des réponses n'était pas la même dans les deux conditions testées, reflètant une meilleure performance des sujets, lorsqu'une tâche motrice était accomplie simultanément à la tâche de décision lexicale. Au niveau des temps de réponses, les sujets étaient plus rapides à reconnaitre un mot manipulable qu'un mot non manipulable, et ce uniquement lorsqu'une seconde tâche motrice était présente (condition *non mouvement*). Par contre, il n'y a aucune différence entre les deux catégories de mots dans la condition *mouvement*. *De ce fait, un effet de facilitation de la tâche langagière est évident en présence d'une tâche motrice.*

L'ensemble des expériences menées par Rueschemeyer et ses collaborateurs (2010a), indiquent que *la réponse verbale aux mots manipulables est modulée lorsque les sujets sont engagés dans une tâche motrice intentionnelle (expérience 1) et active (expérience 2)*. Cet effet sélectif de l'action volontaire sur le traitement lexicale, opéré au même moment, laisse supposer que l'activation du système moteur, lors de l'accomplissement de l'action motrice, a un impact positif sur le processus de traitement des mots (Rueschemeyer et al, 2010a). Cette hypothèse suggère ainsi l'éventuelle dépendance mutuelle entre les deux systèmes d'action et de langage.

****** Compendium n°2 ******

La perception auditive des syllabes et des mots concrets suscitent des patterns d'activations au niveau des régions cérébrales responsables du mouvement. L'écoute et la prononciation de syllabes recrutent de préférence l'aire pré-motrice ventrale, postéro-supérieure à l'aire de Broca, en plus des régions péri-sylviennes du langage. L'écoute de mots concrets stimule spécifiquement l'aire motrice primaire relative aux mouvements de la langue, accompagnée d'un effet de facilitation de l'effecteur impliqué. Quant à la prononciation de mots, elles confirment l'implication des structures cortico-motrices responsables des fonctions manuelles.

Ces résultats mettent ainsi en avant un effet de la parole, qu'elle soit prononcée ou écoutée, sur les aires motrices du mouvement. L'effet inverse a également été rapporté lorsque la tâche langagière était affectée par l'exécution simultanée d'une action motrice. Ainsi, les liens entre la parole et l'action semblent bien être bidirectionnelles.

Les processus cérébraux de traitement des mots semblent ainsi pouvoir être affectés par l'exécution d'une action motrice. L'effet inverse est également vrai, comme nous l'avons vu dans la partie qui précède celle-ci (§ *1.2.1*). Dans le cadre de cette relation étroite entre langage et action, est-ce qu'un mot décrivant une action motrice (*e.g.:* un verbe d'action) pourrait stimuler significativement les aires motrices qui sont à l'origine de l'action décrite ? Cette activation du cortex moteur consécutive au traitement d'un verbe d'action pourrait-elle être au profit d'une amélioration de la performance motrice de l'action en question ?

Chapitre 2. PAROLE D'ACTION ET ACTION MOTRICE

Relations entre verbes et mots d'action et le cortex moteur

Seront ici décrites les relations particulières qui ont été mises en évidence, dans la littérature, entre les verbes d'action et l'activation du cortex moteur (plus généralement entre la parole et l'action). L'attention sera notamment portée sur différentes études utilisant des techniques d'investigation cinématiques, électrophysiologique ou encore d'analyse d'images cérébrales, obtenues soit par IRMf ou par TMS.

2.1. Etudes Cinématiques

Les études que l'on continue à appeler, dans la littérature actuelle, de « comportementales » visent à évaluer la capacité réactionnelle d'un individu face à un stimulus donné. Il sera essentiellement question ici d'analyses de gestes moteurs, exécutées par l'enregistrement de différents paramètres cinématiques (vitesse du mouvement, temps de réaction, etc), en réponse à un stimulus langagier (lire, écouter ou prononcer un verbe d'action). On discutera notamment des effets de facilitation et/ou d'interférence que les verbes d'action peuvent apporter à la performance de l'acte moteur accompli. L'effet de facilitation étant l'amélioration du geste moteur suite à la prononciation, lecture ou écoute de mots d'action et, à l'inverse, un effet d'interférence témoignant d'une perturbation du déroulement de l'action induit par la tâche langagière.

Par une étude cinématique, Boulenger et ses collaborateurs (2006) ont examiné l'effet de la lecture silencieuse de mots d'action (verbes et noms) sur le mouvement de préhension d'un objet par la main dominante. Les stimuli étaient soit des verbes d'action, à l'infinitif, décrivant des actions effectuées avec les mains, les pieds ou la face/bouche (*e.g.*: dessiner*, sauter, pleurer*), soit des noms concrets, au singulier, se référant à une entité réelle que l'on peut visualiser mentalement, mais qui n'est pas manipulable (*e.g.*: *étoile, prairie, falaise*). Au cours de la tâche de décision lexicale, les participants devaient *atteindre* puis *saisir* un objet cylindrique placé à 40 cm de leur thorax, lorsque le mot affiché sur l'écran était un verbe d'action ou un nom concret, et

ne pas agir dans le cas de pseudo-mots. Ces derniers ont été construits en changeant une lettre aux mots sélectionnés pour qu'ils puissent être prononçables.

Deux conditions ont été vérifiées par Boulenger et al (2006) : la première consiste à effectuer la tâche de langage en même temps que la tâche motrice et la deuxième à la réaliser avant le mouvement de préhension. Des capteurs ont été placés sur le poignet des participants afin de mesurer leur temps de réponse aux mots affichés ainsi que d'autres paramètres cinématiques, comme par exemple la vitesse et l'accélération du mouvement. Les auteurs ont utilisé un appareil optique appelé *Optotrak 3020*, qui permet de suivre la trajectoire et la position du poignet à l'aide de pastilles réflectrices de lumière. Lorsque la tâche motrice est exécutée simultanément à celle du langage, les résultats ont montré que le maximum dans l'accélération du poignet apparaissait plus tardivement lors de la présentation de verbes d'action, par rapport au maximum enregistré lors de la reconnaissance de noms concrets (Figure 10A). La présentation de la tâche langagière avant l'exécution du geste a révélé un pic d'accélération plus précoce chez les sujets ayant perçu des verbes d'action en comparaison de noms concrets (Figure 10B), traduisant ainsi une facilitation du geste moteur induite par la lecture des verbes d'action effectuée en amont de celui-ci.

Dans les deux expériences, aucune différence statistique n'a été observée quant à la comparaison des paramètres cinématiques qui en découlent de la lecture des différentes catégories de verbes d'action*, i.e.:* la face, la main et le pied (Boulenger et al, 2006). Autrement dit, la lecture du verbe d'action de la main a produit le même effet sur la performance du mouvement de préhension que celui des verbes d'action de la face ou du pied. *Ainsi, la spécificité du verbe à l'égard de l'action n'a pas été démontrée par cette étude de Boulenger.*

Boulenger et al (2006) ont interprété leurs résultats par l'installation d'un effet d'amorçage sur la préhension de l'objet *cible* provoqué par la perception de verbes décrivant une action. Cette hypothèse semble se tenir au vu des résultats de la deuxième expérience (les verbes d'actions sont prononcés *avant* l'exécution de la tâche motrice) où le temps de mouvement était plus court par rapport à la première expérience, suggérant que la tâche motrice était plus facile à exécuter et sa performance

améliorée. *Le traitement de verbes d'action pourrait donc faciliter la tâche motrice, à condition que la tâche verbale soit réalisée avant la tâche motrice.*

L'autre point important remarqué au cours de l'étude de Boulenger et al (2006) résulte de l'analyse de la Figure 10A, lorsque les verbes étaient présentés simultanément à l'action motrice. L'effet de ralentissement suscité par les verbes d'action sur le mouvement de préhension, pourrait être dû à une sorte de compétition d'accès aux voies neuronales entre verbes et action motrice, perturbant le déroulement de cette dernière. C'est-ce que l'on a appelé « effet d'interférence » (pour une revue sur les effets de facilitation et d'interaction voir Chersi et al, 2010). Cet effet contribuerait à la perturbation de la commande motrice, provoquant ainsi un temps de mouvement plus long et donc un pic d'accélération retardé. Le geste moteur serait alors moins efficace (Boulenger et al, 2006).

Ces résultats concernant la facilitation de l'acte moteur par les verbes d'action sont en accord avec ceux de Dalla Volta et al (2009), qui avaient rapporté un effet de facilitation du mouvement de préhension suite à l'écoute de verbes d'action de la main par rapport aux verbes d'action relatifs aux mouvements des pieds. Quant à l'effet d'interférence on retrouve, toutefois, un désaccord entre une partie des résultats de Dalla Volta et ses collaborateurs ainsi qu'avec les conclusions de la première expérience de Boulenger et al (2006). Les premiers auteurs avaient pointés un effet d'interférence beaucoup plus tardif (vers le milieu du temps d'exécution du mouvement) que les seconds (au début de l'exécution motrice). Ceci laisse penser que le cortex moteur (probablement le pré-moteur) a eu plus de temps pour pouvoir effectuer un traitement cortical des verbes, avant qu'il puisse intervenir dans l'action proprement dite (Dalla Volta et al, 2009). Il est possible, selon Dalla Volta et al, que la tâche de décision sémantique choisie puisse faire recruter la totalité des aires motrices dans le but de comprendre le sens dégagé par les différentes catégories de verbes d'action.

D'autres chercheurs (Frak et al, 2010) ont décrit un effet de facilitation de la tâche motrice suite à l'écoute de verbes d'action, à l'instar des résultats de Boulenger et al (2008) et de Dalla Volta et al (2009). En effet, lors d'une tâche de préhension, Frak et al (2010) ont demandé à des sujets de soulever un cylindre à partir d'une surface

horizontale, à environ 5 cm, puis de le maintenir dans cette position à l'aide de leur pouce et index. Le cylindre est raccordé à un système de mesure de force équipé de capteurs. Ensuite les sujets devaient maintenir la position de préhension tout en écoutant une liste de mots et en comptant silencieusement le nombre d'occurrence des mots cibles, *i.e.*: dans une condition c'était un verbe d'action se référant à un mouvement de la main (*e.g.*: *écrire*) et dans l'autre un nom commun sans relation avec le mouvement (*e.g.*: *falaise*). La force de préhension s'est avérée plus importante à l'écoute de verbes d'action en comparaison aux noms (Figure 11).

L'augmentation de la force a été enregistrée à partir de premiers 100 ms qui suivaient la présentation des verbes. Les écarts significatifs entre ces deux catégories de mots, *i.e.*: les verbes et les noms communs, ont été observés dans la fenêtre entre 260 et 430 ms, ce qui correspond au délai d'accès lexical, qui intervient habituellement aux alentours de 200 ms après le début de la présentation des mots (Assadollahi et Pulvermüller, 2001 ; Pulvermüller et al, 2001). Frak et al (2010) en ont alors déduit l'existence d'un effet congruent entre le verbe écouté et l'action accomplie et ils ont formulé l'hypothèse qu'une simulation motrice possible serait la cause de l'activation des aires motrices impliquées dans le mouvement de préhension. Le terme de « *simulation* » motrice ici utilisé par ces auteurs, renvoie au processus de représentation mentale qui se forme, selon eux, dans les aires motrices, lors du traitement des mots.

L'hypothèse de la simulation mentale produite par la parole a été également mise en avant lorsque le stimulus perçu était une phrase. Dans ce cadre, Tomasino et al (2010) avaient menés une expérience où les participants devaient lire silencieusement des phrases brèves impératives ayant une coloration *positive* (*e.g.*: *do grasp*) ou *négative* (*e.g.*: *don't write*), les deux types de phrases décrivant le déroulement d'une action motrice. Les auteurs ont élaboré, par ailleurs, des phrases dépourvues de sens (*e.g.*: *do gralp*, *don't gralp*) dans le but de faire réaliser aux participants une tâche de décision lexicale. La réponse aux phrases au contenu cohérent devait se faire en appuyant le pied sur une pédale. Ainsi, le délai de réponse du pied enregistré était plus long à la présentation des phrases négatives. Lors d'une seconde expérience par IRMf, Tomasino et collaborateurs ont observé que les résultats cinématiques étaient accompagnés, par

une diminution de l'activité corticale dans les aires primaires et pré-motrices de la main, dans les deux hémisphères. Ces données suggèrent que l'activité du cortex moteur, provoquée par le contenu sémantique des phrases, est tributaire du contexte verbal positif ou négatif (Tomasino et al, 2010).

D'un autre côté, Nazir et al (2008) ont examiné l'hypothèse d'une présentation de verbes d'action avec un léger retard par rapport au début du mouvement de préhension. Pour ce faire, ils ont répliqué l'expérience de Boulenger et al (2006), en changeant un point crucial dans le protocole, celui de la temporalité entre le langage et l'action. Ainsi, des verbes d'action et des noms concrets (exactement ceux utilisés par Boulenger et al, 2006) ont été présentés visuellement. Deux conditions ont été testées, où les mots étaient affichés à 50 ms puis à 200 ms du début de l'acte moteur.

Les paramètres cinématiques témoignent d'une perturbation du mouvement de préhension, survenue dans les deux conditions (Figure 12). Toutefois, une différence subsiste entre les verbes et les noms et ce indépendamment de la condition.

Lorsque les mots ont été présentés 50 ms après le début de la préhension, le pic d'accélération présentait un écart significatif, entre les verbes d'action et les mots concrets, à partir de 32% jusqu'à 40% du temps du mouvement normalisé (Figure 12A). Dans la condition 200 ms, cette différence a été observée à deux reprises, entre 23% et 27% puis entre 36% et 43% du temps global du mouvement de préhension (Figure 12B). Il est à noter que dans les deux conditions, la différence entre les verbes et les noms est survenue au moment de la décélération du mouvement ainsi qu'au pic de vitesse. La décélération a été plus importante à la lecture de noms, ce qui suggère, d'après Nazir et al, que les verbes perturbent davantage l'exécution de l'action motrice que les noms.

Pour ces auteurs, ces données confirment que *les verbes d'action interfèrent de manière spécifique avec le mouvement de préhension* lors de leur présentation à 50 ou à 200 ms qui suivent l'action.

La perturbation du mouvement de préhension suite à la présentation tardive des verbes d'action pourrait, selon Nazir et collaborateurs, être expliquée par les phases de préparation et/ou d'exécution du mouvement. À cet égard, Riehle (2004) a apporté un

début de réponse avec ses travaux sur des singes, en décrivant la dynamique d'activation des neurones moteurs lors d'une tâche motrice. Ses résultats montrent l'existence de trois types de neurones qui déchargent soit à la fois au moment de la préparation et de l'exécution du mouvement (Figure 13A), soit *seulement* pendant l'exécution (Figure 13B), soit *uniquement* lors de la préparation du mouvement (Figure 13C). On observe ainsi un maintien de l'activité cortico-motrice tout au long de l'exécution du mouvement volontaire (Grammont et Riehle, 1999 ; voir Riehle, 2004).

En supposant que ce modèle puisse être applicable à l'homme (voir Georgopoulos, 2000), le processus de traitement de verbes d'action, tel qu'il a été testé par Nazir et al, pourrait interférer avec le mouvement à n'importe quel moment entre le début de la préparation et la fin de l'action motrice. Autrement dit, la présentation de mots à 50 et 200 ms après le début du mouvement pourrait perturber le déroulement de celui-ci puisque une partie des régions motrices cérébrales maintiendrait son activité pendant le traitement linguistique.

Toujours dans l'optique de la recherche d'un possible effet de facilitation et/ou d'interférence du mouvement par les verbes d'action, une étude récente s'est penchée sur cette problématique en demandant à des sujets de prononcer des mots d'action (Fargier et al, 2012). Ces auteurs se sont ainsi intéressés à l'impact de la génération du langage (verbalisation) sur la motricité et, dans un premier temps, ils ont mis en place un dispositif expérimental proche de celui utilisé par Boulenger et al (2006).

Les sujets devaient *atteindre* et *saisir* un objet cylindrique, puis le déplacer soit vers la droite soit vers la gauche (Figure 14). Trois conditions expérimentales ont été utilisées, la première requérait une verbalisation synchrone avec la tâche motrice des verbes *attraper* et *poser* conjugués à l'infinitif (condition dite rA pour *related-Action Verbal condition*). La seconde condition consistait dans la prononciation de mots sans relation avec les verbes de la condition rA, opérée en même temps que l'exécution motrice (condition uV pour *unrelated Verbal condition*). Le stimulus verbal de cette condition uV était la prononciation des noms d'animaux (*e.g.*: *papillon et pigeon*) et des nombres (*e.g.*: *un, deux, cent dix-neuf, cent vingt*). La troisième condition de ce

paradigme a été réalisée uniquement avec l'exécution d'un mouvement (condition NV pour *Non-Verbal condition*).

Dans une seconde expérience, les sujets ont été invités à prononcer un mot pendant la préhension de l'objet et un autre pendant les déplacements latéraux (Figure 14). On retrouve alors les conditions NV et rA, en plus d'une condition uA (*unrelated-Action verbal condition*) sans relation avec l'action à accomplir (prononcer les verbes *accroupir* et *courir*). La quatrième condition de cette expérience est la même que la condition uV de la première expérience mais en prononçant cette fois-ci les mots *aliment* et *piment*.

Plusieurs paramètres cinématiques du mouvement du poignet ont été enregistrés. L'analyse de la vitesse et de l'amplitude du pic de décélération a permis de mettre en évidence des différences significatives entre les conditions rA (prononciation de verbes d'action) et la condition contrôle NV (exécution du mouvement sans stimuli verbal) et ce, pendant les mouvements de préhension et de déplacement des deux expériences. La durée du mouvement et l'amplitude du pic d'accélération ont été significativement différent entre les conditions NV et rA uniquement lors du mouvement de préhension de la première expérience. Autrement dit, l'ensemble de ces paramètres étant affecté par la prononciation de verbes d'action, la vitesse du mouvement a été améliorée.

Ces résultats indiquent *un effet spécifique des verbes d'action sur la cinématique du mouvement de préhension et de déplacement*, ce qui n'a pas été observé avec les autres mots de non action.

De manière générale, Fargier et al, interprètent ces données comme étant la preuve directe d'une interaction entre la fonction langagière et l'action motrice, une théorie qui est aujourd'hui documentée par d'autres auteurs (Shtyrov et al, 2004 ; Pulvermüller et al, 2005 ; Boulenger et al, 2006, 2009 ; Nazir et al, 2008). Toutefois, et malgré que tous les indicateurs cinématiques convergent vers une amélioration de la performance motrice, Fargier et ses collègues n'ont pas attribué leur résultat à un éventuel effet de facilitation du mouvement. Il est probable que ceci serait dû à la

nature de la tâche langagière, *i.e.*: à la prononciation des mots, qui diverge des autres études (lecture silencieuse ou écoute de mots) ayant mis en avant un effet de facilitation ou de perturbation de l'action motrice (Boulenger et a, 2006 ; Nazir et al, 2010 ; Frak et al, 2010).

****** Compendium n°3 ******

Il en ressort, de ces expériences, une interaction évidente entre les verbes d'action et l'acte moteur, comme cela a été rapporté par des études utilisant la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) et l'imagerie cérébrale (Hauk et al, 2004 ; Buccino et al, 2005 ; Tettamanti et al, 2005). Toutes les études abordées dans cette partie, ont utilisé le geste de préhension, vraisemblablement pour la facilité d'enregistrement des paramètres cinématiques. Mais surtout qu'elles s'inscrivaient dans la continuité des travaux menés sur la compréhension des mécanismes de la motricité fine (voir Paulignan et al, 1991a, 1991b ; Gentilucci et al, 2008 ; Jeannerod, 2011), qui a pris de l'ampleur, notamment, après la découverte des neurones miroir chez le singe (di Pellegrino et al, 1992 ; Rizzolatti et al, 1996). L'impact du traitement des verbes d'action sur le mouvement dépend du moment de leur présentation aux sujets. Avant le mouvement, il y a effet de facilitation, en même temps que le mouvement, il y a effet d'interférence dit aussi de perturbation (pour une revue voir Chersi et al, 2010). Comme on a pu le voir, la perturbation du mouvement a pu être observée même quand le verbe a été présenté avec un léger retard en regard du geste moteur. Ces conclusions sont valables et ce, quelles que soient les modalités de la tâche verbale (mots lus, écoutés[12] ou prononcés). Le contexte linguistique à contenu positif aurait néanmoins plus d'effet sur la cinématique du mouvement en comparaison aux phrases dites négatives. L'éventuelle congruence entre les verbes d'action et l'effecteur impliqué n'est pas systématique, comme le montre les résultats de Boulenger et de Tomasino.

[12] Excepté les résultats de Frak et al (2010) qui avaient conclu à une amélioration de la performance en force suite à l'écoute de verbes d'action, présenté simultanément au mouvement de préhension.

2.2. Etudes électrophysiologiques

Dans une tâche de décision lexicale, Pulvermüller et ses collègues (1999a) ont observé une différence électro-corticale lors du traitement de verbes d'action par rapport aux noms à fortes associations visuelles (les auteurs n'ont pas précisé la liste des mots utilisés). Le tracé d'EEG enregistré, a révélé une activité électrique plus importante, dans la partie qu'ils appellent fronto-centrale[13] du cortex (incluant les aires motrices), à la présentation de verbes décrivant une action, tandis que les noms visuels ont suscité une activité corticale prononcée dans les zones occipitales. Ces observations ont été visibles sur la courbe du potentiel évoqué à partir des 200 ms qui ont suivi le début du stimulus (Figure 15). Par ailleurs, les données cinématiques n'ont révélé aucune différence statistique au niveau du temps de réponse entre les verbes (721 ms) et les noms (727 ms).

De telles différences électro-corticales d'origine lexicale avaient déjà été précédemment établies (Samar et Berent, 1986; Dehaene, 1995; Preissl et al, 1995). Ces auteurs n'ont pu rapporter aucune cartographie précise des activations cortico-électrique, notamment à cause de la faible résolution propre à l'EEG qu'ils avaient utilisé. Des études précédentes à celle-ci utilisant des techniques d'imageries cérébrales (*e.g.:* la TEP) avaient permis l'obtention d'une meilleure localisation spatiale des aires corticales impliquées dans les tâches langagières permettant d'observer des patterns d'activations distincts entre les verbes d'action et les noms (Warburton et al, 1996 ; Martin et al, 1996). Les verbes suscitaient une forte stimulation des neurones dans les régions inférieures frontale et temporale comparés aux noms (Warburton et al, 1996). De même, les verbes se référant à une action accomplie avec un outil, induisent de fortes réponses au niveau des aires pré-motrices et du lobe temporal postérieur, alors que la dénomination d'animaux augmente l'activité corticale dans les régions occipitales dédiées à la vision (Martin et al, 1996). Ces résultats confirment les conclusions de

[13] C'est comme cela que Pulvermüller et al (1999a) définissent l'ensemble des aires, pré-motrice, motrice primaire ainsi que les aires sensorielles primaires.

Pulvermüller et collègues (1999a), à l'exception des activations temporales observées par ces derniers, qui semblent plutôt témoigner des limites de l'EEG[14].

Dans leur étude, Pulvermüller et collaborateurs (1999a) ont avancé l'hypothèse que la représentation corticale de mots se réalise par des ensembles de groupes de neurones, largement distribués dans le cerveau mais étroitement liés (voir la revue de Pulvermüller, 2011). Dans ce modèle, les activations sont étendues au-delà des aires péri-sylviennes du langage (Catani et al, 2005) afin de recruter les régions frontales pour les verbes et les aires temporo-occipitales pour les noms (Figure 16).

Le modèle décrit par la Figure 16 résume les activations observées ainsi que la spécialisation de ces groupes de neurones, soit dans le traitement de verbes d'action (dans le cortex moteur), soit dans celui des noms à forte association visuelle (dans le cortex temporo-occipital). Quant à la différence dans l'activité électrique entre les verbes et les noms, observée très tôt (dès 200 ms) suite à la présentation de mots, elle s'expliquerait par un processus semblable à celui définit d'*allumage* (*ignition*) par Braitenberg (1978) et Palm (1982). L'*allumage* correspondrait à une forte activation des groupes de neurones du tissu cérébral décrit dans la Figure 16, induisant un changement électro-cortical du potentiel évoqué par les stimuli verbaux (Pulvermüller et al, 1999a).

La distinction corticale entre les verbes et les noms a été confirmée dans la même année par l'équipe de Pulvermüller (Pulvermüller et al, 1999b), en comparant par EEG les activations cérébrales lorsque des sujets réalisaient une tâche de décision lexicale entre des verbes d'action, des noms d'action, des noms à fort attributs visuels et une liste de pseudo-mots. Tous les stimuli ont été écoutés. En enregistrant les potentiels évoqués par des verbes d'action ou des noms à fortes associations visuelles, les auteurs ont observé des différences, essentiellement au niveau des aires fronto-centrales et du cortex occipital, répliquant celles trouvées dans leur expérience précédente (1999a). *Ce résultat voudrait dire qu'au sein d'une même classe lexicale (noms d'action vs noms visuels), le concept de l'action a pu susciter des différences d'activation corticale*, *i.e.*: *les*

[14] Il faut dire que l'équipe de Pulvermüller avait utilisé un EEG équipé de 29 canaux seulement.

noms d'action ont activé les aires fronto-centrales et les noms visuels le cortex occipital (Pulvermüller et al, 1999b).

Dans la même optique, deux autres expériences ont été menées par le groupe de Pulvermüller afin de déterminer les régions corticales propres à des catégories de verbes d'action, *i.e.*: verbes qui décrivent un mouvement effectué avec les muscles de la face, de la main ou du pied. La première étude (Pulvermüller et al, 2000) avait comparé la représentation corticale suite à une tâche de discrimination lexicale entre les verbes d'action de la face (*e.g.*: *parler*) et ceux se référant au pied (*e.g.*: *kick* ou donner un coup de pied) ainsi qu'une série de pseudo-mots. L'enregistrement de l'activité corticale avec un EEG à 60 canaux, avait indiqué une différence de stimulation apparente le long de la bande M1, entre ces deux catégories de verbes d'action et ce, à partir de 240 ms après la présentation des stimuli.

Ce délai d'environ un quart de second, a été rapporté par une seconde étude (Pulvermüller et al, 2001) en explorant l'activité électrique du cerveau lors d'une tâche de décision lexicale. Les sujets étaient invités à répondre le plus rapidement possible si les stimuli affichés étaient des verbes d'action impliquant la face, la main ou le pied ou des pseudo-mots. L'analyse des tracés EEG a fourni différentes réponses corticales entre les trois types de verbes, qui étaient détectables dès 250 ms après la présentation visuelle des stimuli.

La réponse des verbes d'action en lien avec le bas du corps (*e.g.*: *marcher*) est arrivée tardivement, en impliquant la partie dorsale du cortex moteur (Figure 17A). Les verbes décrivant une action de la face (*e.g.*: *parler*), produisaient en premier une forte activation corticale au niveau de la fissure sylvienne gauche (Figure 17C).

Les données cinématiques correspondantes ont montré que les sujets répondaient plus vite à un verbe d'action de la face (676 ms) qu'à celui de la main (688 ms). Selon les auteurs, ces valeurs sont à leurs tours statistiquement significatives à l'égard du temps de réponse relatif aux verbes d'action du pied (708 ms). Dans la même étude (Pulvermüller et al, 2001), la vitesse de réponse des sujets n'était pas différente entre les verbes d'action de la face (665 ms) et de la main (670 ms), par contre l'écart

entre les verbes de la face et du pied (681 ms) demeurait significatif. Dans les deux cas, ceci indique une différence de vitesse de traitement entre les catégories de verbes d'action, induisant une activité neurophysiologique distincte sur la surface du cortex cérébral (Pulvermüller et al, 2001). Cette différence de vitesse d'analyse des verbes est liée, selon les auteurs, au fait que le flux d'information parcours plus de distance dans le cas d'un verbe d'action du pied (Figure 17A) que dans le cas d'un verbe d'action de la face (Figure 17C) (Pulvermüller et al, 2001).

Dans un autre paradigme expérimental Hauk et Pulvermüller (2004) ont exploré l'effet de la lecture silencieuse de verbes d'action sur l'activité du cortex sensorimoteur par EEG. Aucune réponse motrice n'a été nécessaire. Les verbes sélectionnés désignaient soit un mouvement effectué avec les mains ou les pieds soit ceux qui sont en forte association avec les mouvements de la face (la bouche, les lèvres …).

Les électrodes raccordées à l'EEG et placées sur le versant dorsal des aires fronto-pariétales, ont enregistré une activité électrique importante, lors de la lecture de verbes d'action du pied, au niveau de la portion dorsale des aires motrices, alors que les verbes désignant les mouvements de la face ont recruté la région ventrale du ruban moteur gauche. Quant aux verbes d'action de la main, ils ont induit une activité corticale accrue au niveau fronto-latéral de l'hémisphère droit (Hauk et Pulvermüller, 2004). Après 220 ms du début de la présentation des stimuli, tous les mots ont produit une activation corticale maximale dans leur région correspondante (Figure 18).

Hauk et Pulvermüller (2004) pensent que l'activation de l'hémisphère droit lors de la lecture de verbes d'action de la main témoigne de son rôle dans le traitement de mots d'action, comme le suggère les travaux Neininger et Pulvermüller (2001 ; 2003) qui avaient observé un déficit dans le traitement de mots d'action suite à des lésions du cortex frontal droit. De plus, le caractère complexe des actions décrites par les verbes se référant à la main (*e.g.*: *tricoter, dessiner*) pourrait faire intervenir, selon Hauk et Pulvermüller (2004), les aires préfrontales connues pour leur contribution dans la planification des actions complexes (Fuster, 1998).

L'ensemble de ces résultats correspond au modèle de distribution somatotopique corticale illustré par la Figure 17 – *jadis démontré par Penfield et Boldrey dès les années trente (1937)* – et rejoigne par ailleurs, selon Hauk et Pulvermüller (2004), les travaux menés sur les neurones miroirs où les aires dorsales du cortex moteur ont été impliquées lors de l'observation de mouvement effectué avec les pieds (Buccino et al, 2001). Ces derniers auteurs ont également montré une activation des aires motrices de la face lors de l'observation d'une action commise avec l'effecteur en question, *i.e.*: la face. Hauk et Pulvermüller (2004) ont ainsi émis l'hypothèse selon laquelle les neurones miroirs présents dans le cortex pré-moteur puissent avoir un rôle à jouer dans le traitement de verbes d'action, compte tenu que l'aire pré-motrice est fortement activée lors de la préparation et de l'exécution du mouvement et même lorsque ces actions sont perçues acoustiquement ou visuellement (Rizzolatti et al, 2001 ; Rizzolatti et Luppino, 2001). Ainsi, il a été proposé que ces neurones de l'aire pré-motrice deviennent actifs dès le début du processus verbal en jouant un rôle important dans l'identification de mots (Hauk et Pulvermüller, 2004). Ce point de vue est d'autant plus étayé lorsque des lésions du lobe frontal causent des déficits dans le traitement de mots d'action (Gainotti, 2000 ; Bak et al, 2001 ; Neininger et Pulvermüller, 2003).

La distribution des réseaux de neurones sous-tendant les aires motrices dans le cerveau et leurs capacités à coder l'information sémantique a été vérifiée par Shtyrov et al (2004). La réponse corticale à l'écoute de verbes d'action a été mesurée à l'aide de la technique de *négativité de discordance* (MisMatch Negativity ou MMN) qui correspond à une onde cérébrale visible sur l'EEG lorsque le stimulus est inattendu (déviant). Les sujets devaient écouter le pseudo-mot *fik* étant le stimulus standard, puis apparaissent par surprise deux verbes d'action étant les stimuli déviants. Ces verbes exprimés soit une action performée avec la main (*pick ou pincer*) soit avec le pied (*kick ou donner un coup de pied*).

L'écoute de verbes d'action a induit, selon Shtyrov et al, une activité corticale distribuée au niveau des aires centro-postérieures (Figure 19). Ceci dit, en examinant cette dernière figure de plus près, on constate des activations temporales. Le verbe d'action de la main *pick* a ainsi suscité des activations répandues sur le côté latéral, alors

que le verbe d'action du pied *kick* a récolté une activité cérébrale accrue au niveau dorsal du cortex moteur, incluant les aires pariétales. Cette activité pariétale, avancent Shtyrov et collaborateurs, pourrait être liée à l'insuffisance de la résolution spatiale de l'EEG utilisé.

On constate, par ailleurs, que les activations temporales consécutives à l'écoute du mot « pick » (Figure 19), contredisent l'homunculus de Penfield et Boldery (1937) mais aussi les résultats d'imageries et d'électrophysiologies de l'équipe même de Pulvermüller, dont Shtyrov fait partie (Hauk et al, 2004 ; Pulvermüller et al, 2005a ; Shytrov et al, 2008 ; Hauk et Pulvermüller, 2011 ; Moseley et al, 2012).

Selon le modèle de Pulvermüller (2005), les mots décrivant une action de la main recrutent les aires péri-sylviennes du langage en plus de la partie médiane du cortex moteur primaire (voir Figure 17B), tandis que les mots d'action du pied sont traités dans la partie dorsale du ruban moteur (voir Figure 17A). Par ailleurs, le pic de réponse MMN aux mots d'action est apparu dès la 144ème ms suivant leur présentation, pour le mot *pick,* et 40 ms plus tard pour le mot *kick*. Ceci s'accorde avec les conclusions de Pulvermüller et al (2001) concernant la différence de vitesse de traitement de verbes d'action qui est fonction de l'effecteur impliqué. Les délais évoqués (144 ms et 184 ms) rentrent dans le cadre du temps (~200ms) imputé aux processus cérébraux pour reconnaitre les mots (Pulvermuller et al, 1999a ; Shtyrov et al, 2004).

Au final, cette étude de Shtyrov et al (2004) rend compte des limites de l'EEG à déterminer avec précision les aires cérébrales impliquées dans le traitement de verbes d'action.

****** Compendium n°4 ******

L'ensemble de ces expériences confirment que les circuits neuronaux du système moteur sont impliqués dans les tâches langagières. L'aspect sémantique des mots utilisés fait ressortir des activations corticales au niveau sensorimoteur pour les verbes d'action, alors que les noms concrets mobilisent des patterns d'activation neuronales autour de la région temporo-occipitale. Dans les deux cas, la région péri-sylvienne du langage joue un rôle important dans le traitement linguistique. La lecture et l'écoute de verbes moteurs en lien avec la face, la main et le pied ont induit des réponses neurophysiologiques distinctes au niveau des aires motrices, dès le premier quart de seconde de leurs présentations. Au niveau cognitif, ce délai pourrait correspondre à celui de l'accès initial à l'information sémantique (Assadollahi et Pulvermüller, 2001 ; pour une revue voir Hauk et al, 2008). Une différence de vitesse de traitement de ces mots est apparue en faveur des verbes d'action de la face au niveau de la région frontal inférieure, puis ceux décrivant les mouvements du pied dans le versant dorsal du cortex moteur. Par contre, la faible résolution de l'EEG utilisée dans ces études n'a pas permis une détermination précise des aires corticales impliquées.

2.3. Etudes d'imageries cérébrales

Les aires du cerveau impliquées dans le processus de mots d'action ont été étudiées avec une précision accrue due à l'amélioration des techniques d'investigations d'imagerie cérébrale, comme l'imagerie à résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui a une meilleure résolution spatiale que l'EEG (même si la résolution temporelle est pire). Ainsi l'IRMf est utilisée en sciences cognitives pour analyser l'effet des différents stimuli sur le cerveau. Elle permet une visualisation indirecte de l'activité cérébrale suite au changement du niveau d'oxygénation du sang dans les zones cérébrales ciblées (avec des séquences echo de gradient grâce à l'effet BOLD, *Blood Oygenation Level Dependent*) ou par changements du flux sanguin (séquences d'écho de spin, peu utilisé dans la pratique).

L'une des premières études IRMf cherchant à identifier les zones cérébrales activées lors de traitement de verbes d'action et leur congruence avec les mouvements décrits fut celle de Hauk et al (2004). Ces auteurs ont analysé l'activité cérébrale des sujets, lors d'une tâche de lecture silencieuse de 150 verbes d'action, représentant la face, la main et le pied. Dans une seconde expérience, des mouvements ont été réalisés avec des verbes évoquant les mêmes parties du corps, *i.e.*: la face (*e.g.*: *lick* ou lécher), la main (*e.g.*: *pick* ou pincer) et le pied (*e.g.*: *kick* ou donner un coup de pied). L'enregistrement de variations hémodynamiques cérébrales (mesurées par l'effet BOLD) a ainsi révélé une activité corticale de nature somatotopique induite par la lecture de verbes d'action (Figure 20). La comparaison de tous les verbes d'action avec la ligne de base (fixation du symbole dièse ''#'') a permis l'obtention de la cartographie illustrée dans la Figure 20A. Cette dernière a révélé des patterns d'activations au niveau de l'aire de Broca en plus des aires fronto-centrales qui inclut les aires motrice et pré-motrice. Hauk et al, par ailleurs, suggèrent l'implication du gyrus fusiforme gauche, classiquement impliquée dans la reconnaissance de la forme des mots écrits (Dehaene et al, 2002), ainsi que le cortex temporal inférieur gauche (non montré par la Figure 20), connu pour sa contribution au traitement sémantique (Price et Friston, 1997).

D'un autre côté, l'exécution motrice a stimulé les mêmes aires cortico-motrices recrutées par les verbes d'action (Figure 20B), mettant en évidence une interaction entre le mot d'action perçu et l'effecteur qui le représente au sein du système moteur. Les mouvements de la face, de la main et du pied ont suscité des activations sensorimotrices respectivement au niveau des aires frontales inférieures, dorso-latérales et dorsales (Figure 20B). De la même manière, la lecture de verbes d'action se référant à la face a recruté des neurones dans le cortex pré-moteur (portion inférieure frontale) des deux hémisphères. La présentation des verbes d'action de la main a eu des réponses corticales bilatérales visibles dans le cortex pré-moteur (partie médiane) en plus du cortex moteur primaire gauche (gyrus précentral). Enfin, Hauk et al notent avoir observé lors de la lecture de verbes d'action du pied des activations au sein de l'aire dorsale pré-motrice, ainsi qu'au niveau du gyrus central antérieur et postérieur (Figure 20C).

Ces résultats mettent en avant une apparente organisation somatotopique, notamment de l'aire M1 pour *kick* et *pick* et de l'aire pré-motrice pour *lick*, suite aux tâches verbales et motrices (Hauk et al, 2004). Les auteurs affirment que l'action accomplie avec les muscles de la main, ainsi que la lecture de verbes correspondants, ont conjointement recruté le gyrus précentral gauche et le gyrus frontal moyen de l'hémisphère droit. La même chose a été observée lors de la lecture de verbes d'action du pied et de l'action motrice de cet effecteur au niveau médian et dorsal des gyrus pré et post-central gauche. Par contre, aucune aire commune n'avait participé à la lecture de verbes d'action de la face et l'exécution motrice qui en découle (Hauk et al, 2004).

L'ensemble de ces résultats semblerait[15] montrer que la lecture passive de verbes d'action active de manière somatotopique le cortex moteur et pré-moteur, qui sont également recrutés lors de l'exécution des mouvements correspondants. Hauk et al (2004) en ont conclu que les verbes d'action de la main sont représentés spécifiquement au niveau de l'aire motrice primaire et pré-motrice, tandis que les verbes désignant une action accomplie avec les pieds activent de manière somatotopique l'aire motrice primaire et cela de manière plus évidente au niveau de l'hémisphère gauche, dominant pour ce qui concerne le langage. Les patterns d'activations communs au langage et à l'action localisés dans le cortex pré-moteur pourraient être consécutifs à la présence des neurones miroirs dans cette région (Hauk et al, 2004). Il a été montré que ces neurones capables de coder pour une action motrice observée (Buccino et al, 2001, 2005 ; Rizzolatti et al, 2002 ; Schubotz et von Cramon, 2002) l'ont été également pour le traitement de mots d'action et la programmation de mouvements du corps (pour revue voir Arbib, 2006 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2011). De manière générale, Hauk et al (2004) proposent l'hypothèse d'une organisation dynamique (distribution neuronale sur l'ensemble du cerveau) du processus de traitement sémantique de mots contrairement au point de vue qui suggère que ce processus relève de zones cérébrales localisées (Mummery et al, 1998 ; Price et al, 2001 ; Scott et Johnsrude, 2003).

Tettamanti et al (2005) ont rapporté des activations similaires à celles observées par Hauk, en utilisant des phrases d'action. Les participants ont écouté des phrases

[15] Voir les études qui contredisent la somatotopie des aires motrices dans le chapitre 3.

désignant des actions commises avec la bouche (*e.g.*: *Je mords dans une pomme*), la main (*e.g.*: *Je saisis un couteau*) et le pied (*e.g.: Je tape dans un ballon*). La condition contrôle consistait à écouter des phrases abstraites sans rapport avec le mouvement (*e.g.*: *j'apprécie la sincérité*). L'analyse hémodynamique, mesurée par IRMf (grâce à l'effet BOLD), a révélé une augmentation du flux sanguin dans l'hémisphère gauche consécutive à l'écoute de phrases d'action (Figure 21). Le gyrus frontal inférieur (aire de Broca) dans sa partie *operculaire* (B44), a été stimulé par l'écoute de toutes les phrases d'action, alors que les phrases abstraites ont recruté le gyrus cingulaire postérieur (localisé sur la face interne, supra-callosale, des deux hémisphères) bien loin des régions corticales qui s'occupent de la motricité.

Toujours chez Tettamanti et al (2005), les phrases écoutées se référant aux mouvements de la bouche ont activé le gyrus frontal ventrale dans ses parties *operculaire* (B44) et *triangulaire* (B45). Les phrases contenant des verbes d'action de la main ont recruté principalement les aires de l'hémisphère gauche, notamment le gyrus précentral et temporal inférieur (coté postérieur) ainsi que le sillon postérieur interpariétal. Quant aux phrases désignant les actions réalisées avec le pied, elles ont activé le cortex pré-moteur de l'hémisphère gauche (dorsal et rostral) en plus de l'implication du lobe pariétal inférieur gauche (Figure 21). L'identification de ces régions rejoint celles impliquées dans les processus d'exécution et d'observation de l'action (Rizzolatti et al, 1996 ; Buccino et al, 2001 ; Aziz-Zadeh et al, 2006 ; Tremblay et Small, 2011). Tettamanti et ses collègues (2005) suggèrent que ces aires pourraient contribuer à la compréhension du contenu sémantique transmis par les phrases. L'aspect spécifique (somatotopique) des activations observées et leurs localisations le long du cortex pré-moteur[16], rejoint les conclusions des études précédentes (Tranel et al, 2001 ; Hauk et al, 2004). L'implication de l'aire de Broca lors de la perception de phrases d'action s'avère cruciale, notamment pour son rôle connu dans l'analyse de la structure syntaxique de la phrase (Moro et al, 2001 ; Shapiro et al, 2001 ; Tettamanti et al, 2002).

[16] Dans leur travaux, Penfield et Rasmussen (1950) ont observé une somatotopie des aires sensorimotrices, *i.e.:* l'aire motrice primaire (M1) ainsi que les aires sensorielles primaires (S1, S2 et S3).

La latéralité hémisphérique des activations du système moteur observées jusqu'ici a été vérifiée récemment par Hauk et Pulvermüller (2011). Pour comparer les stimulations corticales entre gauchers et droitiers, les auteurs ont demandé à des sujets de lire silencieusement des verbes d'action performés avec la main. Ces verbes représentés soit une action réalisée de manière *uni-manuelles* (avec la main dominante, *e.g.*: *jeter*) soit de façon *bi-manuelles* (avec les deux mains, *e.g.: applaudir*). Des verbes d'action désignant des mouvements normalement réalisés avec les pieds, ont été également présentés (*e.g.*: *marcher*). D'autres stimuli ont été testés : des mots de non action, des pseudo-mots prononçables ainsi qu'une série de caractères spéciaux (*e.g.*: le symbole *dièse* ''#'') utilisé comme condition de contrôle (Hauk et Pulvermüller, 2011).

L'examen de l'activité cérébrale hémodynamique (il s'agissait d'une étude par effet BOLD en IRMf) suite à la lecture silencieuse de ces mots indiquent que l'ensemble des verbes d'action de la main stimulent principalement l'hémisphère gauche (indépendamment du bras dominant) au niveau du lobe temporal, avec la participation du cortex frontal inférieur ainsi que du sillon post-central (Figure 22A). La seule aire activée dans l'hémisphère droit était le gyrus temporal moyen. L'analyse des activations cérébrales en fonction des groupes, *i.e.:* chez les gauchers et droitiers, a révélé un flux sanguin important chez tous les sujets au niveau de la région péri-sylvienne et temporale inférieure gauche, en plus de l'activation bilatérale du gyrus temporal moyen (Figure 22B). Toutefois, l'activité corticale a été plus prononcée dans l'hémisphère droit lors de la présentation de mots bi-manuels.

Ainsi, les verbes bi-manuels ont produit des activations au niveau du cortex moteur des deux hémisphères chez les gauchers et les droitiers. Le même résultat a été observé avec les mots uni-manuels uniquement dans l'hémisphère gauche. Il y a donc, selon Hauk et Pulvermüller (2011), une différence significative dans les réponses hémisphériques engendrées par les deux types de verbes d'action.

Willems et collaborateurs (2010), toutefois, avaient précédemment rapportés qu'une décision lexicale, entre des verbes d'action uni-manuels (*e.g.*: *jeter*) et non manuels (*e.g.*: *s'agenouiller*), recrutait de manière plus importante le cortex pré-moteur gauche des participants droitiers, que celui des participants gauchers. Ce résultat

impliquerait que nos représentations mentales des mots d'action sont influencées par la manière dont nous accomplissons l'action (Willems et al, 2009). Les résultats de Willems rejoignent les résultats des études qui soutiennent l'hypothèse que le système moteur impliqué lors du traitement sémantique du concept de l'action (*e.g.*: observer une action, écouter des mots d'action, etc.) est façonné par les expériences individuelles (Rocca et al, 2008 ; Willems et al, 2009 ; Lyons et al, 2010). Par exemple, Lyons et al (2010) avaient constatés, dans leur étude par IRMf, que l'écoute de phrases d'action activait significativement plus de *voxels* dans le gyrus frontal inférieur gauche et l'aire pré-motrice dorsale gauche chez des hockeyeurs experts à l'égard de leurs homologues novices.

****** Compendium n°5 ******

L'ensemble des expériences réalisées par IRMf ont apporté des précisions plus affinées que celles observées dans les études électro-physiologiques. En effet, la meilleure résolution spatiale de l'IRMf a permis de mettre en évidence des activations de type somatotopiques dans le système moteur lors du traitement de verbes d'action, indépendamment du mode de présentation (lus ou écoutés) ainsi que du contexte (mots isolés ou inclus dans une phrase). Ces ensembles neuronaux sont également activés lors de l'exécution ou l'observation des mêmes mouvements décrits par ces mots. Les verbes à fort attributs moteurs liés à la face vont ainsi mobiliser le côté inférieur de la bande motrice, tandis que ceux de la main activeront la partie médiane et le pied sera représenté au sein de l'aire dorsale du cortex moteur. Les résultats obtenus corroborent ceux de Kemmerer et al (2008) qui ont observé l'activation des cortex moteur primaire et pré-moteur suite à la perception de plusieurs *classes de verbes d'action.*

Toutefois, l'aspect somatotopique rapporté par l'ensemble de ces études IRMf a été critique (Postle et al, 2008 ; pour revue voir Fernandino et Iacoboni, 2010 ; Bedny and Caramazza, 2011 ; ce point sera développé dans le chapitre 3). D'autres études IRMf ont confirmé le lien étroit entre les aires motrices et les verbes d'action, notamment en les comparant aux verbes abstraits (Ruschemeyer et al, 2007) ou à l'observation d'objets et à la simulation mentale de mouvements (Péran et al, 2010). Quant à la latéralité des patterns d'activations enregistrés lors du processus de traitement de verbes d'action, il

est encore tôt pour affirmer les résultats obtenus vu le très peu d'études menées sur ce sujet.

2.4. Etudes par TMS

La stimulation magnétique transcrânienne (ou TMS de l'anglais *transcranial magnetic stimulation*) est un outil d'investigation largement utilisé aujourd'hui dans le domaine des neurosciences cognitives. Le principe étant d'appliquer une impulsion magnétique sur une aire corticale à travers la boîte crânienne dans le but de modifier l'activité neuronale de la région visée. Le champ magnétique engendré entraine alors une lésion temporaire (ou virtuelle) au niveau du tissu cible permettant de vérifier le degré de son implication dans telle ou telle fonction cognitive.

Un nombre important d'études par TMS s'est intéressé aux liens fonctionnels sous-tendant la modulation des aires cortico-motrices par le traitement de verbes d'action. Parmi elles, l'étude d'Oliveri et al (2004) a permis de tester l'hypothèse selon laquelle le cortex moteur primaire pourrait être activé durant le traitement de mots d'action. Ils ont présenté des noms concrets évoquant une action (*e.g.*: *une clé*) et des verbes d'action (*e.g.*: *jeter*) à des sujets qui devaient les lire à haute voix. La condition contrôle consistait à lire des noms (*e.g.*: *une cage*) et des verbes (*e.g.*: *estimer*) sans relation avec un acte moteur. La stimulation magnétique a été appliquée au niveau de l'aire motrice primaire gauche responsable des mouvements de la main 500 ms après le début de la présentation des mots. Des électrodes ont été placées sur les muscles de la main droite des sujets afin de mesurer l'amplitude du potentiel évoqué moteur (PEM). L'analyse des PEMs n'a révélé aucun effet grammatical entre la prononciation des noms et celle des verbes, ce qui suggère, selon Oliveri et al, que l'activation du cortex moteur ne varie pas en fonction de la classe grammaticale des mots produits. Ces résultats rappellent les conclusions de Pulvermüller et al (1999b) lorsqu'ils avaient observés, par EEG, des patterns d'activation similaire à l'écoute de verbes et de noms d'action. D'un autre côté, Oliveri et al (2004) ont observé une activité sensorimotrice importante lors de la prononciation de mots d'action (verbes et noms) en comparaison aux mots sans

aucune association avec l'action. Par ailleurs, ces auteurs arrivent à la conclusion que *la simulation mentale des actions décrites par ces mots, pourrait expliquer l'implication de la zone corticale relative aux mouvements de la main dans le processus de verbalisation.*

D'un autre côté, Buccino et ses collègues (2005) ont confirmé ces résultats dans un paradigme d'écoute de phrases désignant une action réalisée avec la main (*e.g.*: *il tourne la clé*) ou le pied (*e.g.*: *il frappe la balle*). Au même temps, le PEM a été enregistré à partir des muscles de la main quand la TMS a été appliquée aux aires motrices gauches de la main (pour les phrases d'action de la main) et à celles qui s'occupent du contrôle de mouvements effectués avec le pied (pour les phrases d'action du pied). Des phrases abstraites (*e.g.*: *il aime son* pays) ont été également présentées sous forme acoustique pour constituer la condition contrôle. En accord avec le délai d'intervention du processus sémantique qui s'opère aux alentours du quart de seconde (Pulvermüller et al, 1999a, 1999b ; Assadollahi et Pulvermüller, 2001), Buccino et collaborateurs ont choisi de délivrer la stimulation magnétique à environ 500-700 ms après le début de présentation acoustique des phrases afin de permettre aux participants de s'approprier le sens du verbe d'action contenu dans la phrase.

Une seconde expérience, de type cinématique, a été menée au sein de la même étude (Buccino et al, 2005) pour vérifier la vitesse à laquelle les sujets traitaient sémantiquement les phrases. Cette fois-ci, les participants devaient répondre à l'écoute de phrases d'action de la main avec leur main droite et avec le pied droit dans le cas des phrases exprimant une action effectuée avec le pied. Aucune réponse n'a été requise à la présentation de phrases abstraites. La stimulation de la région motrice de la main a induit une diminution significative de l'amplitude des PEMs à la perception de phrases d'action de la main au regard des autres phrases d'action du pied et abstraites (Figure 23A). Le même résultat a été observé lors de l'écoute de phrases d'action du pied après stimulation de l'aire motrice du pied. L'écoute de phrases abstraites, toutefois, n'a pas provoqué des réponses significativement différentes des effecteurs (Figure 23A).

Le temps de réaction a été plus important lorsque les participants ont répondu avec leur main aux phrases d'action désignant le même effecteur, soit 320 ms, comparé à l'écoute de phrases d'action du pied, soit 302 ms (Figure 23B). Dans le groupe qui avait

répondu avec le pied, l'écoute de phrases d'action du pied a suscité des temps de réaction plus long (392 ms) à l'égard des phrases d'action de la main (376 ms).

Ces résultats cinématiques de Buccino et al (2005) convergent avec ceux obtenus à partir de la TMS dans le sens où la modulation des aires motrices est spécifique aux effecteurs impliqués dans l'écoute de phrases d'action. *Toutefois, la modulation du cortex moteur n'est pas exclusivement liée à la perception de verbes d'action*. C'est le cas lors de l'écoute d'un son produit par une action effectuée avec la main (Aziz-Zadeh et al, 2004), ainsi qu'à l'écoute de phonèmes (Fadiga et al, 2002).

Les résultats de Buccino et al (2005), sont, par ailleurs, en accord avec les études IRMf qui avaient enregistrées des activations somatotopiques au sein du cortex moteur, soit lors de la lecture de verbes d'action (Hauk et al, 2004), soit lors de l'écoute de phrases d'action (Tettamanti et al, 2005). Cette distribution cortico-motrice avait été également pointée au cours de l'observation d'actions effectuées avec la bouche, la main et le pied (Buccino et al, 2001). Ces résultats, selon les auteurs (Buccino et al, 2005), pourraient soutenir l'hypothèse que les neurones miroirs contenus dans le cortex pré-moteur ne s'activent pas seulement lors de la compréhension d'actions observées, mais également lors du codage de phrases d'action écoutées.

L'implication des voies neuronales du système moteur dans la compréhension de phrases d'action pourrait être expliquée par la théorie qui stipule que la compréhension du langage serait de nature *incarnée* (du terme anglais ''*embodiment*''. On retrouve également les traductions *incorporée* et *intégrée*). En d'autres termes, *la compréhension du sens dégagé par une phrase d'action impliquerait une simulation mentale de l'action exprimée par le contexte linguistique, produisant l'activation des mêmes aires motrices responsables du contrôle de cette action (Buccino et al, 2005).*

En ligne avec cette hypothèse, il a été rapporté que l'aire de la main dans le cortex moteur primaire semble impliquée dans le traitement de verbes d'action lus silencieusement et désignant un mouvement de rotation de la main (*e.g.*: *visser*) lorsque des sujets simulaient mentalement cette action (Tomasino et al, 2008 ; voir aussi pour la rotation mentale Hoyek et al, 2009). En revanche, la seule lecture passive de ces mots ne

semblait pas être influencée par la TMS appliquée à l'aire motrice de la main (Tomasino et al, 2008). Le rôle de la simulation motrice dans le processus du langage d'action reste, cependant, à approfondir.

Dans un paradigme de décision lexicale, Pulvermüller et ses collaborateurs (2005a) s'apprêtaient à confirmer les résultats TMS présentés jusqu'ici, en demandant à des sujets droitiers de répondre aux stimuli affichés sur l'écran (lecture silencieuse de verbes d'action) avec un mouvement vif des lèvres (sans prononciation). Pour se faire, les sujets ont été équipées de deux électrodes afin d'enregistrer les temps de réponse électro-myographique des mouvements des lèvres. Les stimuli étaient des verbes désignant un mouvement réalisé avec la main (*e.g.*: *pick*) et le pied (*e.g.*: *kick*), en plus d'une série de pseudo-mots. La stimulation magnétique intervenait 150 ms[17] après le début de la présentation de mots, au niveau des aires dédiées à la main et au pied dans le cortex moteur gauche (Pulvermüller et al, 2005a). Deux conditions contrôles ont été réalisées : d'un côté, stimuler l'hémisphère droit exactement dans les mêmes conditions que le gauche (stimulation magnétique administré sur les aires motrices de la main et du pied, 150 ms après le début d'affichage des mots) et de l'autre, effectuer une stimulation factice (*sham stimulation*) sur les deux hémisphères à la fin du stimulus. Celle-ci étant une sorte de condition contrôle afin de mimer les sensations auditives et somato-sensorielles produites par les vibrations mécaniques de la bobine lors de l'envoi d'impulsions magnétiques (Nikouline et al, 1999).

Lorsque les impulsions ont été appliquées sur la région correspondante à l'aire motrice gauche de la main, les sujets ont été plus rapides à reconnaître les verbes d'action de la main en comparaison aux verbes d'action du pied (Figure 24 : histogramme de gauche). De même, reconnaître des verbes d'action du pied était plus facile lorsque l'aire motrice correspondante était stimulée. Cependant, la réponse aux mots d'action de la main est restée stable quelle que soit la zone stimulée du cortex moteur primaire (celle de la main ou du pied), contrairement aux mots d'action du pied qui semblent avoir une action importante sur l'aire motrice du pied. Selon Pulvermüller

[17] Une étude récente a rapporté un délai d'accès lexical ultra rapide, de l'ordre de 50 ms, après la présentation acoustique de mots (MacGregor et al, 2012).

et al (2005a), ceci pourrait s'expliquer par la variabilité et la complexité des verbes d'action de la main. S'agissant des conditions contrôle, aucune différence significative n'a été constatée entre les deux types de verbe (Figure 24 : voir les histogrammes du milieu et celui de droite).

L'absence de différence de temps de réponse dans l'hémisphère droit pourrait être liée au fait que les droitiers utilisent généralement leurs hémisphère gauche lors du traitement du langage (Knecht et al, 2000 ; pour une revue voir Toga et Thompson, 2003).

L'ensemble de ces résultats indiquent que l'application de la TMS sur les aires motrices de la main et du pied, produit un effet différentiel sur la vitesse de traitement de verbes d'action relatifs aux mêmes parties du corps. Selon Pulvermüller et al (2005), la meilleure explication proviendrait des circuits neuronaux unissant le langage et l'action au niveau cortical (voir Figure 17). Ces réseaux prennent leur source au niveau du cortex frontal inférieur jusqu'au lobe temporal supérieur, couvrant ainsi toute la région péri-sylvienne classique du langage, en passant par d'autres aires linguistiques supplémentaires, localisées au sein même du système moteur, impliquées dans le processus de compréhension de mots d'action (Pulvermüller et al, 2001). Ainsi, les neurones spécifiques au traitement sémantique des verbes d'action de la main et du pied sont distribués respectivement sur le côté latéral et dorsal du cortex moteur (Pulvermüller et al, 2005a). Dans ce contexte, ces derniers auteurs ont interprété leurs données comme étant la preuve de la présence de liens fonctionnels spécifiques entre les régions classiques du langage et les aires motrices lors du processus d'analyse de mots d'action.

Papeo et ses collègues ont rapporté en 2009, une nouvelle preuve (obtenue par TMS) des liens probables entre verbes d'action et motricité. Ils ont stimulé la partie gauche du cortex moteur primaire au niveau correspondant à la motricité de la main droite, pendant une tâche de lecture silencieuse. Les mots présentés étaient des verbes d'action de la main (*e.g.*: *remuer*), des verbes d'action en lien avec les autres parties du corps (*e.g.*: *sauter*) ainsi que des verbes de non-action décrivant un état mental ou

psychologique (*e.g.*: *adorer*). Des électrodes ont été raccordées à la main droite des sujets pendant que les impulsions magnétiques étaient déclenchées sur l'hémisphère gauche à 170 ms (expérience 1), puis à 350 ms (expérience 2) et enfin à 500 ms (expérience 3) du début de la présentation visuelle des mots. Au sein de chaque expérience, les sujets réalisaient deux tâches : la première était de nature *sémantique* (juger si les verbes sous-tendaient un acte moteur ou pas), la seconde requérait une tâche dite *syllabique* (indiquer le nombre de syllabes de chaque verbe). Dans les deux cas, les réponses étaient données oralement par *Oui* ou par *Non*. Les temps de réponses ont été enregistrés dès le début de la prononciation, à l'aide d'un microphone externe raccordé à l'ordinateur, puis traités par un logiciel appelé *E-prime*.

Quand la TMS a été appliquée à 170 et à 350 ms post-stimulus, aucune augmentation significative n'a été observée au niveau de l'amplitude du PEM (Figure 25). A 500 ms du début de la tâche sémantique, le potentiel évoqué a été significativement augmenté lors de la lecture de verbes d'action de la main (*Hand-action verbs*) au regard des verbes de non action (*Non-action verbs*). Une différence notable a également été rapportée entre les verbes d'action du reste du corps (*Non-hand action verbs*) et les verbes de non action à 500 ms du choix sémantique. Ces résultats suggèrent que l'activation induite par le langage d'action dépendrait explicitement de la récupération du contenu de mots, autrement dit, leur sens (Papeo et al, 2009).

Quant à la tâche *syllabique,* l'amplitude du PEM a été diminuée de manière significative uniquement pendant la lecture de verbe d'action de la main à 500 ms post-stimulus (Figure 25). Ceci reflète, selon Papeo et al, l'inhibition du système moteur qui est non requis pour cette tâche. L'augmentation de l'activité du système moteur suite au traitement de verbes d'action corrobore les résultats précédents (Oliveri et al, 2004 ; Pulvermüller et al, 2005a) mais diverge avec les conclusions de Buccino et al (2005) qui avaient plutôt noté une diminution de l'excitabilité motrice.

Au niveau des temps de réponses enregistrés, les sujets ont jugé très rapidement l'aspect sémantique des verbes d'action (liés à la main ou pas) en opposition aux verbes de non-action, sauf pendant le processus de comptage de syllabes aux conditions 170 et 350 ms. Ceci indique que les verbes d'action perçus, qu'ils désignent un mouvement de

la main ou d'un autre effecteur, le temps de réponse demeure statistiquement le même. Ces catégories de verbes, *i.e.*: les verbes d'action de la main et ceux sans relation avec l'action de la main, peuvent être alors considérées comme étant une seule entité lexico-sémantique (Papeo et al, 2009). Ce qui, incidemment, va à l'encontre de l'organisation somatotopique du cortex moteur soutenue par un nombre important d'étude (Hauk et al, 2004 ; Pulvermüller et al, 2005a ; Buccino et al, 2005 ; Tettamanti et al, 2005 ; Aziz-Zadeh et al, 2006 ; Boulenger et al, 2009, 2012).

L'avantage de comparer les verbes d'action aux verbes de non-action a été rapporté dans la littérature (Kellenbach et al, 2002) suite à l'observation d'une différence électro-physiologique, uniquement à la 250ème ms suivant le début du stimulus, entre le traitement de verbes d'action et de verbes à forts attributs visuels ou sans association motrice. Une sorte, en somme, de priorité temporelle de la réponse corticale aux attributs moteurs (Kellenbach et al, 2002). Une autre étude (Laws et al, 1995) avait conclu au même effet de rapidité de réponse à des phrases fortement associées à un acte moteur, par opposition aux phrases exprimant un contexte visuel.

Ainsi, et selon Papeo et al (2009), il semblerait que le concept d'action susciterait plus d'images mentales et serait plus concret (par opposition aux mots abstraits) qu'une information linguistique dépourvue de notion d'action motrice. Par conséquent, Papeo et al, justifie cette hypothèse par le fait que les mots d'action possèderaient plus *d'imageabilité* et de *représentabilité* (Paivio, 1971 ; Talmy, 1985) que les mots de non-action. D'ailleurs, l'absence de l'une de ses deux caractéristiques pourrait affecter le processus de récupération et de reconnaissance de mots chez les sujets sains et cérébro-lésés (Berndt et al, 2002 ; Luzzatti et al, 2002). En d'autre terme, plus le mot sera *concret* et *imageable*, plus la réponse cérébrale sera rapide (Papeo et al, 2009). Dans l'expérience de ces derniers auteurs, la modulation de l'aire motrice de la main pourrait être liée au déclenchement ou pas de la simulation mentale des mots lus.

Récemment, une autre étude TMS a essayé de vérifier au sein d'une même expérience, l'impact de mots lus et écoutés sur l'excitabilité du cortex moteur (Labruna et al, 2011), lors d'un paradigme expérimental de lecture passive et d'écoute de verbes d'action de la main (*e.g.*: *applaudir*). Ces auteurs ont appliqué une impulsion

magnétique au dessus de l'aire motrice primaire de la main (dans l'hémisphère gauche, chez des sujets droitiers) après 150 puis après 300 ms de la présentation de mots. La condition contrôle consistait à présenter des noms évoquant la nature (*e.g.*: *forêt*) ainsi que des verbes abstraits (*e.g.*: *croire*). Le potentiel évoqué, enregistré à partir des muscles de la main droite, a révélé une augmentation de l'amplitude du PEM lors de la lecture de verbes d'action de la main à l'égard des autres mots et ce, indépendamment du moment d'application de la TMS (Figure 26). Cet effet n'a pas été rapporté lors de la session d'écoute de ces mêmes mots, ce qui confirme les résultats de Buccino et al (2005).

Labruna et collaborateurs (2011) ont attribué ces résultats aux différences qui pourraient exister entre les modalités auditives et visuelles et ce, en s'appuyant sur les données qui indiquent que les processus physiologiques sous-tendant le traitement d'un signal auditif sont plus rapides que ceux de la vision (Recanzone, 2009). Une hypothèse a été alors émise (Labruna et al, 2011) soutenant une différence quantitative dans le recrutement neuronal du système moteur pendant la compréhension des mots visuels et acoustiques.

La représentation des mots d'action au sein du cortex moteur semble susciter un intérêt croissant vu la très fine résolution qu'offre la TMS. Ces recherches, en accord avec les études IRMf présentées plus haut, ont démontré une spécialisation des aires motrices en fonction de l'effecteur impliqué. Il demeure, toutefois, des zones d'ombres et des contradictions quant au moment de l'application de l'onde magnétique, de la nature de la tâche linguistique ainsi que des conditions contrôles sous-tendant les résultats TMS présentés jusqu'ici. L'ensemble de ces critères pourraient être à l'origine des données divergentes observées (Labruna et al, 2011).

A propos de ces divergences, Labruna et al (2011) ont réussi à résumer l'ensemble de ces caractéristiques après une méta-analyse de travaux réalisée par TMS à ce sujet (Tableau 1). Ces études ont analysé le PEM produit par les muscles de la main droite à la suite d'une stimulation magnétique du cortex moteur gauche. L'application

de la TMS variait de 150 à 875 ms après la présentation des mots (voir Tableau 1, études D, E, F1, G, F2 et H). Les résultats engendrés offrent un panorama des stimulations (ou pas) du cortex moteur primaire relatives aux études présentées dans le Tableau ci-dessus (Figure 27).

Ces résultats démontrent une augmentation de l'activité corticale lors de l'observation de l'action d'autrui via un support visuel (A, Fadiga et al, 1995 ; B1, Patuzzo et al, 2003), ainsi que pendant les tâches d'imagerie mentale, où les sujets devaient simuler mentalement un mouvement réalisé avec la main (B2, Patuzzo et al, 2003 ; C1, C2 Fourkas et al, 2006). Par contre les tâches langagières ont produit des activations instables et très variables en fonction des stimuli : la lecture de mots d'action peut induire des stimulations plus ou moins importantes des aires motrices (G, Oliveri et al, 2004 ; D, Glenberg et al, 2008 ; E, Papeo et al, 2009 ; F1, Labruna et al, 2011), alors que l'écoute de ces mêmes mots produirait une inhibition du système moteur (H, Buccino et al, 2005 ; F2, Labruna et al, 2011).

****** Compendium n°6 ******

Les études par TMS ont réussi à asseoir un consensus quant à la modulation du cortex moteur suite au traitement de verbes d'action. Il en ressort ainsi une augmentation de l'activité électrique au niveau du système moteur suite à la lecture silencieuse et à la verbalisation de verbes d'action. L'écoute de ces mots provoquerait, à l'inverse, une diminution de la stimulation corticale des aires motrices, ce qui pourrait être lié au moment de la délivrance de la TMS et probablement aux différentes modalités d'application de la TMS (durée de stimulation, son intensité ainsi que la fréquence des impulsions délivrées).

Ces résultats contredisent ceux rapportés par les études IRMf, notamment l'étude de Tettamanti et collaborateurs (2005), qui avaient plutôt observé un recrutement accru des neurones moteurs à l'écoute des phrases d'action.

La plupart des études TMS mentionnées jusqu'ici n'ont pas testé l'activité du cortex moteur à différents stades temporels au cours du processus linguistique, excepté

celle de Papeo et al (2009). Autrement, l'ensemble des données démontrent que les régions linguistiques de l'hémisphère gauche dominant du langage ainsi que le système moteur sont étroitement liés. Leurs implications semblent évidentes dans le traitement de mots d'action indépendamment du fait que ces mots soient des noms ou des verbes, ce qui rejoint les conclusions extraites des expériences neurophysiologiques (Pulvermüller et al, 1999a, 1999b) affirmant l'impact de l'aspect sémantique des mots sur les circuits sensorimoteur. Les études cinématiques ont mis en pratique ces données pour en établir les effets de mots d'action sur la performance motrice (Fargier et al, 2012 ; Boulenger et al, 2006 ; Frak et al, 2010).

L'ensemble des études cinématiques, électro-physiologiques, IRMf et TMS s'accordent sur le fait qu'une activation du cortex moteur est évidente lors de l'analyse lexico-sémantique de verbes d'action. Reste à savoir si cette activité corticale est primordiale pour la compréhension des mots. Quelles sont les théories actuelles qui encadrent ce sujet ? Quels sont leurs arguments ? Nous nous attèlerons à répondre à ces questions dans le chapitre qui suit.

Chapitre 3. COMPRÉHENSION DES VERBES D'ACTION

La théorie de la cognition incarnée

On a eu jusqu'ici des preuves pertinentes de l'activation des circuits moteurs pendant le processus de traitement de mots d'action. Les raisons de cette implication suscitent aujourd'hui la curiosité des chercheurs en neurosciences qui essayent de comprendre le rôle fonctionnel des régions motrices dans le mécanisme de reconnaissance de mots d'action. Nous développerons dans cette partie les principales théories explicatives qui sous-tendent ce sujet. Nous verrons par la suite les études qui tentent d'expliquer ces activations motrices soit sur la base d'un *pur* traitement sémantique, soit à partir de simulations mentales des mots en question.

Nous examinerons, par ailleurs, les études qui remettent en cause la distribution somatotopique des patterns d'activation observés au sein des aires motrices lors de la compréhension des mots d'action. Nous étudierons également de résultats récents qui contredisent ceux présentés dans le chapitre précédent, puisqu'ils soulignent l'implication d'aires cérébrales autres que le cortex moteur primaire et pré-moteur dans la compréhension de mots d'action.

3.1. Comment la cognition explique-t-elle la compréhension des mots d'action ?

La suite logique des conclusions qui affirment que l'activation des aires motrices est visible pendant le processus de verbes d'action, a conduit les chercheurs à émettre plusieurs hypothèses, à se demander si l'implication de ces aires motrices est nécessaire pour comprendre un mot décrivant une action ou si elle n'est qu'un simple effet secondaire des différents processus cognitifs sous-jacents.

Aujourd'hui, le débat scientifique dans ce domaine compte deux hypothèses principales. La première, qui concerne le point de vue de la *cognition désincarnée* (*Disembodied cognition),* considère que la compréhension du langage est complètement

reliée sur les représentations mentales, symboliques et amodales[18] des mots (Fodor, 1975, 1983 ; Farah, 1989). Ainsi, conformément à cette hypothèse, le traitement de mots d'action s'opérerait hors des aires sensorimotrices (notamment les cortex moteur et sensitif primaires ; voir Mahon et Caramazza, 2008 et la figure 32).

La seconde hypothèse qui tente d'apporter une réponse à l'implication du système moteur dans la compréhension de mots d'action repose sur une pensée complètement inverse de la précédente. En effet, la deuxième hypothèse ou la théorie de la *cognition incarnée* (*Emdodied cogniton*) assume l'idée de la *résonance* motrice, *i.e.*: les circuits neuronaux impliqués dans la compréhension du langage sont également utilisés pour percevoir ou exécuter l'action en question (Varela et al, 1993 ; Lakoff, 1987; Glenberg, 1997; Pulvermüller, 2002; Zwaan 2004; Gallese et Lakoff 2005; Zwaan et Taylor 2006). Le point de vue véhiculé par cette hypothèse met également l'accent sur les expériences sensorimotrices de l'individu. En clair, nos connaissances et nos savoirs ne sont pas abstraits mais plutôt incorporés dans nos expériences sensorimotrices (Scorrolli et Borghi, 2007). Ceci implique une relation étroite entre perception, action et cognition (Varela et al, 1993 ; Thelen et Smith, 1994 ; Pecher et Zwaan, 2005).

Dans le cadre de la cognition incarnée, deux écoles se distinguent pour expliquer les mécanismes sous-tendant l'implication du cortex sensorimoteur dans la compréhension des mots d'action : la première défend un point de vue purement sémantique, au sein duquel le recours au traitement sensorimoteur est une condition *sine qua non* pour reconnaitre le sens des mots (pour revue voir, Pulvermüller, 2005 ; Pulvermüller et Fadiga, 2010 ; Cappa et Pulvermüller, 2012), tandis que la seconde défend une hypothèse de recherche basée sur une explication plus cognitive, mettant en avant la simulation mentale (voir § 3.1.2.) des mots comme raison principale pour la sollicitation des aires sensorimotrices lors du processus de compréhension de concepts d'action (pour revue voir, Barsalou, 1999 ; Gallese et Lakoff, 2005 ; Fischer et Zwaan, 2008 ; Willems et Casasanto, 2011).

[18] En psychologie, on entend par *amodalité* tout stimulus appréhendable par plusieurs sens, *e.g.*: la forme d'un objet peut être discernée à la fois par la vision et le touché, alors que sa couleur est uniquement perçu par la vision. Dans ce cas, on parle de caractéristique *modale* du stimulus.

3.1.1. L'hypothèse sémantique

Parmi les études qui se sont intéressées à cette hypothèse, nous voudrions mentionner celle de Sato et al (2008), qui ont testé trois conditions cinématiques. Dans une première expérience, suite à la présentation d'une tâche de décision sémantique entre des verbes d'action de la main (*e.g.*: *applaudir*) et ceux décrivant des mouvements effectués avec le pied (*e.g.*: *marcher*, ainsi que des verbes abstraits, *e.g.*: *aimer*, pour lesquels il fallait s'abstenir de répondre), les participants devaient répondre avec leur main droite, en appuyant sur une touche du clavier. La moitié des sujets ont lu silencieusement les mots affichés sur un écran d'ordinateur et l'autre les ont écoutés. Un cercle rouge apparaissait au centre de l'écran au début de chaque essai. Après un laps de temps de 150 à 500 ms le cercle devenait vert marquant le signal de départ de la réponse. Cette variation de délai permet d'éviter l'instauration d'une *habituation*[19] de la réponse motrice. D'ailleurs, ce délai de 150 ms correspond au temps nécessaire pour reconnaitre un mot écrit (Hauk et Pulvermüller, 2004).

La seconde expérience reprenait exactement les mêmes modalités, excepté le signal de départ qui a été présenté soit *tôt* dès 150 ms, soit *en retard* (jusqu'à 1150 ms) par rapport au début de la présentation visuelle des mots.

La troisième expérience, enfin, consistait à réaliser une tâche de décision lexicale, uniquement en visuel (lecture), avec les mêmes verbes d'action utilisés dans les expériences précédentes, en comparaison avec une liste de pseudo-mots.

Le temps de réaction étant enregistré dans les trois expériences.

Dans la première expérience le temps de réaction a été plus long quand les sujets répondaient aux verbes d'action de la main et ce, quel que soit la modalité de présentation (Figure 28 Aa). Les résultats de cette première expérience de Sato et al (2008) rejoignent ceux de Buccino et al (2005) qui avaient également constaté un temps de réponse du mouvement de la main plus long lors de l'écoute de phrases d'action impliquant le même effecteur.

[19] L'habituation est un phénomène psychologique qui s'installe lorsque l'action motrice est répétitive. Elle se caractérise par une diminution de la performance de l'action en question.

Par ailleurs, l'expérience de Sato a étendu ces résultats à la modalité visuelle du mot, indiquant que le système moteur est impliqué de la même manière à l'égard des deux modalités. Or, ceci ne confirme en aucun cas les récents résultats TMS de Labruna et al (2011) qui ont constaté une différence significative des activations corticales motrices entre les modalités visuelles et auditives. Cette divergence pourrait s'expliquer par la nature de la tâche verbale. Toutefois, les données apportées par Sato et al (2008) et Buccino et al (2005) sont conformes à la théorie de la cognition incarnée, qui suggère que les systèmes neuraux de la perception et de l'action sont également engagés durant le processus de compréhension du langage (Lakoff, 1987 ; Glenberg, 1997; Barsalou, 1999 ; Pulvermüller, 2002 ; Zwaan, 2004 ; Gallese et Lakoff, 2005 ; Zwaan et Taylor, 2006).

Pour autant, ces résultats ne nous permettent pas de distinguer si le recrutement du système moteur est vraiment nécessaire à saisir le sens renvoyé par le mot, ou c'est juste un phénomène qui accompagne la tâche linguistique.

Dans cette optique, les résultats obtenus dans la deuxième expérience de Sato et al (2008) apportent un début d'explication. Effectivement, un effet d'interférence entre les réponses motrices et les tâches sémantiques a été rapporté quand le signal de départ était donné *tôt*, mais pas lorsqu'il était délivré avec un retard par rapport à la présentation des verbes (Figure 28 B). Cet effet d'interférence indique, selon ces auteurs, une implication simultanée des aires motrices dans les tâches motrice et sémantique, diminuant par la sorte la performance motrice des sujets (augmentation du temps de réponse), lorsque le signal de départ est donné prématurement. Ceci pourrait traduire, selon Sato et al, que cet effet d'interférence est fortement tributaire du processus de compréhension des verbes d'action. Ces auteurs ajoutent que l'absence de modulation du système moteur dans le cas du signal de départ retardé, signifie que la participation du sysytème moteur n'est pas un simple phénomène qui accompagne la tâche langagière, mais joue plutôt un rôle fondamental dans la résolution de ces tâches.

Dans la troisième expérience de Sato et al, la tâche lexicale n'a pas révélée de différence significative entre les deux catégories de verbes d'action (Figure 28 Ab), démontrant ainsi que l'effet d'interférence est spécifique aux tâches sémantiques. Cette

conclusion rappelle celle de Pulvermüller et al (2001) lorsqu'ils avaient observé une réponse motrice de la main légèrement plus rapide à la perception des verbes d'action de la main qu'à ceux du pied.

Conformément à Sato et al (2008), la différence de modulation des réseaux cérébraux moteurs enregistrée lors la première (tâche sémantique) et de la troisième expérience (tâche lexicale) pourrait être due à la possible difficulté et exigence demandées par la tâche sémantique. L'autre hypothèse avancée par ces auteurs, concerne l'éventuelle divergence des stratégies adoptées par les participants : les expériences 1 et 2 ont exigé des sujets une analyse sémantique afin de distinguer les verbes d'action de ceux avec un contenu abstrait (non moteur), en revanche, l'expérience 3 (tâche lexicale) ne demandait pas un tel effort, puisque les pseudo-mots étaient construits sur la base d'un remplacement d'une seule consonne des verbes d'action présentés. Lors de cette dernière expérience, les sujets faisaient appel, très probablement, à l'aspect phonologique des verbes (voir Fadiga et al, 2002) plutôt qu'à un traitement sémantique des mots.

L'ensemble des données de Sato et al (2008) permettent de démontrer que *pendant le traitement de mots d'action, le système moteur est fortement impliqué quand la tâche à effectuer est de nature sémantique, soutenant ainsi l'idée que cette participation est nécessaire pour comprendre les verbes d'action.*

Une étude précédente à celle de Sato avait explorée cette caractéristique du cerveau liée à la reconnaissance des verbes d'action, en utilisant des enregistrements neurophysiologiques (Pulvermüller et al, 2005b). Ces auteurs ont examiné l'activité corticale des sujets à l'aide de la magnétoencéphalographie (MEG). Cette dernière permet de mesurer le champ magnétique induit par les courants générés par les neurones au moyen de capteurs positionnés à proximité de la région crânienne correspondante. Les sujets ont été alors invités à regarder une séquence vidéo muette tout au long de l'expérience, et à ignorer tout stimulus sonore. Les verbes d'action de la face (*eat* = *hotki* en suédois) et du pied (*kick* = *potki* en suédois) ainsi que des pseudo-mots ont été présentés acoustiquement via des écouteurs non magnétiques. Dans chacune des conditions, un verbe d'action finlandais a été présenté à plusieurs reprises

comme un stimulus *déviant, i.e.:* inattendu*,* au milieu d'une série de pseudo-mots (stimuli *standard*). Tous les mots débutaient avec la même syllabe (*hot* et *pot*), mais différaient dans la seconde syllabe.

L'analyse de la MEG a révélé des patterns d'activation différents induits par les verbes d'action de la face et du pied (Figure 29). Ces résultats corroborent les études IRMf où les verbes d'action des différentes parties du corps ont suscité des activations somatotopiques du cortex fronto-central (Hauk et al, 2004 ; de Lafuente et Romo, 2004). L'onde magnétique MMN (*MisMatch Negativity* ou technique de *négativité de discordance*), qui est la propre signature du stimulus *déviant,* a été enregistrée dans les deux hémisphères par Pulvermüller et al (2005b). Seulement l'hémisphère gauche est présenté dans la Figure 29, puisque le côté droit du cerveau a révélé, selon les auteurs, de faibles réponses aux stimuli verbaux. On y voit donc des enregistrements de l'activité corticale chaque 10 ms, rendant compte ainsi de l'évolution et de la propagation des foyers d'activation d'une zone cérébrale à une autre (Figure 29).

Ainsi, la réponse des sujets aux deux types de verbes d'action a suscité une stimulation temporale supérieure suivie d'une activité frontale inférieure, ce qui équivaut aux aires classiques du langage, respectivement Wernicke et Broca. Plus spécifiquement, le verbe d'action de la face a recruté l'aire fronto-centrale inférieure, tandis que le verbe d'action du pied a conduit à des activations motrices dorsales (Figure 29).

Les résultats de Pulvermüller et al (2005b) sont en accord avec les conclusions des études électro-physiologiques (Pulvermüller et, 1999a, 1999b ; Shtyrov et al, 2004) sur le fait que *l'activation du cortex moteur se produit tôt, dans les 200 ms qui suit la présentation du mot.* Puisque cette stimulation corticale est constatée dans un paradigme où les sujets étaient focalisés sur une autre tâche (visualisation d'une séquence vidéo) que celle du langage, Pulvermüller et al (2005b) ont alors conclu que les processus cognitifs sous-tendant l'accès à la compréhension des mots pourraient être *automatiques*, ce qui révèle, toujours selon ces auteurs, *l'importance des régions motrices dans la compréhension des verbes d'action.*

Ces auteurs, pensent que l'implication prématurée de l'aire temporale supérieure (à 160 ms) pourrait être liée au traitement acoustique (Patterson et al, 2002), mais aussi phonologique (Näätänen et al, 1997) et lexical (Pulvermüller et al, 2001) de l'information linguistique.

La région fronto-centrale a présentée des patterns d'activation différentiels, à 170 ms du début de la tâche, pour le verbe *eat*, puis à 200 ms pour *kick* (Figure 29). Ce délai et cette différence de traitement des mots ont été rapportés par Shtyrov et al (2004), dans une expérience utilisant également la MMNm. D'après Pulvermüller et collaborateurs (2005b), l'ensemble de leur résultat consolide l'aspect prématuré de l'accès sémantique lors de reconnaissance de mot parlé (écoute de mots), ce qui vient compléter le même résultat observé à la lecture de mots, précédemment établi par de nombreuses études (Skrandiess, 1998 ; Martin et al, 2001 ; Pulvermüller et al, 2001 ; Hauk et Pulvermüller, 2004).

Toutes ces études convergent vers une conclusion témoignant que certains aspects de la signification sémantique se produisent dans un délai cortical de 250 ms après le début d'une information linguistique visuelle ou auditive, ce qui est, pour Pulvermüller et al (2005b), suffisant pour identifier un mot. Ce délai est porté à 200 ms dans les études EEG qui ont analysé des mots écrits, *i.e.*: lecture silencieuse (Hauk et Pulvermüller, 2004 ; Pulvermüller et al, 2004). Pulvermüller et al (2005b) pensent que cette différence de vitesse de traitement corticale pourrait refléter la rapidité du processus du langage parlé (*écouter un mot*) par rapport au langage écrit (*lire un mot*).

Par ailleurs, et dans le but d'expliquer la différence de vitesse de traitement corticale observée entre les verbes d'action, ces mêmes auteurs (Pulvermüller et al 2005b) suggèrent que des neurones situés dans les différentes parties du cortex fronto-central, incluant les aires préfrontale, pré-motrice et motrice (Pulvermüller, 2001; Rizzolatti et al, 2001 ; Fuster, 2003) contribueraient de manière différente au processus sémantique des mots d'action.

L'ensemble de ces résultats et ceux présentés dans le précédent chapitre ont conduit Pulvermüller à proposer un modèle dynamique sous-tendant le traitement

cérébral des mots d'action, nommé *le modèle de somatotopie sémantique* (Pulvermüller, 2005). Comme son nom l'indique, ce modèle est basé sur les circuits et groupements de neurones disposés de manière somatotopique sur la surface des aires fronto-centrales et qui sont hautement spécialisés, du point de vue sémantique, pour telle ou telle catégorie de mots d'action. Ainsi, et comme on l'a vu à travers cet écrit (*cf.* § 2.2, 2.3 et 2.4), les aires motrices inférieures, proches de l'aire de Broca, seraient dédiées à l'analyse des mots d'action de la face, celles de la portion médiane du cortex moteur s'occupent du traitement des mots d'action de la main et enfin la partie supérieure de ce même cortex serait le siège du traitement des mots exprimant une action commise avec le pied (pour une revue voir Pulvermüller et Fadiga, 2010 ; voir aussi la Figure 30 qui a déjà été présentée dans le § 2.2 sous la dénomination Figure 17. *Modèle de la représentation corticale des assemblées de neurones consécutives aux verbes d'action*).

Selon Pulvermüller (2005), le modèle de somatotopie sémantique repose essentiellement sur trois points :

a- L'écoute et la lecture de mots d'action recruteraient les aires cortico-motrices responsables du contrôle et de l'exécution des actions et ce, d'une manière *somatotopique*. Ces aires interviendraient dans le processus d'analyse linguistique selon la catégorie sémantique des mots d'action impliquée (*e.g.:* mots se référant aux différentes parties du corps). Ainsi, Pulvermüller propose une *spécificité* entre l'aire corticale et le mot traité. Cette *spécificité* sémantique serait représentée par des ensembles de neurones à l'intérieur des aires cortico-motrices concernées (voir la Figure 30).

b- Cette disposition est, d'après Pulvermüller (2005), justifiée par le principe d'apprentissage hebbien (Hebb, 1949), selon lequel la co-activation fréquente des neurones renforce leur connexion mutuelle. Selon cet argument, ces groupements de neurones, également appelés *assemblées de cellules* (Hebb, 1949), *assemblées neuronales* (Palm, 1982 ; Braitenberg, 1998) ou encore *réseaux distribués fonctionnels* (*Distributed functional networks* ; Roland, 1994), pourraient établir à chaque stimulus langagier des connexions au sein de

l'ensemble des réseaux distribués, permettant ainsi un traitement *rapide* et interactif des informations linguistiques.

c- D'après Pulvermüller (2005), la nature des connexions intergroupes de neurones n'est pas seulement rapide mais pourrait être *automatique*, *i.e.*: les stimuli ne requièrent pas d'attention de la part des individus (voir Shtyrov et al, 2004), en raison, avance Pulvermüller, des forts liens déjà tissés à l'intérieur des assemblées neuronales, selon le principe d'apprentissage hebbien.

On pourrait résumer ainsi ce modèle de Pulvermüller (2005): les aires sensorimotrices – ainsi que la région péri-sylvienne – renfermeraient des groupements de neurones distribués de manière *somatotopique* et capables de coder, *rapidement* et *automatiquement* pour une catégorie de mot bien définit et déjà appris (Figure 30).

Toutefois, ce modèle de somatotopie sémantique et l'implication même du système moteur dans le traitement corticale des concepts d'action et en particulier les verbes d'action, fait face à une critique émergente (Bedny et al, 2008 ; Postle et al, 2008 ; Fernandino et Iacoboni, 2010 ; Arévalo et al, 2010 ; Tremblay et Small, 2011 ; voir aussi De Zubicaray et al, 2008 ; pour revue, Mahon et Caramazza, 2008 ; Bedny et Caramazza, 2011). Une critique qui apporte un nouveau souffle, une nouvelle optique à un débat qui anime une partie des neurosciences moderne autour des relations entre le langage et l'action.

Par exemple, Bedny et al (2008) ont exploré l'activité cérébrale de plusieurs sujets qui devaient effectuer une tâche de jugement sémantique. L'idée de départ reposait sur le fait que les expériences perceptuelles pouvaient jouer un rôle dans *la récupération de concepts*, comme la compréhension de verbes d'action ; les *concepts* étant l'ensemble de représentations mentales qui façonnent la signification des mots en vue de catégoriser les évènements et les entités qui nous entourent (Medin et Smith, 1984). La *récupération* de concepts, quant à elle, a été définie comme étant la réactivation de nos expériences stockées au sein du cortex sensorimoteur (Allport, 1985 ; Martin et al, 1996 ; Prinz, 2002 ; Gallese et Lakoff, 2005). Ainsi, récupérer le concept ''*marcher*'' réactiverait la représentation de ce mot au sein de nos expériences

perceptuelles, incluant la visualisation soit de nous-même en train de marcher soit d'une tierce personne réalisant ce mouvement.

Ainsi, Bedny et ses collaborateurs (2008) ont réalisé trois expériences sous IRMf. Lors de la première expérience, les sujets écoutaient des paires de mots – au sein de la même catégorie de mot – et devaient, par conséquent, juger, sur une échelle de 1 à 4, de la relation sémantique entre ces mots en appuyant sur l'un des quatre boutons du boitier de réponse (*condition de compréhension de mots*). Les mots choisis par les auteurs étaient des verbes à forte association avec l'action (*e.g.*: *courir*), des verbes à faible association avec l'action, exprimant un état mental (*e.g.*: *penser*), des noms à forte association avec l'action, comme les noms des animaux (*e.g.*: un *chat*), des noms à moyenne association avec l'action, en l'occurrence les nom d'*objets*, ainsi que des noms à faible association avec l'action, désignant une nature non vivante (*e.g.*: une *roche*).

La seconde expérience consistait à observer une animation, à base de points lumineux, mettant en scène une silhouette stylisée de forme humaine (*condition de mouvements biologiques*), décrivant des mouvements réalisés soit avec une partie du corps (*e.g.*: *donner un coup de pied*) soit avec le corps entier (*e.g.*: *sauter*). Les actions représentées lors de cette animation sont identiques à celles entreprises dans la condition de compréhension de mots dans la première expérience. Lors de la condition contrôle de cette seconde expérience, les points lumineux constituaient un nuage de point désorganisé, sans relation avec les mouvements humains.

Quant à la troisième expérience dite *condition de mouvements basiques*, des anneaux sont présentés visuellement aux sujets, avec la particularité de se contracter et d'être extensibles. Ces mêmes anneaux perdent leurs caractéristiques amovibles durant la condition contrôle pour devenir des anneaux luminescents (Bedny et al, 2008).

Les résultats IRMf indiquent une augmentation du flux sanguin principalement dans le cortex temporo-pariétal, *bien loin des aires motrices habituellement impliquées lorsque le stimulus présenté revêt un caractère d'action* (*cf.* chapitre 2). Ainsi, les verbes et les noms ont conjointement activé le gyrus temporal supérieur gauche (AB 22), le lobe pariétal inférieur (AB 44), le gyrus frontal inférieur gauche (AB 45/47) ainsi que le gyrus

temporal droit dans ses portions médiane et supérieure (AB 21/22/42) (Figure 32, zone mauve). Toutefois, ces régions ont répondu plus à l'écoute de verbes même si les noms revêtaient un haut caractère de mouvement (Bedny et al, 2008). En effet, l'écoute de verbes abstraits, à faible attributs moteurs, ont suscité plus d'activité temporo-pariétale en comparaison aux noms d'animaux, caractérisés par leur haute association visuo-motrice (Bedny et al, 2008). *Ainsi, et suivant les arguments de Bedny, la région temporo-pariétale serait alors plus sensible aux concepts (e.g.: verbes d'action ou verbes abstraits) qu'aux percepts (e.g.: noms à fort attributs visuels).*

Par ailleurs, l'observation de mouvements biologiques a spécifiquement sollicité la scissure temporale supérieure droite (Figure 32, zone verte) alors que celle des mouvements basiques a préférentiellement impliqué l'aire du cortex visuel sous-tendant la perception visuelle du corps humain (en anglais *extrastriate body area* ; voir Downing et al, 2001) (Figure 32, zone bleue). Selon l'étude de Bedny et al (2008) *l'écoute de verbes d'action ne recrute en aucun cas les aires motrices fronto-centrales, i.e.: le cortex moteur primaire et les aires pré-motrices. La récupération de verbes d'action se ferait donc à partir des aires temporo-pariétales (Figure 31). De surcroit, ces aires ne codent pas spécifiquement pour les verbes d'action puisqu'elles s'activent également dans le cas des verbes de non action, comme les verbes abstraits décrivant un état mental (e.g.: penser).*

Pour Bedny et collaborateurs (2008), les activations observées lors de leur étude ne présentent aucun caractère d'automaticité ou de rapidité, ni même de somatotopie entre les différents verbes d'action utilisés, contredisant au passage le modèle de somatotopie sémantique de Pulvermüller (2005). Plusieurs études d'imageries confortent ces arguments, démontrant que la compréhension des verbes d'action pourrait s'établir, en dehors du traditionnel cortex sensorimoteur, au sein des réseaux neuronaux frontaux, temporaux et pariétaux (Perani et al, 1999 ; Kable et al, 2002, 2005 ; Noppeney et al, 2005 ; Davis et al, 2005 ; Bedny et Thompson-Schill, 2006 ; Bedny et al, 2008 ; voir la Figure 32 qui résume les résultats obtenus par ces auteurs). De plus, les aires cérébrales illustrées par la Figure 32 ne sont pas dédiées spécifiquement à la compréhension des verbes d'action, puisqu'elles sont impliquées également lors de la

compréhension de noms, d'adjectives et bien d'autres types de mots (pour revue voir Price, 1998).

Toujours dans la lignée des études contradictoires au modèle de somatotopie sémantique de Pulvermüller (2005), une récente étude s'est penchée sur un des points les plus importants de ce modèle et qui est largement documenté aujourd'hui, à savoir le caractère somatotopique des activations motrices induites par le traitement sémantique des mots d'action (Postle et al, 2008). Il se trouve que ces derniers auteurs ont bel et bien observé – contrairement aux études misent en avant par Bedny et Caramazza dans la Figure 32 – une activité cortico-motrice lors de l'analyse de mots d'action, mais cette fois-ci – contrairement aux études exposées dans le chapitre précédant – *aucune organisation somatotopique*[20] *n'a été prouvée par Postle et al (2008)*.

On entend par organisation somatotopique, une représentation spécifique des effecteurs, *i.e.:* des parties du corps (la *face*, la *main* ou le *pied*), au sein du cortex sensorimoteur. Postle et al (2008) ont utilisé l'IRMf pour explorer l'activité du cortex moteur lors de décision lexicale, observation et exécution d'actions motrices. Comme il n'est pas facile de repérer avec précisions les activations cérébrales à partir d'un indice indirect, très utilisé en IRMf, telle l'augmentation du débit sanguin oxygéné (en anglais *BOLD effect*), Postle et al (2008) ont eu recours à une seconde méthode. Il s'agit de localiser avec précision les aires cérébrales impliquées, à l'aide de cartes cyto-architectoniques[21] issues des études micro-cellulaires sur des cerveaux post-mortem (Geyer, 2003 ; Eickhoff et al, 2006). En procédant ainsi, Postle et al (2008) ont souhaité éviter la méthode qui consiste à repérer les aires actives à partir des sillons et circonvolutions, qui sont loin d'être de fiables marqueurs des frontières cyto-

[20] La somatotopie, mise en œuvre par Penfield et Rasmussen (1950), et appelée ensuite *Homunculus* de Penfield, est en réalité basée sur une moyenne de plus d'une centaine de cerveaux – par exemple dans le travail de Hauk et al (2004) présenté dans le chapitre précédent, les stimulations ont été rapportées sur 152 cerveaux obtenues au Montreal Neurological Institute (MNI).

[21] Ce terme désigne l'organisation et la composition d'un tissu biologique (*e.g.:* le cortex humain), en termes de cellules et en fonction de leurs caractéristiques (*e.g.:* aire pré-motrice). Ce système a permis dès le début du 20e siècle d'établir avec précision la fonction des aires cérébrales. Le plus célèbre fut celui de Korbinian Brodmann (Brodmann, 1909).

architectoniques (Amunts et al, 2007). D'autant plus, que l'une des aires concernées par l'étude de Postle et al, l'aire pré-motrice, ne possède pas de frontière neuro-anatomique claire avec le cortex préfrontal (Geyer, 2003).

Ainsi, Postle et al (2008) ont demandé aux sujets de lire silencieusement plusieurs catégories de mots : des verbes d'action de la face (*e.g.*: *mordre*), des verbes d'action de la main (*e.g.*: *cogner*) ainsi que des verbes mettant en exergue des actions commises avec le pied (*e.g.*: *piétiner*). Des noms concrets sans relation avec les mouvements du corps (*e.g.: lune*) et des non mots (*e.g.*: *vuxt*) ont été également présentés visuellement aux sujets, en plus d'une série de caractère en guise de condition de contrôle (le symbole *dièse*). Dans un paradigme séparé, il a été demandé aux sujets de regarder des vidéos muettes mettant en scène une tierce personne en train d'effectuer une action motrice, avec la main, la face ou le pied. La vidéo de contrôle contenait une variété de stimulu fréquemment rencontrées dans la vie courante. Dans une dernière expérience, Postle et al, ont demandé à des sujets d'exécuter eux-mêmes les actions observées dans l'expérience précédente.

Comme l'on peut le voir dans la Figure 33[22] A, les verbes d'action ont activé l'hémisphère gauche principalement dans ces cortex moteur primaire (AB4 ou M1) et pré-moteur (AB6), *sans pour autant présenter une organisation somatotopique*. Les verbes d'action de la bouche et de la face (Figure 33 A, en vert) ont montré des activations dans le gyrus frontal moyen, *ainsi que dans d'autres sites à l'extérieurs des aires cortico-motrices, à savoir le cervelet et le noyau caudé*. On retrouve ainsi l'activation du gyrus frontal moyen lors de la lecture silencieuse des verbes d'action de la main (Figure 33 A, en rouge), associé à une réponse dorsale de l'aire motrice supplémentaire. *Le gyrus temporal participe également au traitement de cette catégorie de verbe d'action avec sa portion inférieure*. Les verbes d'action du pied (Figure 33 A, en bleu) ont induit des réponses dorsales, comme pour l'effecteur 'main', avec une participation de l'aire motrice supplémentaire *en plus de foyers d'activations outre les aires motrices, représentées par le gyrus temporal moyen et le cortex insulaire*. Les noms

[22] Cette figure ne met pas en avant toutes les activations cérébrales mentionnées dans notre texte. Nous avons pris le soin de consulter le supplément de méthode mis à disposition par les auteurs (Postle et al, 2008), pour pouvoir rapporter la totalité des activations enregistrées lors de cette étude IRMf.

concrets sans rapport avec l'action (en jaune) ont recruté les aires frontales ainsi que le cervelet, tandis que la lecture des mots sans sens (en rose) a principalement stimulé le cortex occipital ainsi que l'aire de Broca.

L'exécution et l'observation de l'action (Figure 33 B, C) ont chacune impliqué les aires motrices, avec une distribution somatotopique, allant de la partie ventrale pour l'effecteur de la bouche jusqu'à la partie dorsale pour les autres effecteurs, *i.e.:* la main et le pied (voir; Penfield et Rasmussen, 1950 ; Penfield et Welch, 1951 ; Woolsey et al, 1952). L'hypothèse selon laquelle le cerveau humain contiendrait des neurones miroirs, qui codent à la fois l'exécution du geste moteur et le processus cognitif qui contrôle sa perception, pourrait se renforcer si l'on croit les chercheurs (Buccino et al, 2004) qui le justifient à partir de la congruence entre les aires corticales d'observation et d'exécution.

Par ailleurs, *lorsque Postle et al (2008) ont croisé les activations obtenues à partir de la tâche de lecture avec celles enregistrées lors de l'exécution ou de l'observation d'action, aucune organisation somatotopique n'a été mise en avant*, contredisant dans la foulée les résultats de Hauk et al (2004). Une seule aire s'est à la fois activée pendant les trois tâches expérimentées par Postle et al. Il s'agit de l'aire pré-motrice supplémentaire qui représente, selon ces auteurs, l'effecteur du pied, qui a répondu significativement aux verbes d'action au regard des autres stimuli lexicaux. Cette aire a des connexions directe avec le cortex préfrontal ce qui lui procure des fonctions cognitives en plus de son rôle moteur (Picard et Strick, 1996 ; Johansen-Berg et al, 2004). Dans l'ensemble, les verbes d'actions ont impliqué la même zone corticale, le cortex pré-moteur, que l'exécution et l'observation d'action (voir la Figure 33 de Postle et al, 2008), alors que le cortex moteur primaire n'a présenté aucune activité conjointe à l'égard de l'ensemble des stimuli.

****** Compendium n°7 ******

On a vu dans cette partie que l'activation des aires motrices est tributaire de la nature de la tâche, de préférence sémantique (Sato et al, 2008). Ces derniers auteurs n'ont constaté, dans leurs expériences cinématiques, aucune différence entre les modalités de présentation des mots (auditive et visuelle) contrairement à l'étude de Labruna et al (2011). L'étude MEG de Pulvermüller et al (2005) confirme l'importance des aires motrices dans la compréhension des verbes d'action, notamment à travers l'implication des aires frontales inférieures lors de l'écoute des verbes d'action liés à la face alors que les régions motrices dorsales seraient responsables de la compréhension des verbes d'action du pied. Ces activations représentent une distribution somatotopique. Par ailleurs, elles ont été caractérisées par leur rapidité et leur automaticité ; activations rapides car elles surgissent au bout d'un quart de seconde qui suit la présentation des verbes d'action et activations automatiques car les sujets ne s'attendaient pas à traiter un verbe d'action. C'est sur ces trois éléments que se base le ''Modèle de somatotopie sémantique'' développé par Pulvermüller (2005).

Ces résultats sont conformes aux études de neuropsychologie qui ont démontré des déficits sélectifs lors du traitement des mots d'action après une lésion du cortex pré-moteur gauche (Bak et al, 2001; Bell, 1994; Damasio et Tranel, 1993). Toutefois, des lésions temporales, préfrontales et pariétales pourraient présenter de profonds déficits dans la compréhension de mots, sans pour autant présenter des difficultés de perception ou de locomotion (voir Bedny et Caramazza, 2011).

Ce constat présage que plusieurs régions cérébrales, en dehors du traditionnel cortex sensorimoteur, pourraient être impliquées dans la compréhension des mots d'action, contrairement à ce qu'avancent plusieurs études (e.g.: Hauk et al, 2004 ; Buccino et al, 2005 ; Pulvermüller et al, 2005 ; Tettamanti et al, 2005 ; Aziz-Zadeh et al, 2006 ; Sato et al, 2008). Ce point de vue est notamment partagé par Bedny et al (2008) et toute une série d'études (Perani et al, 1999 ; Kable et al, 2002, 2005 ; Noppeney et al, 2005 ; Davis et al, 2005 ; Bedny et Thompson-Schill, 2006) qui ont enregistré des activations à l'extérieur du cortex moteur, comme l'illustrent bien les Figures 31 et 32. Il en ressort notamment l'implication du gyrus temporal moyen gauche dans la

compréhension de verbes d'action, ce qui a été confirmé par les expériences menées sur des sujets aveugles qui utilisent cette aire en dépit des aires visuelles (Bedny et al, 2012 ; voir pour revue Bedny et Saxe, 2012).

D'un autre côté, il existe des études qui ont mis en avant des activations motrices lors de tâches sémantiques, mais aucune spécificité entre les aires motrices et les effecteurs qu'ils représentent, n'a été observé à l'égard des mots d'action qui décrivent ces effecteurs. A l'instar des travaux de Postle et al (2008), ceux de Arévalo (2010), Tremblay et Small (2011) et notamment Fernandino et Iacoboni (2010) s'inscrivent dans l'optique de mise en doute *de la somatotopie des airs motrices lors l'observation des actions mais aussi lors de l'écoute, de la lecture et de la prononciation de verbes d'action. Ainsi, les verbes d'action de la face, de la bouche et du pied, solliciteraient les aires motrices sans pour autant octroyer un aspect somatotopique aux activations obtenues.*

Ces contradicteurs, notamment Postle et al (2008), mettent clairement en doute la méthodologie qui sous-tend la délimitation des aires cérébrales impliquées lors des tâche de langage (voir Geyer, 2003 ; Eickhoff et al, 2006). Des résultats qui promettent un long débat scientifique quant aux relations entre l'action et le langage, de manière générale.

3.1.2. L'hypothèse de la simulation

Outre l'hypothèse sémantique, la seconde hypothèse avancée pour expliquer l'implication du cortex sensorimoteur dans le processus de reconnaissance des verbes d'action, implique la *simulation mentale* du mot perçu. De manière générale, par *simulation* on définit un processus de reconstitution et de rappel des états perceptuels, moteurs et introspectifs (états mentaux, les *affects*) acquis à partir de la relation que nous entretenons avec le monde qui nous entoure, par notre corps et notre conscience (Barsalou, 2008).

Scorolli et Borghi (2007) font partie des auteurs qui défendent l'hypothèse de simulation mentale lors de la compréhension de verbes d'action. Dans une expérience cinématique, ils ont demandé à des sujets de lire silencieusement des phrases, affichées

sur un écran d'ordinateur, composées de verbes d'action et de noms concrets. Deux types de phrases : *1.* Des *phrases bouche-main* ont été attribuées à un premier groupe de sujets ; le verbe d'action contenu dans chacune des phrases se référait soit à la bouche (*e.g.*: sucer *le bonbon*), soit à la main (*e.g.*: déballer *le bonbon*). *2.* Des *phrases pied-main* attribuées à un second groupe, faisaient référence à des verbes exprimant un mouvement du pied (*e.g.*: *donner un coup de pied dans le ballon*) ou de la main (*e.g.*: *jeter le ballon*). Un écran d'ordinateur affichait d'abord une croix (x) pendant 500 ms, suivie d'un verbe d'action pendant 200 ms puis remplacé par un nom concret, pour finaliser la construction de la phrase. Les sujets devaient répondre à l'aide de deux dispositifs : soit en disant ''*yes*'' à haute voix face à un *microphone* (pour le groupe 1 : *phrases bouche-main*), soit en appuyant avec le pied droit sur *une pédale* (pour le groupe 2 : *phrases pied-main*).

Le temps de réaction mesuré révèle des réponses plus rapides aux phrases d'action de la bouche dans le cas du dispositif microphone (Figure 34a). Cette dernière figure illustre, par ailleurs, une différence de temps de réaction plus important, en faveur du dispositif microphone, entre les phrases d'action de la bouche et de la main. Pour Scorolli et Borghi (2007), ceci indique un effet de facilitation du mouvement induit par la compréhension des verbes d'action inclus dans les phrases présentées : *cet effet semble être spécifique à l'effecteur (bouche) décrit par les phrases d'action de la bouche.* D'un autre côté, la Figure 34b met en avant des temps de réactions plus court lors de la lecture de phrases d'action du pied et ce, quel que soit le dispositif mis en place. Les auteurs pointent également à ce stade un effet de facilitation de l'action motrice par la tâche langagière.

Scorolli et Borghi (2007) ont interprété leur résultat comme étant la preuve directe de l'existence de *simulation interne de l'action motrice lors de la compréhension du langage d'action*. Toujours d'après ces auteurs, cette simulation semble être spécifique, car elle entraîne une modulation différente du système moteur selon l'effecteur (main, bouche, pied) nécessaire pour exécuter l'action décrite par la phrase. Scorolli et Borghi (2007) en ont conclu donc que les mêmes aires motrices recrutées

pendant l'exécution du mouvement le sont également pendant la compréhension de phrases décrivant ce mouvement.

Ces données sont en ligne avec les études IRMf (Tettamanti et al, 2005) montrant que l'écoute de phrases exprimant des actions effectuées avec la bouche, la main et le pied produit des activations distinctes au sein du cortex pré-moteur. Par ailleurs, l'avantage des phrases décrivant une action du pied dans les deux dispositifs, microphone et pédale, est interprété par Scorolli et Borghi, comme probablement lié au fait que les mots d'action du pied bénéficient d'une distribution corticale plus large comparée aux mots d'action de la main qui ont une distribution plus étroite (voir Pulvermüller, 2005).

On pourrait alors en conclure que *la compréhension des phrases d'action conduirait à une modulation spécifique du système moteur en fonction de la partie du corps engagée, ce qui suggère, selon Scorolli et Borghi, que l'effet de simulation mentale est mis en marche*. Cette modulation pourrait faciliter la réponse motrice dans le cas d'une congruence entre les effecteurs (bouche et pied) impliqués dans les tâches motrice et verbale (Scorolli et Borghi, 2007).

D'un autre côté Desai et al (2010), dans le but d'examiner l'implication du cortex sensorimoteur lors de la compréhension des mots, ont rapporté des résultats IRMf comparables, en faisant écouter aux sujets des phrases utilisant des verbes d'action de la main (*e.g.: saisir*), des phrases contenant des verbes à forte association visuelle (*e.g.*: *lire*) ainsi que des phrases mettant en avant des verbes abstraits (*e.g.*: *expliquer*).

Lors de la compréhension de phrases d'action de la main, Desai et al (2010) ont observé des activations au niveau de la scissure post-centrale inférieure gauche (AB2) et l'aire voisine, à savoir le gyrus supramarginal antérieur (AB40), avec la participation des aires de B19 et B37 dont le gyrus fusiforme latéral (Figure 35A). Comparées aux phrases d'action, les phrases contenant des verbes visuels ont recruté le gyrus temporal supérieur gauche, le côté droit étant moins sollicité (Figure 35A). Les mêmes régions impliquées dans la comparaison ''phrases d'action - phrases visuelles'' l'ont été dans le cas de la comparaison ''phrases d'action - phrases abstraites'' (Figure 35B). Cependant,

les activations rapportées en faveur des phrases abstraites représentent une distribution corticale plus large, dans les deux hémisphères, notamment au niveau du lobe temporal avec ces gyrus supérieur, moyen et inférieur ainsi que les aires du gyrus frontal inférieur (Figure 35B). À noter, l'implication de l'aire motrice supplémentaire gauche et du gyrus précentral droit (Figure 35B). Quant à la comparaison '' phrases visuelles – phrases abstraites'', elle a mis en avant des foyers d'activation au niveau du gyrus occipital supérieur gauche (AB19) ainsi que du gyrus angulaire droit (AB39) (Figure 35C). À l'inverse, les phrases abstraites ont sollicité une multitude d'aires cérébrales, comparées aux phrases visuelles, principalement dans le lobe temporal supérieur et les aires frontales inférieures ainsi que l'insula et l'aire motrice supplémentaire (Figure 35C).

Desai et al (2010) ont identifié l'aire post-centrale inférieure gauche (AB 40) comme étant la région cérébrale qui s'activait de manière récurrente lors de l'écoute de phrases d'action de la main. Il se trouve que cette aire est également impliquée lors de l'exécution de mouvement des doigts (Ehrsson et al, 2001) ou même lors de la phase de planification motrice (Rushworth et al, 2001 ; Johnson-Frey et al, 2005). L'aire inférieure du gyrus post-central joue aussi un rôle dans le traitement des sons émis par les outils (Lewis et al, 2006).

À partir de ces éléments, *Desai et ses collègues ont conclu que les phrases d'action de la main utilisées dans leur étude pourraient être traitées au niveau cortical par les mêmes régions qui sous-tendent la planification, la perception et l'exécution de mouvement complexe de la main*. Ces circuits cérébraux sont identiques à ceux observés dans les études menées sur le singe macaque, où le lobe pariétal inférieur était impliqué dans les tâches d'exécution et de compréhension d'action, comme saisir ou observer l'action de saisie (Fogassi et al, 2005). Ces neurones visuo-moteurs ont été baptisé neurones miroirs (pour revue voir : Rizzolatti et Sinigaglia, 2011).

Par ailleurs, en comparant les patterns d'activations induits par les phrases d'action et les phrases visuelles et abstraites, *Desai et al (2010) n'ont observé que très peu de portions recrutées dans les traditionnelles aires motrices primaires et pré-motrices*. Malgré ces résultats, Desai et collaborateurs suggèrent que leur résultats sont conformes aux études cinématiques antérieurs formulant que la compréhension de

concepts d'action implique un certain degré de simulation mentale de l'action en question (Stanfield et Zwaan, 2001 ; Glenberg et Kaschak, 2002 ; Zwaan et al, 2002).

Ce constat est relié de manière controversée par les études d'imagerie. En effet, pendant que des chercheurs observent une activité corticale accrue dans le gyrus temporal moyen suite au traitement de verbes d'action (Kable et al, 2002 ; Bedny et al, 2008 ; pour revue Bedny et Caramazza, 2011), d'autres mettent en avant les mêmes activations dans le cas de verbes de non action (Grossman et al, 2002) ! D'un autre côté et comme on a pu le voir plus haut, un certain nombre d'étude ont observé des foyers d'activation dans le cortex moteur lorsque les sujets lisaient ou écoutaient des mots ou des phrases d'action (Hauk et al, 2004 ; Tettamanti et al, 2005 ; Pulvermüller et al, 2005 ; Buccino et al, 2005 ; Kemmerer et al, 2008).

De manière générale, Desai et al (2010) suggèrent que ces résultats s'alignent sur l'axe de la théorie de la cognition incarnée, pointant que la récupération de concepts d'action est prise en charge par les aires sensorimotrices (Alloport 1985 ; Pulvermüller, 1999 ; Barsalou et al, 2003 ; Gallese et Lakoff, 2005

****** Compendium n°8 ******

La principale conclusion qu'on pourrait en tirer de l'ensemble de ces études est qu'il y a une congruence ''corticale'' entre l'exécution du mouvement et la compréhension du langage se référant à ce même mouvement. Autrement dit, ce sont les mêmes circuits cérébraux qui sous-tendent ces deux fonctions supérieures que sont le langage ''qui se réfère à l'action'' et l'action même.

D'un côté, l'étude cinématique de Scorolli et Borghi (2007) a mis en avant un effet de facilitation de l'action de la main et du pied suite à la lecture de phrases d'action décrivant chacun de ces effecteurs. Selon ces auteurs, le mécanisme de compréhension passe par une imagerie ou une simulation mentale du mot perçu, ce qui explique la spécificité des réponses motrices avec le contexte linguistique.

D'un autre côté, cette cinématique se traduit, dans l'étude d'imagerie de Desai et al (2010), par l'implication des régions cérébrales responsables de la planification, de l'exécution et de la perception de mouvement lors la compréhension de phrases d'action.

Ces auteurs pensent que la simulation mentale de l'action revêt toute son importance lors de tâches de décision sémantique, ce qui expliquerait, selon eux, le recrutement d'aires corticales initialement spécialisées dans l'exécution motrice.

Or, il existe des études qui mettent en doute la nécessité du cortex sensorimoteur pour la compréhension des mots d'action (Willems et al, 2010). Ces derniers auteurs ont alors apporté une preuve par IRMf de l'implication de structures corticales distinctes entre imagerie mentale et compréhension de mots d'action, ce qui pousse ces auteurs à avancer que la simulation mentale lors du langage ne stimule pas les mêmes aires que la compréhension du langage (pour revue, Willems et Hagoort, 2007; Jirak et al, 2010). Ce point de vue pourrait être conforté par les études qui stipulent que les enfants pourraient reconnaitre le but d'une action donnée même en absence de simulation mentale puisque l'action en question défit les lois de la normalité du mouvement humain, comme une action impossible (Southgate et al, 2008).

En somme, et malgré la multiplication des recherches dans ce domaine, on ne connait pas encore la cause de la variabilité de l'implication (ou pas) du système sensorimoteur durant le processus de compréhension de mots d'action (voir pour revue Kemmerer et Gonzalez-Castillo, 2010). Le débat scientifique demeure partagé sur cette question et nous promet d'autres découvertes.

II. CADRE EXPERIMENTAL

Chapitre 4. PROBLEMATIQUES ET HYPOTHESES DE TRAVAIL

L'amélioration de la performance motrice est un défi qui a intéressé les chercheurs depuis le début du 20ème siècle lorsque, pour la première fois, on a essayé d'utiliser des techniques d'entrainement, faisant appel à des qualités mentales telle que l'imagerie, en vue d'augmenter le potentiel moteur des individus lors de pratiques sportives (Sackett, 1935 ; Perry, 1939). Plus précisément c'est l'imagerie kinesthésique (IK ; plus communément appelée imagerie motrice) qui a été la plus employée. L'IK consiste à ressentir les sensations musculaires, tendineuses et articulaires spécifiques d'un mouvement donné, sans l'exécuter. On la considère aussi comme étant l'état dynamique durant lequel l'individu simule mentalement une action motrice donnée (Decety et Jeannerod, 1996), traduisant ainsi ce qu'on pourrait qualifier de manifestation discrète de l'acte moteur (Willems et al, 2009). Cet effet de l'IK sur la performance motrice (pour une revue voir Lotze et Halsband, 2006), correspondant à une augmentation de l'activité hémodynamique (comme par exemple lors de l'effet BOLD par IRMf) au sein du cortex moteur (Roth et al, 1996 ; Porro et al, 1996), pourrait ainsi représenter une sorte de pré-activation corticale en vue de préparer le mouvement à accomplir.

Il se trouve que ces mêmes structures cortico-motrices sont également sollicitées lorsqu'on réalise une autre opération cognitive, comme il a été montré suite à un simple calcul arithmétique (Burbaud et al, 1999 ; Tschentscher et al, 2012) et cela même en absence de mouvements engendrés par le comptage à l'aide des doigts (Kazui et al, 2000). D'autres chercheurs arrivent même à différencier les aires cérébrales responsables d'un calcul approximatif opéré dans les aires pariétales inférieures avec la participation des aires précentrales dans le cortex frontal, de celles sous-tendant un calcul exact, au niveau de l'aire frontale inférieure de Broca (Dehaene et al, 1999).

Ces régions motrices seraient aussi les centres corticaux de la compréhension de mots d'action (Hauk et al, 2004 ; Tettamanti et al, 2005 ; Pulvermüller et al, 2005 ; Desai et al, 2010), qui pourraient, par conséquent, engendrer une amélioration du geste moteur, à condition que les mots d'action soient présentés en amont de la tâche

motrice (Boulenger et al, 2006 ; Sato et al, 2008 ; Frak et al, 2010). La nature de cette activité corticale suivrait une distribution somatotopique, similaire à l'*homunculus* de Penfield et Boldrey (1937), mettant en avant une spécialisation des aires sensorimotrices exclusivement pour le mouvement d'un effecteur donné (*cf*. modèle de somatotopie sémantique de Pulvermüller, 2005, décrit dans le chapitre 3 ; voir aussi la figure 17), au détriment des antagonistes de la somatotopie du cortex sensorimoteur lors de la compréhension de mots d'action (pour revue voir Mahon et Caramazza, 2008 ; Fernandino et Iacoboni, 2010).

Des chercheurs ont récemment rapporté une congruence entre les aires sensorimotrices impliquées dans le traitement de verbes d'action de la face et de la main et celles qui sous-tendent la lecture de verbes chargés émotionnellement (Moseley et al, 2012). Il semblerait donc que les aires motrices pourraient intervenir dans le traitement de plusieurs opérations cognitives, comme l'imagerie kinesthésique, le calcul mental, la compréhension de mots d'action et de mots à fort attribut émotionnel. Sachant que l'état de l'art dans les études sur les verbes d'action a mis en avant des expériences menées pour la plupart sur des actes moteurs simples (notamment l'action de préhension ou encore un geste de flexion-extension des doigts ou de la cheville) peut-on alors prétendre que ces verbes d'action auraient un impact sur la cinématique d'une action motrice complexe, comme par exemple un saut vertical ? Cet impact sur le saut serait-il exclusivement la conséquence de la compréhension d'un verbe d'action spécifique au saut, comme *sauter*, ou inclurait-il d'autres verbes mettant en scène des mouvements autre que le saut, comme *pincer* ou *lécher* ?

D'un autre côté, mise à part l'effet de l'imagerie motrice sur la performance motrice, qui est maintenant bien connu, est-ce que des stimuli n'évoquant en rien le déroulement d'une action motrice, comme le calcul mental ou encore la compréhension de verbes émotifs, pourraient à leur tour influer la performance d'un acte moteur aussi complexe qu'un saut vertical ? Ces questionnements mettent en exergue deux types de *spécificités* entre les tâches cognitive et motrice: la première concerne directement la notion de somatotopie du cortex sensorimoteur, où l'on essayera d'étudier l'effet des verbes qui décrivent les mouvements de différents effecteurs (langue, main et membres

inférieurs), sur la performance du saut vertical. La seconde spécificité est plus globale et se réfère à la notion d'action. Ainsi, les stimuli comme le calcul mental ou les verbes décrivant une émotion n'ont pas de lien avec le concept d'action contrairement aux verbes d'action.

Ainsi, l'hypothèse générale qui a régi ce travail de thèse réside dans l'hypothèse que plusieurs tâches cognitives puissent solliciter l'activation du système moteur induisant ainsi une amélioration de la performance d'une action motrice, elle-même planifiée puis réalisée dans les mêmes aires cortico-motrices. Nous pensons, par ailleurs, que la notion de spécificité entre les tâches cognitive et motrice, n'empêchera pas le processus d'amélioration de la performance du saut vertical.

Le but principal de notre travail de thèse se résume donc à étudier l'effet des verbes d'action sur la performance d'un saut vertical, en l'occurrence le *Squat Vertical Jump* (SVJ), qui est aujourd'hui bien documenté dans le domaine de la biomécanique humaine. S'en suivra en parallèle l'exploration de cette notion de spécificité à travers l'utilisation de plusieurs stimuli langagiers (verbes d'action) et non langagiers, la soustraction mentale et l'imagerie kinesthésique.

Chapitre 5. MATÉRIEL ET MÉTHODES

5.1. Les sujets

Au total, 155 sujets ont accepté de participer à l'ensemble des 7 expériences (dont 2 réalisées aussi avec des femmes) opérées dans notre étude, soit 114 hommes et 41 femmes. Leurs caractéristiques anthropométriques sont détaillées dans le Tableau 2. Ils-elles étaient tou(te)s étudiant(e)s soit à la faculté des sciences de sport de l'université Claude Bernard à Lyon 1, soit à l'Institut d'Ostéopathie de Limonest ou encore au Département des Sciences du Sport de l'Université Libanaise à Beyrouth. Tou(te)s natif(ve)s français(es), sauf les étudiants libanais qui sont bilingues. Les sujets étaient en excellent état de santé et aucun d'entr'eux n'avait une expertise ou entrainement particulier en lien avec l'action motrice mesurée au cours de l'étude, le *Squat Vertical Jump*, aux caractéristiques bien définies (voir § 5.2.1). A cet égard, tous les sujets ont été considérés comme étant *naïf(ve)s*.

Tableau 2. *Caractéristiques anthropométriques des sujets*

Caractéristique anthropométrique	**Homme (n=114)**	**Femme (n=41)**
Age (ans)	22,8 ± 2,8	*22,0 ± 1,9*
Poids (kg)	72,7 ± 6,4	57,8 ± 5,7
Taille (cm)	177 ± 5,7	165,1 ± 5,8

Les données anthropométriques des sujets sont conforment aux valeurs anatomiques standards représentant les populations Européennes, Caucasiennes et Méditerranéennes (Zatsiorsky et Seluyanov, 1983 ; Li et al, 2008).

Les sujets ont été brièvement informés, au début de chaque expérimentation, de la finalité de l'étude sans pour autant rentrer dans les détails au risque d'affecter les résultats. Ainsi, ils ignoraient le possible effet des stimuli cognitifs sur l'action mesurée.

5.2. La procédure expérimentale

Des verbes décrivant le déroulement d'une action motrice ou exprimant un état émotionnel ont été soit prononcé, écouté ou lu par les sujets avant la performance

d'une action motrice complexe, un *Squat Vertical Jump* (SVJ ou saut vertical accroupi). L'idée principale étant de vérifier si les verbes d'action peuvent impacter le déroulement d'une action motrice complexe. D'autres stimuli ont été réalisés, comme le calcul mental ou encore l'imagerie kinesthésique en sorte de contrôle pour l'éventuel effet spécifique et exclusive des verbes d'action sur le mouvement.

Les verbes utilisés, monosyllabiques, étaient conjugués à la seconde personne de l'impératif. Tous les verbes ont été répétés, de manière monotone, à un rythme d'une fois par seconde pendant 10 secondes, soit un total de 9 à 11 répétitions. Les verbes sélectionnés exprimaient soit une action accomplie avec le membre inférieur (*saute*), avec les mains (*pince*) ou avec la langue (*lèche*), en plus d'un verbe décrivant une action générale du corps (*bouge*). Comme verbes de non-action ont été choisis, deux verbes exprimant une action générale contredisant ou s'opposant au SVJ (*tombe, stoppe*) afin de comparer leur impact sur le geste moteur à l'égard du verbe d'action *saute*, spécifique à l'action évaluée. D'autres verbes, chargés émotionnellement, ont été également testés (*gagne*, *perds*) ainsi qu'un verbe d'état (*rêve*). Un verbe n'ayant aucune signification pour les sujets (*tiào* = *saute* en chinois) a été utilisé comme contrôle sémantique. L'éventuel effet des verbes d'action sur l'action motrice a été comparé à l'Imagerie Kinesthésique (IK : ressentir mentalement une action motrice), connue pour améliorer la performance d'une action motrice complexe (Gentili et al, 2006 ; Nyberg et al, 2006 ; Hoyek et al, 2009). Enfin, la soustraction mentale (SM) a été utilisée dans notre étude en tant que stimulus cognitif non spécifique à l'action motrice mesurée, à l'inverse de *saute*, mais aussi comme stimulus cognitif général. La SM consistait à soustraire un nombre à 2 chiffres d'un nombre à 3 chiffres.

5.2.1. Le mouvement choisi : Squat Vertical Jump

L'action motrice complexe choisie est un saut vertical du style *Squat Vertical Jump* (*SVJ*), largement étudié dans la littérature (Hubley et Weth, 1983 ; Van Soest et Bobbert, 1993 ; pour revue Linthorne, 2001). A partir de la station debout, pieds parallèles et écartés à largeur des épaules, mains sur les hanches durant tout le saut, la position démarre par une flexion des genoux à environ 90°, suivie d'un saut vertical maximal sans à-coup (Figure 36). Un très léger contremouvement a toutefois été toléré.

On a mesuré la hauteur du SVJ en centimètre, à l'aide de deux instruments de mesures : l'*Optojump* et le *Myotest*. Le premier est un système de mesure optique (Microgate France, 38330 Saint-Ismier) et il se compose de deux barres d'environ un mètre disposées parallèlement, l'une émettrice et l'autre réceptrice (Figure 37). Le tout connecté directement à un ordinateur équipé d'un logiciel d'analyse d'une haute précision. Les diodes électroluminescentes contenues dans les barres enregistrent les périodes d'interruptions du signal lumineux, lors du saut, correspondantes au temps d'envol du sauteur. Ce laps de temps sera converti par le logiciel en hauteur de saut selon la formule : $t = 1/8\ (g.h^2)$ (t = temps d'envol en ms, g = accélération (9,81 $m.s^{-1}$), h = hauteur du saut en mètre).

Le second système de mesure, le *Myotest* (Myotest France SAS, 84 210 Pernes les Fontaines), se base sur l'accélérométrie afin d'évaluer la hauteur du SVJ. Il est constitué d'un petit boitier qui se fixe directement à la taille du sujet, à l'aide d'une ceinture Velcro (Figure 38). Le système permet le calcul de la hauteur du saut à partir du temps d'envol. Les résultats sont visibles dans un premier temps sur le boitier et peuvent être transférés par la suite vers le logiciel de recueil de donnée, *Myotest pro*.

La fiabilité de ces deux systèmes de mesure a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques (Casartelli et al, 2010 ; Bubanj et al, 2010 ; Nuzzo et al 2011 ; Glatthorn et al, 2011, Castagna et al, 2013), justifiant ainsi leurs utilisations dans le but d'évaluer la performance motrice, notamment les sauts verticaux tel le SVJ. Notez que le Myotest peut calculer en plus de la hauteur, la puissance, la force et la vitesse du saut. Or, aucune étude à notre connaissance n'a validé la fiabilité de ces trois derniers paramètres cinématiques. C'est la raison pour laquelle nous avons pris en compte que la hauteur du saut (voir les références citées ci-haut consacrées à la fiabilité du paramètre hauteur du saut).

De toute manière, la fiabilité des deux instruments a été vérifiée au cours d'une expérience préliminaire menée sur huit sujets. Ces derniers ont réalisé le même design expérimental utilisé le long de la présente étude (*cf.* Figure 39). Les résultats ont indiqué

que le Myotest mesure une hauteur de sauts (SVJ) plus importante que celle détectée par l'Optojump et pouvant atteindre jusqu'à 6,6 cm de différence (en plus), ce qui correspond aux valeurs mentionnées dans la littérature (pouvant aller jusqu'à 6,9 cm ; Casartelli et al, 2010). En examinant de plus près l'ensemble des résultats (normalisés) obtenus dans la présente étude sur les 104 hommes (expériences 2 à 7), aucune différence significative (p = 0,76) n'a été enregistrée entre l'*Optojump* (106,3 ± 6,9 %, n = 44) et le *Myotest* (105,9 ± 6,7 %, n = 60), quant à l'effet de la prononciation du verbe d'action *saute* sur la hauteur du SVJ. Ce qui nous permet d'affirmer que les deux systèmes peuvent recueillir des données comparables.

5.2.2. Le protocole expérimental

Le protocole expérimental débute par un échauffement musculaire d'environ 5 min, principalement constitué par une série de SVJ, dans le but de préparer les muscles à l'effort mais aussi pour permettre une meilleure adaptation à la réalisation du mouvement, tout en familiarisant les sujets aux appareillages de mesure décrits ci-haut. L'autre finalité de cet échauffement est d'éviter toute variation inconvenante dans la hauteur du saut durant la période expérimentale. Ainsi, il a été demandé aux sujets de porter la plus haute attention quant à la correcte exécution du SVJ et d'atteindre progressivement leur performance maximale. Une fois cette dernière atteinte, et répétée trois fois de suite, l'échauffement prend fin et les sujets entament l'expérimentation proprement dite.

Les sujets ont ensuite été invités à exécuter en deux temps une série de six SVJ (constituant *un bloc*). Les trois premiers sauts n'étaient précédés d'aucun stimulus cognitif. Leur moyenne constitue le Saut de Base (SB, voir Figure 39). Les trois SVJ suivants ont par contre été effectués après 10 secondes d'un stimulus cognitif. De ce fait, un même stimulus est répété trois fois au sein du même bloc. Les sujets passent au bloc suivant après trois minutes de repos. Cette procédure expérimentale a été répétée dans l'ensemble des expériences de notre étude, en prenant soin de randomiser les conditions expérimentales (les stimuli cognitifs) à l'intérieur de chaque expérience.

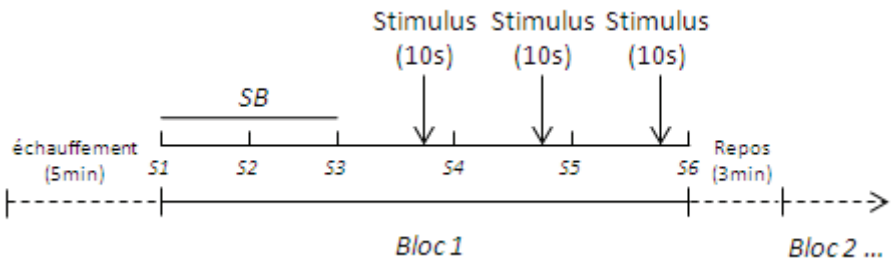


Figure 39. Protocole expérimental. *L'échauffement consiste dans une répétition de plusieurs sauts pendant 5 min environ. Un bloc équivaut à un total de 6 sauts ; les 3 premiers sont réalisés sans conditions expérimentales (saut de base ; SB) et les 3 suivants sont effectués juste après 10 secondes de stimulus cognitif. Chaque bloc équivaut à un seul stimulus répété trois fois. Les sujets passent au bloc suivant après un temps de repos de 3 min.*

5.3. L'analyse statistique

Le traitement des données de l'ensemble des expériences, a été effectué à l'aide d'une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA), afin de vérifier l'effet des conditions expérimentales sur la hauteur du saut. Un test *post-hoc* (le test de *Tukey*) a été ensuite réalisé pour comparer les différences de moyennes entre les conditions testées. Le seuil de significativité a été fixé à $2p < 0{,}05$ (2σ). L'ANOVA et le *Tukey* ont été combinés avec un modèle Linéaire à Effets Mixtes (Pinheiro et Bates, 2000). Ce modèle prend en compte la variabilité liée aux sujets. Il se compose d'une partie fixe qui est identique pour chaque sujet, et d'une partie aléatoire traduisant la variabilité de chacun des sujets.

5.4. Les expériences

En tout, sept expériences ont été menées tout au long de notre étude sur les hommes. Elles seront présentées dans l'ordre de leur réalisation. Les étudiants de l'UFR STAPS de l'Université Claude Bernard Lyon 1, ont réalisé les expériences 2 et 4, où l'*Optojump* a été utilisé afin de calculer la hauteur du SVJ. Les autres expériences, *i.e.*: 1, 3, 5, 6 ont eu lieu avec les étudiants de l'Institut Supérieur d'Ostéopathie (ISOSTEO, 69760 Limonest-Lyon), qui ont effectué des sauts évalués à l'aide du *Myotest.* Cet appareillage a également servi pour réaliser l'expérience 7 au sein du Département des Sciences du Sport au Département de Physiothérapie de l'Université Libanaise à Beyrouth.

Expérience 1 : Sujets « Référence »

Un groupe de 10 hommes a effectué quatre blocs de SVJ selon le même protocole décrit ci-haut, sans réaliser de tâches cognitives. Il constitue ainsi le groupe des sujets de référence. L'objectif de cette expérience était de vérifier un éventuel effet d'entraînement suite à la répétition des SVJ et ce, en absence de stimuli cognitifs.

Expérience 2 : Effet de la <u>prononciation</u> du verbe d'action spécifique ''saute'' sur la performance en SVJ

Deux groupes de 28 hommes et de 26 femmes ont été constitués. Il leur a été demandé de réaliser quatre blocs expérimentaux avec les stimuli cognitifs suivants :

- prononciation du verbe d'action *saute* pendant 10 s : l'utilisation de ce verbe renvoie par sa signification sémantique à l'action accomplie par la suite, à savoir le SVJ ;
- prononciation silencieuse du verbe *d'action saute (saute-S)* pendant 10 s, sans mouvoir ni les lèvres ni la langue;
- *Imagerie kinesthésique* (IK) du SVJ : il a été demandé aux sujets de « ressentir », pendant 10 s, les sensations (articulaires, tendineuses et/ou musculaires) rencontrées lors de l'exécution du SVJ. L'IK est bien connue pour son efficacité dans le domaine de la performance motrice, notamment son utilisation par les sportifs de haut niveau afin d'améliorer leur performance motrice (voir pour revue Lotz, 2006). L'IK nous a servi ici de condition de contrôle pour apprécier à sa juste valeur l'effet du verbe d'action *saute* ;
- *Soustraction mentale* (SM) : lors de cette tâche, on a demandé aux sujets d'effectuer un calcul mental en soustrayant un nombre de deux chiffres à un nombre de trois chiffres (*e.g.*: 357-93). Les réponses ont été récoltées à la fin du bloc consacré au calcul afin d'éviter toute autre sollicitation cérébrale, notamment celle liée à la parole dans le cas où les sujets devaient répondre juste après le calcul. L'objectif de cette tâche de calcul étant de maintenir une activité cérébrale pendant la durée du stimulus (10 secondes). La SM est utilisée dans cette seconde expérience comme stimulus non spécifique à l'action motrice mesurée, par opposition au verbe d'action *saute*. L'autre finalité est, par ailleurs,

liée au fait que les tâches de calcul mental sont censées solliciter les aires motrices (*e.g.*: Tschentscher et al, 2012). Sachant que les verbes d'action et l'IK recrutent également le système moteur (sur la base de la littérature décrite dans l'introduction générale et dans la partie *Problématiques et hypothèse de travail*), il a paru intéressant de tester l'effet de la SM sur l'amélioration de la performance motrice et ce, en tant que stimulus non spécifique à l'action motrice.

Expérience 3 : Effet de la <u>lecture</u> du verbe d'action ''saute'' sur la performance en SVJ

Dans cette expérience, on a vérifié l'effet de différentes modalités de lecture du verbe d'action *saute*. A cet effet, on a demandé à 14 hommes de lire ce verbe écrit sur une diapositive de Microsoft power point (police Times New Roman, taille 110) et projeté sur un mur blanc (diagonale de l'écran 1,30 m ; les sujets étaient positionnés à 3,20 m de l'écran). Les conditions expérimentales étaient les suivantes :

- Prononcer le verbe d'action *saute* sans support visuel, exactement dans les mêmes conditions opérées dans les expériences 2;
- Lire à haute voix le verbe d'action *saute (saute-L)*, écrit au milieu de l'écran ;
- Lire silencieusement le verbe d'action *saute (saute-LS)*, écrit au milieu de l'écran ;
- Lire à haute voix le verbe d'action *saute*, en mouvement sur l'écran défilant de bas en haut (*saute-Lm*), à une vitesse moyenne selon le réglage de *Microsoft Powerpoint* ;
- Lire silencieusement le verbe d'action *saute,* en mouvement sur l'écran (*saute-LSm*), qui défilait de bas en haut avec les mêmes modalités que la condition précédente ;
- Regarder un écran vierge (condition de contrôle).

Expérience 4 : Effet de la <u>prononciation</u> de verbes d'action non spécifiques sur la performance en SVJ

Seize hommes et 14 femmes ont participé à cette expérience. Les sujets ont été soumis (toujours pendant 10 s) aux conditions expérimentales suivantes :

- prononcer le verbe d'action *saute*, stimulus spécifique pour le SVJ, utilisé dans cette expérience comme stimulus de contrôle ; d'ailleurs, il sera utilisé comme tel dans l'ensemble des expériences qui vont suivre ;
- prononcer les verbes d'action *pince et lèche* comme stimuli non spécifiques ;
- prononcer le verbe d'action *tiào* (*saute* en Chinois), incompréhensible par les sujets et donc considéré comme étant un contrôle, en plus du saut de base (SB).

Expérience 5 : Effet de <u>l'écoute</u> de verbes d'action spécifique et non spécifiques sur la performance en SVJ

Un groupe de 16 hommes a accepté de participer à cette expérience. Ils ont écouté les mêmes verbes d'action que ceux employés dans la précédente expérience (*i.e.: saute*, *pince*, *lèche* et *tiào*). La voix de l'expérimentateur a été précédemment enregistrée par dictaphone. Les verbes d'action ont été prononcés à un rythme d'environ une fois par seconde et avec la même prononciation monotone choisie lorsque les verbes ont été prononcés.

Expérience 6 : Effet de la <u>prononciation</u> de verbes ayant une charge émotionnelle sur la performance du SVJ

Vingt sujets, tous du sexe masculin, ont pris part à cette expérience. Cinq verbes ont été sélectionnés et prononcés avant l'exécution de SVJ pendant 10 s et en suivant la même procédure entreprise lors des expériences antérieures. Le but de cette expérience était d'examiner l'influence que pourrait générer des verbes émotifs sur la hauteur du SVJ et n'ayant pas de spécificité comparable au verbe d'action *saute*. Les stimuli cognitifs ont donc été :

- prononcer le verbe d'action spécifique *saute* ;
- prononcer le verbe d'action *bouge* non spécifique pour SVJ, mais ne contredisant pas sémantiquement la notion de saut et, pour cette raison, est défini comme verbe d'action générale ;
- prononcer le verbe émotionnellement positif *gagne* et son antonyme *perds* ;
- prononcer le verbe d'état *rêve*, considéré comme neutre.

Expérience 7 : ***Impacte de <u>l'écoute</u> des verbes contradictoires à 'saute' sur la hauteur du SVJ***

Cette septième et dernière expérience, a été réalisée afin de vérifier ultérieurement la spécificité sémantique du verbe d'action *saute* à l'égard de l'action mesurée (SVJ). Il a donc été choisi de tester deux verbes d'action dont l'un est sémantiquement opposé à *saute* (*tombe*) et l'autre (*stoppe*) contredisant le but dégagé par le SVJ. Les stimuli choisis ont été réalisés dans les mêmes conditions décrites précédemment, et plus particulièrement à l'identique de l'expérience 5 quant à la modalité d'écoute de verbes.

Chapitre 6. RÉSULTATS

L'analyse des résultats des 7 expériences opérées chez les hommes, a mis en avant des données brutes (en centimètre), ce qui correspondant à l'impact des différentes tâches cognitives sur la principale tâche motrice, le Squat Vertical Jump (SVJ). Les résultats seront aussi présentés sous forme de normalisation (en pourcentage de progression de la hauteur du SVJ), par rapport au saut de base (SB). Cependant, nous présenterons en premier lieu les résultats avec les femmes qui avaient participé aux expériences 2 et 4 dans les mêmes conditions que les hommes.

6.1. Résultats des expériences obtenus chez les FEMMES *: expérience 2 et 4*

Dans une expérience précédemment publiée (Rabahi et al, 2012) et réalisée sur un groupe de 15 femmes, les résultats n'ont pas montré une significativité après stimulation cognitive. Le saut après l'imagerie kinesthésique[23] (19,7 ± 3,9 cm, 2*p* = 0,92, z = 1,22) s'est amélioré non significativement de 0,4 cm au regard du SB (19,3 ± 3,9 cm). La prononciation de *saute* n'a également pas eu d'effet significatif sur la hauteur du saut (*saute* : 20,1 ± 3,9 cm, 2*p* = 0,35, z = - 2,19, Δ = 0,8 ; *saute-S* : 20,0 ± 4,1 cm, 2*p* = 0,39, z = 2,13, Δ = 0,7), ni même le calcul mental (la soustraction mentale, SM : 20,2 ± 3,6 cm, 2*p* = 0,17, z = 2,56, Δ = 0,9 comparé au SB 19,3 ± 3,9 cm). Etant donné le peu de progression dans la hauteur du SVJ, qui ne dépasse pas les 0,9 cm, nous avons augmenté la taille du groupe pour atteindre 27 sujets.

Au cours de l'expérience 2, on a soumis les 27 participantes à quatre stimuli cognitifs (I*K, saute* prononcé à haute voix*, saute-S* et *SM*) avant de réaliser une série de saut, conformément au protocole expérimental décrit dans la partie *Matériel et Méthodes*. Les résultats bruts sont présentés dans le Tableau 3A. Malgré la taille du groupe comparable à celle de l'expérience 2 chez les hommes (n = 28), la hauteur du saut chez les femmes s'est améliorée d'un seul centimètre après la prononciation du

[23] L'aptitude des participantes à produire des images mentales a été prise en compte en les soumettant à un questionnaire d'imagerie mentale, le *Movement Imagery Questionnaire* (MIQ ; Hall et Martin, 1997). Les résultats n'ont révélé aucune corrélation statistique entre les valeurs du MIQ (ceux de l'imagerie kinesthésique) et la performance en SVJ après le KI (r^2=-0,32). De plus, l'analyse de la variance à mesures répétées n'a mis en avant aucun effet des valeurs obtenues par le questionnaire MIQ sur la hauteur du saut (2p=0,13 comparé au saut de base SB).

verbe *saute* (22,8 ± 5,1 cm comparé au SB 21,8 ± 4,8 cm, 2*p* = 0,03, z = - 2,90, soit une progression de 4,8%), alors que le delta (Δ), correspondant à la différence dans la hauteur du SVJ entre le saut de base (SB) et les sauts réalisés après les stimuli cognitives, avoisine les 2 cm chez les hommes (Δ=1,8 cm, voir le Tableau 8 de l'expérience 2 des hommes). Par ailleurs, les 9 et 8 mm de différence avec le SB observée chez les femmes, respectivement pour les conditions *saute-S* (22,7 ± 4,9 cm) et *SM* (22,6 ± 4,5 cm), n'ont pas été suffisants pour rejoindre la significativité (2*p* = 0,1 et z = 0,33 pour *saute-S* et 2*p* = 0,24 et z = 2,19 pour *SM*).

Tableau 3. *Effet de différents stimuli sur la hauteur du SVJ chez les femmes*

Expérience 2 chez les femmes (n=27)								
	(A) Résultats bruts				***(B) Résultats normalisés***			
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***	***Hauteur (%)***	***Δ (%)***	***2p***	***z-score***
SB	21,8 ± 4,8	-	-	-	-	-	-	-
IK	21,9 ± 4,2	0,1	0,99	0,33	101.3± 8.3	1,3	0,89	0,91
Saute	22,8 ± 5,1	1	0,03*	-2,90	104.8± 5.0	4,8	0,008**	-3,33
Saute-S	22,7 ± 4,9	0,9	0,10	2,48	104.3± 6.4	4,3	0,023*	2,99
SM	22,6 ± 4,5	0,8	0,18	2,19	104.1± 5.7	4,1	0,030*	2,90

*Δ ; delta ou amélioration de la hauteur du SVJ (Squat Vertical Jump) calculée à l'égard du saut de base (SB). 2p = probabilité ou p-value résultante du test post-hoc (Tukey 2σ). Ce dernier renseigne également un z-score. Les conditions comprennent l'imagerie kinesthésique (IK), la prononciation à haute voix (saute) et de manière silencieuse (saute-S) du verbe 'saute' à la première personne de l'impératif et la soustraction mentale (SM), * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01.*

Les résultats normalisés (Tableau 11B) montrent, par contre, une amélioration significative de la hauteur du SVJ après les conditions *saute-S* (prononciation silencieuse de saute, 104,3 ± 6,4 % en comparaison au SB, *p* = 0,023, z = 2,99) et *SM* (Soustraction Mentale, 104,1 ± 5,7 %, 2*p* = 0,030, z = 2,90), mais pas d'effet de la condition IK (101.3 ± 8.3 %, 2p = 0,89, z = 0,91). L'effet du verbe *saute* devient hautement significatif (104,8± 5,0 %, 2*p* = 0,008, z = - 3,33).

L'effet des verbes d'action non spécifiques au SVJ a été étudié (expérience 4) en suivant la même procédure expérimentale de celle opérée chez les hommes. A été testé, pendant cette expérience, la prononciation de *saute, lèche, pince* et *tiào* (saute en chinois, incompréhensible pour les français). L'analyse statistique des résultats bruts n'a

montré aucun effet de ces verbes sur la hauteur du saut (Tableau 4A). L'amélioration de la hauteur par rapport au saut de base (SB, 19,5 ± 4,7 cm) variait de + 0,2 à + 0,7 cm pour les verbes d'action spécifique (*saute*, 20,2 ± 4,2 cm, 2*p* = 0,55, z = 1,51) et non spécifiques au saut (*lèche* 19,7 ± 3,8 cm, 2*p* = 0,99, z = 0,39 ; *pince* 19,7 ± 3,7 cm, 2*p* = 0,99, z = 0,39). Le verbe *tiào* n'a pas augmenté la hauteur (19,2 ± 4,3 cm, 2*p* = 0,96 et z = - 0,67 pour un Δ = - 0,3 cm à l'égard du SB).

Tableau 4. *Effet de la prononciation de verbes d'action non spécifiques sur la hauteur du SVJ chez les femmes*

Expérience 4 chez les femmes (n=14)								
	(A) Résultats bruts				***(B) Résultats normalisés***			
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***	***Hauteur (%)***	***Δ (%)***	***2p***	***z-score***
SB	19,5 ± 4,7	-	-	-	-	-	-	-
Saute	20,2 ± 4,2	0,7	0,55	1,51	104,1 ± 5,4	4,1	0,39	1,77
Lèche	19,7 ± 3,8	0,2	0,99	0,39	101,9 ± 6,2	1,9	0,93	0,81
Pince	19,7 ± 3,7	0,2	0,99	0,39	102,4 ± 12,5	2,4	0,84	1,04
Tiào	19,2 ± 4,3	-0,3	0,96	-0,67	100,2 ± 10,9	0,2	1	0,70

Le delta (Δ) représente l'écart en centimètre ou en pourcentage de l'amélioration de la hauteur du saut par rapport au SB (saut de base). Les sujets ont prononcé les verbes d'action spécifique (saute) et non spécifique au saut (lèche, pince) ainsi qu'un verbe incompréhensible par les sujets (tiào). 2p = probabilité ou p-value résultante du test post-hoc (Tukey 2σ).

La normalisation des valeurs par rapport à SB met en avant des résultats comparables (Tableau 4B). La progression de la performance en hauteur du SVJ varie de 2,4 à 4,1 % pour les verbes *saute, lèche* et *pince*, tandis que *tiào* n'a amélioré la hauteur du saut que de 0,2%. La normalisation vers le pseudo-mot *tiào* n'apporte pas non plus de nouvelles données. Ni *saute* (105,9 ± 10,4 %, 2*p* = 0,09 et z = - 2,49 à l'égard de *tiào*) ni les verbes non spécifiques (*lèche,* 103,4 ± 8,3 %, 2*p* = 0,60 et z = - 1,44 ; *pince*, 103,4 ± 6,8, 2*p* = 0,60 et z = - 1,43) n'améliorent significativement la hauteur du SVJ.

Nous n'avons pas poursuivi ces expériences menées sur les femmes compte tenu de la faible amélioration de la hauteur du saut qui ne dépassait pas les 1 cm dans les expériences 2 et 4. Le peu de volontaires constituait la seconde raison de cette décision. Nous rappelons que les participantes n'étaient pas expertes en saut, au même titre que les hommes. C'est la raison qui nous a amené à répliquer ces expériences, du moins l'effet du verbe ''saute'', sur des expertes en saut.

6.2. Résultats des expériences chez les FEMMES expertes obtenus avec nos collaborateurs algériens

Trois expériences ont été réalisées (en collaboration avec Fahima LAMMARI, Ecole Nationale des Sciences et Technologie du Sport, ENS-STS, de Dely Ibrahim, à Alger et Hakim HARITI de l'Institut d'Education Physique et Sportive de l'université Alger 3, Zeralda) sur les basketteuses et les volleyeuses de l'équipe nationale d'Algérie, ainsi que sur un troisième groupe constitué d'étudiantes de l'ENS-STS. Le même protocole décrit dans les parties précédentes et illustrés par la Figure 39 a été appliqué dans les trois expériences qui vont suivre. Nous avons testé les mêmes stimuli langagiers lors de ces expériences. Le but étant d'étudier l'effet du verbe *saute* (conjugué à la première personne de l'impératif) sur la hauteur du SVJ, prononcé dans différents dialectes arabe (en arabe classique, *iqfaze* ; en dialecte algérois, *soté* ; en dialectes de l'est algérien et kabyles, *enteg, djelleb, neguez*), mais aussi en français (*saute*) et en anglais (*jump*). Chaque participante a prononcé le dialecte propre à sa région de naissance.

Tableau 5. *Effet de la prononciation du verbe d'action ''saute'' sur la hauteur en SVJ chez les expertes algériennes en saut.*

Expérience chez les expertes en saut (Algérie)								
	A) Basketteuses (n=30)				***B) Volleyeuses (n=33)***			
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***	***Hauteur (cm)***	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	24,4 ± 4,6	-	-	-	26,6 ± 4,0	-	-	-
Dialecte	25,1 ± 4,5	0,7	0,01*	-3,44	27,1 ± 3,1	0,5	0,97	-1,03
Arabe	24,9 ± 4,4	0,5	0,30	-2,29	27,3 ± 3,3	0,7	0,84	-1,43
Français	25,2 ± 4,2	0,8	0,004**	-3,80	27,1 ± 3,1	0,5	0,96	-1,11
Anglais	25,4 ± 4,6	1,0	<0,001***	-4,44	27,1 ± 2,8	0,5	0,98	-0,88

*Toutes les conditions traduisent la prononciation à haute voix du verbe d'action ''saute'' dans différents dialectes arabes, en arabe classique et enfin en langue française et en anglais, * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001.*

Le groupe de basketteuse (n=30) a augmenté significativement la hauteur du saut après la prononciation de *saute* en arabe dialectale (25,1 ± 4,5 cm, 2*p* = 0,01 et z = - 3,44 à l'égard du SB 24,4 ± 4,6 cm), en *français* (25,2 ± 4,2 cm, 2*p* = 0,004, z = - 3,80) ou encore en *anglais* (25,4 ± 4,6 cm, 2*p* < 0,001, z = - 4,44). Toutefois, l'amélioration de la hauteur ne dépasse pas 1 cm, exactement comme dans les deux expériences réalisées à Lyon. Aucune amélioration significative n'a été observée après la prononciation de *saute* en *arabe classique* (24,9 ± 4,4 cm, 2*p* = 0,30, z = - 2, 29, voir Tableau 5).

Le second groupe algérien constitué de 33 volleyeuses de haut niveau a subi les mêmes stimuli décrits ci-haut. L'analyse des données n'a révélé aucune amélioration significative de la hauteur du SVJ. Ni la prononciation de *saute* en arabe (*arabe classique* 27,3 ± 3,3 cm, 2*p* = 0,84 et z = - 1,43 comparé au SB 26,6 ± 4,0 cm soit + 0,7 cm; *dialectal* 27,1 ± 3,1 cm, 2*p* = 0,97 et z = - 1,033 soit Δ = 0,5 cm) ni en langues étrangères (*français* 27,1 ± 3,1 cm, 2*p* = 0,96 et z = - 1,11 soit Δ = 0,5 cm à l'égard du SB; *anglais* 27,1 ± 2,8 cm, 2*p* = 0,98 et z = - 0,88 soit Δ = 0,5 cm) n'a augmenté la hauteur du saut (voir le Tableau 5)

La troisième et dernière expérience algérienne a été menée sur un groupe de 26 étudiantes en sciences du sport. Uniquement *saute* en français a produit un effet significatif sur la performance en SVJ (24,3 ± 3,2 cm, 2*p* = 0,046 et z = - 3,053 comparé au SB, 23,4 ± 3,3 cm, ce qui fait une augmentation de 0,9 cm, voir le Tableau 6). Le reste des verbes n'ont aucunement impacté le SVJ (*arabe classique* 23,9 ± 3,3 cm, 2*p* = 0,61 et z = - 1,81, Δ = 0,5 cm ; *arabe dialectal* 23,9 ± 3.6 cm, 2*p* = 0,50 et z = - 1,97, Δ = 0,5 cm; saute en anglais 23,9 ± 3,2 cm, 2*p* = 0,66 et z = - 1,75, Δ = 0,5 cm).

Tableau 6. *Effet de la prononciation du verbe d'action ''saute'' dans différentes langues sur la hauteur du saut chez les non expertes algériennes*

Etudiantes algériennes en sport (n=26)				
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	23,4 ± 3,3	-	-	-
Dialecte	23,9 ± 3.6	0,5	0,50	-1,97
Arabe	23,9 ± 3,3	0,5	0,61	-1,81
Français	24,3 ± 3,2	0,9	0,046*	-3,053
Anglais	23,9 ± 3,2	0,5	0,66	-1,75

*Δ ; delta ou amélioration de la hauteur du SVJ calculée à l'égard du saut de base (SB). 2p = probabilité du test post-hoc (Tukey 2σ) qui par ailleurs engendre un z-score. Les verbes ont été prononcés chez des sujets 'femmes' non expertes en saut, * 2p < 0,05.*

Pour résumer les résultats obtenues chez les femmes, l'amélioration de la hauteur de saut est restée plafonnée à 1 cm et ce, quel que soit le degré d'expertise des participantes en saut vertical. La réalisation de ces expériences est poursuivie à Alger et à Tripoli (Liban) dans le cadre d'autres thèses de doctorat.

6.3. Résultats des expériences obtenus chez les HOMMES *: expérience 1 à 7*

Seront présentés dans cette section les résultats des sept expédiences lyonnaises menées chez les hommes.

Expérience 1 : Sujets « Références »

Les sujets de référence, qui n'ont pas été soumis aux stimuli cognitifs, n'ont pas amélioré la hauteur du SVJ (Tableau 7), ce qui écarte un effet potentiel d'entraînement. Par ailleurs, aucune différence significative n'a été observée entre les différents sauts (S1-S4, p ≥ 0,46). L'écart delta (Δ) entre la hauteur du SVJ mesurée lors du saute de base (SB) et celle enregistré lors des quatre blocs (S1-S4), n'a pas montré d'augmentation (voir la colonne Δ du Tableau 7).

Tableau 7. *Absence d'effet d'entraînement*

Expérience 1 (n=10)				
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	31.8 ± 4,3	-	-	-
S1	30.6 ± 3,5	-1,2	0,52	1,95
S2	31.1 ± 3,9	-0,7	0,95	1,14
S3	31.1 ± 3,7	-0,7	0,95	1,13
S4	31.4 ± 3,2	-0,4	0,99	-0,88

SB : Saut de Base, S1-S4 : sauts correspondants à chacun des blocs expérimentaux (cf. figure 39 du protocole expérimental). 2p est la probabilité obtenue après le test post-hoc de Tukey et ce après comparaison des conditions au SB. Le test de Tukey calcule par ailleurs le z-score. Le delta (Δ) correspond à la différence de la hauteur (en centimètre) entre les conditions et le SB.

La normalisation de ces données par rapport à SB a révélé des résultats similaires. Toutes les valeurs consécutives à la hauteur du SVJ ne dépassent pas la barre fatidique des 100% correspondant au SB. Ceci voudrait dire que les sujets n'améliorent pas leur performance en absence de stimuli cognitif (bloc 1 = 96,4%, 2*p* = 0,45 ; bloc 2 = 98,1%, 2*p* = 0,90 ; bloc 3 = 98,2%, 2*p* = 0,92 ; bloc 4 = 99%, *2p* = 0,99).

Expérience 2 : Effet de la <u>prononciation</u> du verbe d'action spécifique ''saute'' sur la performance en SVJ

Le but de cette seconde expérience était d'étudier l'effet de la prononciation d'un verbe d'action, spécifique (*saute*) pour le mouvement étudié, ainsi que l'effet d'autres stimuli cognitifs non langagier (Imagerie Kinesthésique, IK) et non spécifique à l'action (Soustraction Mentale, SM). Nous rappelons également que la condition IK a été utilisée ici en tant que contrôle, vu son efficacité reconnue sur l'action motrice (*cf.* partie *problématiques et hypothèse de travail*). L'analyse des données a montré une amélioration de la hauteur du saut suscitée par la totalité de ces stimuli (Tableau 8). L'IK a produit l'effet que nous attendions sur la performance en SVJ (2*p* < 0,01, z = 3,49). *Il faut remarquer, à notre connaissance, que c'est la première fois qu'un tel effet de l'IK a pu être montré sur la performance d'un mouvement aussi complexe que le SVJ* (voir Rabahi et al, 2012, 2013). Une amélioration a aussi été constatée lorsque les sujets ont prononcé le verbe d'action *saute* à haute voix (2*p* < 0,01, z = 4,66) ou silencieusement

(*saute-S ; 2p* < 0,01, z = 4,68) et, à notre surprise, la même influence a été aussi observée après exécution d'une soustraction mentale (SM ; 2*p* = 0,02, z = 3,13). De manière générale, les sujets ont amélioré leur saut de 1,2 à 1,8 cm après ces stimuli, en les comparants à SB (voir colonne Δ du Tableau 8).

Tableau 8. *Effet de divers stimuli cognitifs sur la hauteur du SVJ*

Expérience 2 (n=28)				
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	29,2 ± 3,8	-	-	-
IK	30,6 ± 4,4	+1,4	< 0,01**	3,49
Saute	31,0 ± 4,2	+1,8	< 0,001***	4,66
Saute-S	31,0 ± 4,9	+1,8	< 0,001***	4,68
SM	30,4 ± 4,1	+1,2	0,02*	3,13

*Δ ; delta ou amélioration de la hauteur du SVJ calculée à l'égard du saut de base (SB). 2p = probabilité ou p-value résultante du test post-hoc (Tukey 2σ). Ce dernier renseigne également un z-score, * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001.*

Le même effet de ces conditions cognitives sur la hauteur du SVJ a été enregistré lorsque les résultats bruts (en centimètre) ont été normalisés à l'égard du saut de base (SB). La hauteur du saut a progressé de 4,4 à 6,5 % (Figure 40A). Cette normalisation a été élargie au verbe *tiào* (*saute* en chinois), dépourvu de sens pour les sujets utilisés dans l'expérience 4, puisque les SBs des expériences 2 et 4 sont sensiblement les mêmes (respectivement 29,2 ± 3,8 cm et 29,0 ± 3,8 cm). Cette comparaison a révélé, de la même manière qu'à l'égard de SB, une amélioration de la hauteur du saut allant jusqu'à 6,3 %. (Figure 40B).

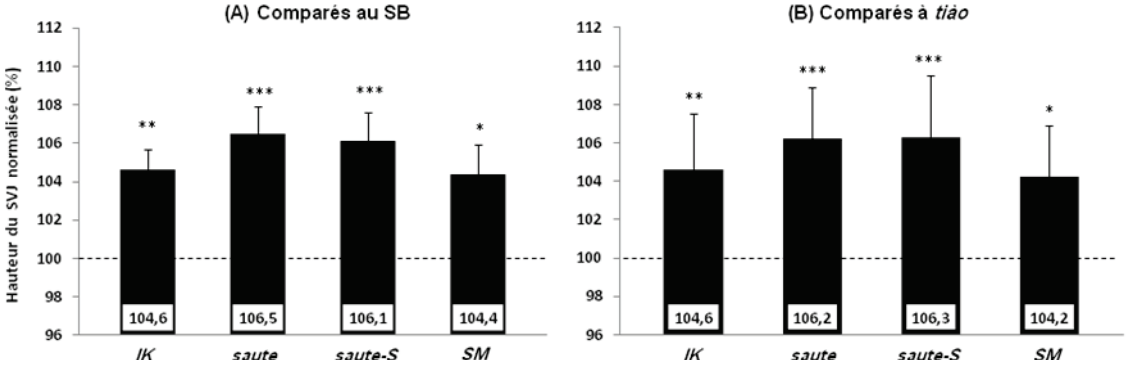


Figure 40. Influence des stimuli cognitifs sur la hauteur du SVJ (résultats normalisés). *Les sujets ont réalisé 4 blocs expérimentaux selon la description présentée dans la partie « protocole expérimentale ». Les stimuli réalisés étaient la prononciation pendant 10s du verbe d'action saute, à haute voix (saute) et de manière silencieuse (saute-S), l'imagerie kinesthésique (IK) et la soustraction mentale (SM). Les barres d'écarts types représentent l'erreur standard moyenne. La ligne discontinue dans les graphiques A et B représentent respectivement le saut de base (SB) et le verbe incompréhensible par les sujets tiào (saute en chinois), * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001*

Par ailleurs, la capacité d'imagerie des sujets a été évaluée avant le début de l'expérience, par un questionnaire d'imagerie mentale, le Movement Imagery Questionnaire (MIQ ; Hall et Martin, 1997 ; voir note 24). Aucune corrélation[24] statistique n'a été trouvée entre les valeurs du MIQ et la performance en SVJ après l'IK (r^2 = - 0.09), Aucun effet significatif des valeurs obtenues par le questionnaire MIQ sur la hauteur du saut n'a été observé (*p* = 0,78 comparé au saut de base SB).

Expérience 3 : Effet de la <u>lecture</u> du verbe d'action ''saute'' sur la performance en SVJ

Dans cette expérience on a voulu tester différentes modalités de lecture du verbe d'action *saute,* qui toutes ont montré une augmentation de la hauteur du SVJ (Tableau 9). En effet, la lecture à haute voix (*saute-L* ; 2*p* < 0,01, z = - 3,97) ou silencieuse (*saute-LS* ; *2p* < 0,01, z = 4,00) a amélioré la performance du saut de la même manière que les lectures du verbe en mouvement sur l'écran (*saute-Lm* ; 2*p* < 0,001, z = - 4,55, *saute-LSm* ; 2*p* < 0,01, z = 3,80). La prononciation du verbe *saute* a également influencé positivement la performance en SVJ (*saute*, 2*p* < 0,001, z = - 5,00) comme dans l'expérience 2. Lorsque les sujets regardaient un *écran vierge* (en absence de stimulus cognitif), aucune augmentation de la hauteur n'a été enregistrée (2*p* = 1, z = 0,05). Les

[24] Il s'agit du coefficient de *Pearson*.

stimuli langagiers testés dans cette expérience ont augmenté en moyenne de 2,3 cm la hauteur du saut (voir colonne Δ du Tableau 9).

Tableau 9. *Effet de la lecture du verbe d'action ''saute'' sur la hauteur du SVJ*

Expérience 3 (n=14)				
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	32,6 ± 3,6	-	-	-
Saute	35,3 ± 2,9	2,7	< 0,001***	-5,00
Saute-L	34,8 ± 3,0	2,2	< 0,01**	-3,97
Saute-LS	34,8 ± 2,9	2,2	< 0,01**	4,00
Saute-Lm	35,1 ± 2,6	2,5	< 0,001***	-4,55
Saute-LSm	34,7 ± 2,9	2,1	< 0,01**	3,80
Ecran vierge	32,6 ± 3,1	0	1	0,05

*Le delta (Δ) est une amélioration de la hauteur du SVJ calculée à l'égard du saut de base (SB). 2p est la probabilité résultante du test post-hoc (Tukey 2σ). Ce dernier renseigne également un z-score. Il s'agit dans cette expérience de prononcer (Saute), de lire à haute voix (Saute-L, Saute-Lm) et silencieusement (Saute-LS, Saute-LSm) le verbe d'action 'saute'. L'écran vierge correspond à la condition de contrôle, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001*

D'autre part, la normalisation des résultats mise en avant dans le Tableau 5, ne change rien à l'effet de la lecture de *saute* sur le SVJ (Figure 41A). Après comparaison à la condition contrôle *écran vierge,* les mêmes résultats ont été obtenus (Figure 41B).

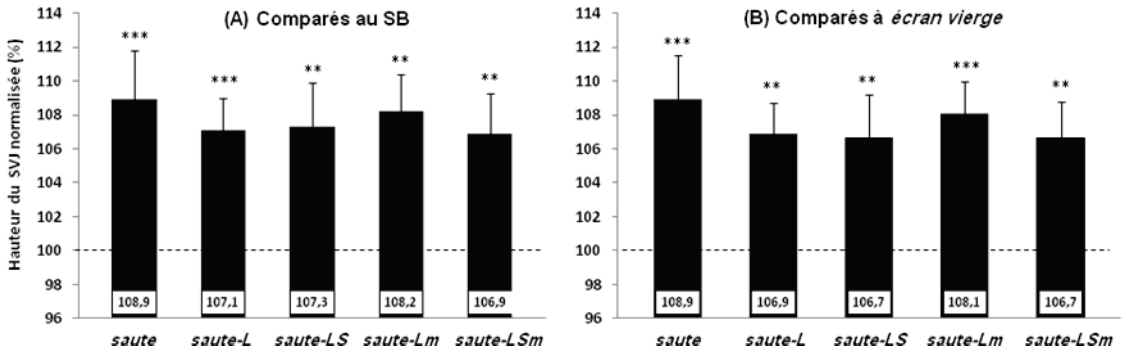


Figure 41. Influence de la lecture du verbe d'action ''saute'' sur la hauteur du SVJ (résultats normalisés). *Le verbe saute était écrit sur un écran projeté contre un mur. Les sujets le lisaient à haute voix (saute-L), silencieusement (saute-LS), défilant de bas en haut sur l'écran (saute-Lm, saute-LSm). La condition contrôle consistait à regarder un écran vierge sans contenu langagier, * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001.*

Expérience 4 : Effet de la <u>prononciation</u> de verbes d'action non spécifiques sur la performance en SVJ

Au cours de cette expérience, les sujets ont prononcé des verbes qui se référaient à des actions réalisées avec d'autres parties du corps, contrairement à *saute*, notamment à la langue (*lèche*) et à la main (*pince*). Un verbe insignifiant pour les sujets (*tiào*, saute en chinois) faisait également parti du design expérimental en tant que pseudo-mot. Les résultats ont indiqué une amélioration significative de la hauteur du saut après la prononciation du verbe d'action spécifique au SVJ, *saute* (30,6 ± 5,2 cm, 2*p* < 0,01 et z = 3,72 à l'égard de SB, 29 ± 3,8 cm). Cet effet n'a pas été rapporté quand les sujets prononçaient les verbes d'action non spécifiques *lèche* (29,5 ± 4,9 cm, 2*p* < 0,78, z = 1,14) et *pince* (29,9 ± 4,7 cm, 2*p* < 0,13, z = 2,34). Comparé au SB, le pseudo-mot *tiào* (29,2 ± 5,0 cm, 2*p* = 0,99, z = 0,84) n'a pas non plus influencé sur la performance du SVJ (Tableau 10). Seul *saute* améliore le saut de 1,6 cm en comparaison au saut de base SB. Les autres mots font progresser la hauteur du SVJ de 0,2 à 0,9 cm (voir la colonne Δ du Tableau 10)

Tableau 10. *Effet de la prononciation de verbes d'action non spécifiques sur la hauteur du SVJ*

***Expérience 4* (n=16)**				
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	29,0 ± 3,8	-	-	-
Saute	30,6 ± 5,2	1,6	< 0,01**	3,72
Lèche	29,5 ± 4,9	0,5	0.78	1,14
Pince	29,9 ± 4,7	0,9	0,13	2,34
Tiào	29,2 ± 5,0	0,2	0,99	0,84

*Les sujets ont prononcé des verbes spécifiques (Saute) et non spécifiques (lèche et pince) au saut ainsi qu'un verbe sans sens pour les sujets (tiào). Le delta (Δ) correspond à l'amélioration de la hauteur du SVJ calculée à l'égard du saut de base (SB). 2p est la probabilité résultante du test post-hoc (Tukey 2σ). Ce dernier renseigne également un z-score, ** 2p < 0,01.*

Toutefois, la normalisation de ces données par rapport au SB a révélé une amélioration, statistiquement significative, du verbe d'action non spécifique *pince* (2*p* = 0,04, z = 2,78) ainsi que du verbe d'action spécifique *saute* (*p* < 0,01, z = 3,79), soit une progression de 4,4% et de 6,1% respectivement (Figure 42A). Le verbe *lèche* n'a par

contre produit aucun effet sur la hauteur du SVJ (2*p* = 0,61, z = 1,42). L'effet de la prononciation de *saute* a été confirmé après sa comparaison au mot dépourvu de sens sémantique pour les sujets *tiào*. (Figure 42B).

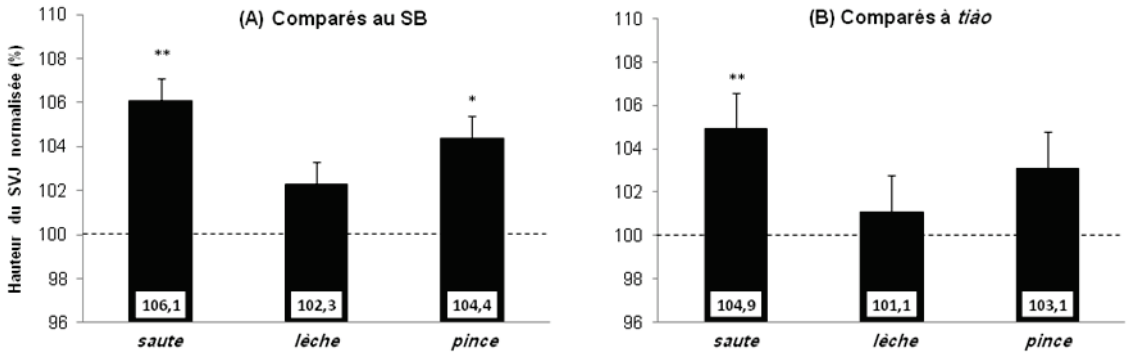


Figure 42. Influence de la prononciation des verbes d'action non spécifiques sur la hauteur du SVJ (résultats normalisés). *(A) résultats normalisés par rapport au saut de base (SB). Ce dernier est illustré par la ligne discontinue (B) comparaison à l'égard du verbe d'action sans sens pour les sujets ''tiào'', * 2p < 0,05, **2p < 0,01, *** 2p < 0,001.*

Expérience 5 : Effet de l'écoute de verbes d'action spécifique et non spécifiques sur la performance en SVJ

De la même manière que dans l'expérience 4, nous avons testé l'effet des mêmes verbes sur la performance en SVJ, *i.e.*: *saute*, *lèche*, *pince* et *tiào*, mais sous la modalité de l'écoute. Ainsi, en entendant le verbe *saute* les sujets améliorent significativement la hauteur de leur SVJ (*saute-E,* 34,5 ± 3,9 cm, 2*p* < 0,001 et z = 4,13 en comparaison à SB, 32,7 ± 4,0 cm). Le Tableau 11 rapporte les effets d'autres verbes, non spécifique ou sans sens, qui par ailleurs n'ont eu aucun effet statistiquement significatif sur le SVJ (*lèche-E,* 33,5 ± 3,9 cm, 2*p* = 0,30, z = 1,94 ; *pince-E,* 33,2 ± 4,5 cm, 2*p* = 0,83, z = 1,04 ; *tiào-E,* 32,8 ± 4,9 cm, 2*p* = 0,99, z = 0,21).

Tableau 11. *Effet de l'écoute (E) des verbes d'action non spécifiques sur la hauteur du SVJ*

***Expérience 5* (n=16)**				
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	32,7 ± 4,0	-	-	-
Saute-E	34,5 ± 3,9	1,8	< 0,001***	4,13
Lèche-E	33,5 ± 3,9	0,8	0.30	1,94
Pince-E	33,2 ± 4,5	0,5	0,83	1,04
Tiào-E	32,8 ± 4,9	0,1	0,99	0,21

*Il s'agit d'une réplique de l'expérience 4 dont les résultats sont décrits dans le tableau 10 sauf qu'ici les verbes sont écoutés (E), *** 2p < 0,001.*

L'effet du verbe d'action *saute* est maintenu même lorsque les résultats ont été normalisés par rapport au SB ou à *tiào* (Figure 43). Dans les deux cas, aucune amélioration du saut n'a été observé après l'écoute des verbes non spécifiques *lèche* et *pince*, ainsi que *tiào*. Comparable à la progression du saut observée lors de la prononciation des verbes dans l'expérience 4, l'écoute de *saute* a produit 1,8 cm d'écart à l'égard du SB, au moment où les autres verbes (*lèche, pince et tiào*) ont amélioré le SVJ de 0,1 à 0,8 cm (voir la colonne Δ du Tableau 11).

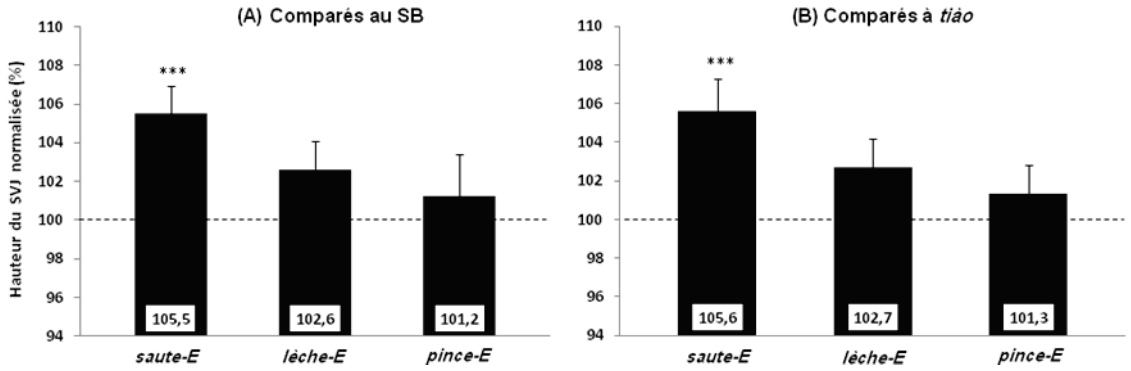


Figure 43. Influence de l'écoute des verbes d'action spécifique et non spécifiques sur la hauteur du SVJ (résultats normalisés). *Les verbes ont été enregistrés par l'expérimentateur à l'aide d'un dictaphone, en respectant les mêmes modalités lorsqu'ils ont été prononcés par les sujets. La lettre E indique l'écoute des verbes, *** 2p < 0,001.*

Expérience 6 : Effet de la <u>prononciation</u> de verbes ayant une charge émotionnelle sur la performance en SVJ

Lors de cette expérience, les sujets ont prononcé le verbe d'action *saute* spécifique à l'action accomplie, montrant l'amélioration usuellement observée (34,8 ± 3,5 cm, 2*p* = 0,006 et z = 3,49 en comparaison au saut de base, SB : 33,4 ± 3,6 cm, soit une augmentation de 1,4 cm ; Tableau 12). De même, et à notre grande surprise, la prononciation de deux verbes antonymiques et chargés émotionnellement, *gagne* et *perds*, a amélioré la hauteur du saut de 1,6 cm et 1,3 cm respectivement (voir la colonne Δ du Tableau 12 ; *gagne,* 35,0 ± 3,6 cm, 2*p* < 0,001, z = - 4,10 ; *perds,* 34,7 ± 4,3 cm, 2*p* = 0,018, z = 3,19 ; SB : 33,4 ± 3,6 cm). Le verbe d'action non-spécifique *bouge* n'a suscité par contre aucun changement statistiquement significatif sur la hauteur du SVJ (34,2 ± 3,4 cm, 2*p* = 0,36, z = - 1,96 ; avec toutefois une progression, à l'égard du SB, de 0,8 cm). De la même manière, le verbe *rêve* qui exprime un état mental, n'a pas eu d'impact significatif sur le saut (34,0 ± 3,9 cm, 2*p* = 0,64 et z = 1,54 avec un Δ = 0,6 cm, Tableau 12).

Tableau 12. *Effet de la prononciation des verbes chargés émotionnellement sur la hauteur du SVJ*

Expérience 5 (n=20)				
Condition	**Hauteur (cm)**	***Δ (cm)***	***2p***	***z-score***
SB	33,4 ± 3,6	-	-	-
Saute	34,8 ± 3,5	1,4	0,006**	3,49
Gagne	35,0 ± 3,6	1,6	< 0,001***	-4,10
Perds	34,7 ± 4,3	1,3	0,018**	3,19
Bouge	34,2 ± 3,4	0,8	0,36	-1,96
Rêve	34,0 ± 3,9	0,6	0,64	1,54

*Les sujets devaient prononcer à haute voix les verbes d'action spécifique (saute) et non spécifique (bouge) au saut, des verbes émotifs (gagne et perds) ainsi qu'un verbe d'état (rêve), * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001.*

La normalisation de ces résultats par rapport au SB, affirme la tendance générale quant à l'influence de *saute* et des verbes à caractère émotionnel sur la hauteur du SVJ. En effet, *saute*, *gagne* et *perds* avaient suscité une augmentation dans la hauteur du saut allant de 3,6 à 4, 9 %, alors que les autres verbes n'ont pas dépassé le seuil de 2,5% (Figure 44).

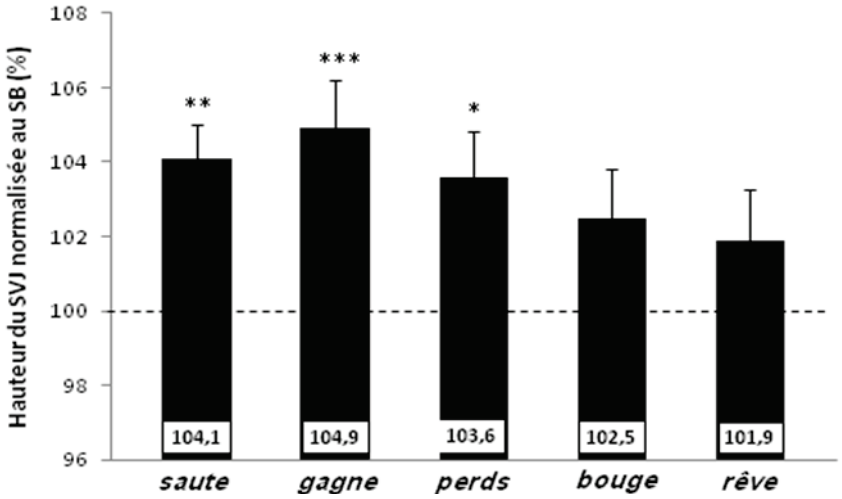


Figure 44. Influence de la prononciation des verbes à caractère émotionnel sur la hauteur du SVJ (résultats normalisés). *La hauteur du saut a été normalisée par rapport au saut de base (SB) représenté par la ligne discontinue, * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001.*

Expérience 7 : Impacte de l'écoute des verbes contradictoires à 'saute' sur la hauteur du SVJ

Nous avons voulu, au cours de cette dernière expérience, vérifier l'effet qu'aurait pu exercer la compréhension d'un verbe sémantiquement opposé à *saute* ainsi qu'au but même incarné par le saut vertical. Nous avons ainsi choisi l'écoute des verbes *tombe* et *stoppe* (conjugués aussi à la première personne de l'impératif) en plus de *saute*, qui est le dénominateur commun des expériences de notre étude. Les résultats de cette expérience ont indiqué l'amélioration attendue de la hauteur du saut après l'écoute du verbe *saute* (*saute-E*, 31,7 ± 0,4 cm, 2p < 0,001 et z = 7,97 à l'égard du SB, 29,8 ± 0,9 soit Δ = 1,9 cm). Les verbes revêtant un sens contraire à *saute*, n'ont pas amélioré la performance en SVJ (*tombe-E*, 29,8 ± 0,7 cm, 2*p* = 0,99 et z = - 0,13 soit Δ = 0 cm par rapport à SB ; *stoppe-E*, 29,9 ± 0,7, 2*p* =1 set z = 0,10 soit Δ = 0,1 cm, Tableau 11).

Tableau 13. *Effet de l'écoute (E) de verbes opposés sémantiquement à 'saute'*

Expérience 7 (n=10)				
Condition	**Hauteur (cm)**	**Δ (cm)**	***2p***	***z-score***
SB	29,8 ± 0,9	-	-	-
Saute-E	31,7 ± 0,4	+1,9	<0,001***	7,97
Tombe-E	29,8 ± 0,7	0	0,99	-0,13
Stoppe-E	29,9 ± 0,7	+0,1	1	0,10

**** 2p < 0,001.*

De la même manière que pour les précédentes expériences, nous avons normalisé les données brutes exposées dans le Tableau 13 et nous avons obtenu le même effet des verbes sur l'action motrice. La Figure 45 illustre l'amélioration de la hauteur du SVJ après que les sujets ont été soumis aux tâches cognitives. Ainsi, le verbe d'action *saute* améliore le saut de 6,04%, tandis que *tombe* et *stoppe* ne montrent pas de progression dans la hauteur du SVJ.

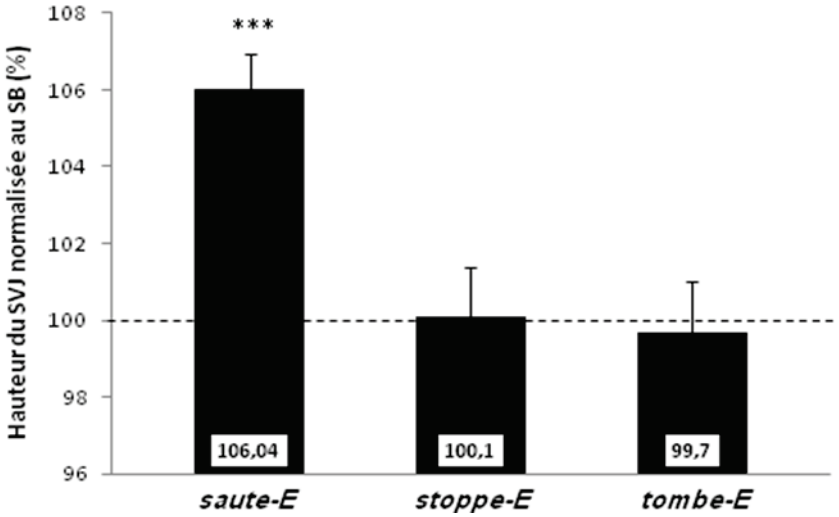


Figure 45. Effet des verbes d'action sémantiquement opposés à l'action de sauter sur la hauteur du SVJ (résultats normalisés). *La hauteur du saut a été normalisée par rapport au saut de base (SB) représenté par la ligne discontinue, *** 2p < 0,001.*

Effet général des stimuli cognitif sur la hauteur en SVJ : Résumé des résultats

Afin de faciliter la lecture des résultats obtenus au cours des sept expériences présentées dans cette partie (chez les hommes), nous avons résumé dans le Tableau 14, l'effet de l'ensemble des stimuli cognitifs sur la hauteur du SVJ. Ce Tableau décrit

l'amélioration (Δ) induite par les stimuli dans le cas des résultats bruts (cm) et normalisés (%). L'amélioration du saut consécutive à la moyenne des valeurs obtenues après le verbe d'action *saute* – dans les expériences 2 à 7 – a atteint 2,0 cm (32,8 ± 4,2 cm, 2p < 0,001, z = 9,43 comparé à la moyenne des SBs de ces expériences, soit 30,8 ± 4,2 cm, n = 104), ce qui équivaut à une progression de 6,8% de la hauteur du SVJ (*saute* : 106,8 ± 7,5 %, 2p < 0,01, z = 8,99 comparé aux SBs = 100%). Les verbes chargés émotionnellement, gagne et perds, améliorent le saut respectivement de 1,6 cm (4,9%) et 1,3 cm (3,6%). Les stimuli non langagiers affectent également positivement ma performance du saut (Soustraction Mentale, + 1,2 cm soit + 4,4% ; Imagerie Kinesthésique, + 1,4 cm soit + 4,6%). Les autres verbes améliorent tout de même la hauteur du SVJ mais de manière non significative, excepté le verbe *pince* qui a révélé une augmentation statistiquement significative après normalisation des résultats bruts (Δ = 0,9 cm pour une amélioration de + 4,4% à l'égard du SB ; Tableau 14).

Tableau 14. *Effet des différents stimuli sur la hauteur du SVJ*

Stimulus Cognitif	Augmentation de la hauteur[§] (cm)	*2p*	Augmentation de la hauteur [§§] (% du SB)	*2p*
Saute	2,0	<0,001***	6,8	<0,001***
Subtraction Mentale	1,2	0,015*	4,4	0,014*
Imagerie Kinésthésique	1,4	0,004**	4,6	0,008**
Tiào (saute en Chinois)	0,2	0,99	1,4	0,91
Pince	0,9	0,13	4,4	0,04*
Lèche	0,5	0,78	2,3	0,61
Rêve	0,6	0,64	1,9	0,55
Bouge	0,8	0,36	2,5	0,22
Gagne	1,6	<0,001***	4,9	<0,001***
Perds	1,3	0,02*	3,6	0,015*
Tombe	0,0	0,99	-0,3	0,98
Stoppe	0,1	1,0	0,1	0,99

*Les résultats du stimulus 'saute' regroupent tous les verbes 'saute' utilisés dans les expériences 2 à 7, incluant les modalités prononcées, lues et écoutées. §Cette colonne représente la hauteur du saut, mesurée après la présentation des stimuli cognitifs, comparée au saut de base (SB). §§Cette seconde colonne représente la normalisation (%) des données brutes à l'égard du SB, * 2p < 0,05, ** 2p < 0,01, *** 2p < 0,001.*

Nous avons, par ailleurs, effectué une comparaison des augmentations mise en avant dans le Tableau 14 concernant l'effet du verbe *saute.* Ces données enregistrées dans les expériences 2 à 7 n'ont révélé aucune différence significative entre les effets de *saute* au sein de chaque expérience (l'ANOVA à un facteur a révélé l'absence d'effet de groupe 2*p* = 0,88, F = 0,35). À ce titre et au vue de l'effet positif que le verbe *saute* a pu avoir sur la hauteur du SVJ, son utilisation dans l'ensemble des expériences constitue une condition contrôle fiable, et au-dessus de tout un stimulus langagier fiable et reproductible.

6.4. Résultats de l'effet de divers stimuli cognitifs obtenu avec nos collaborateurs libanais

Nous présenterons dans cette partie, et de manière succincte, les résultats obtenus avec nos collaborateurs du département de physiothérapie de l'université libanaise à Beyrouth (Liban). Ces résultats ont été partiellement publiés (voir la section *Publications*).

Le premier résultat concerne l'effet du verbe d'action '*saute'* sur la performance en SVJ. Ce verbe a été prononcé en langue maternelle, *i.e.*: '*natte'* en arabe classique et en seconde langue, *i.e.:* '*saute'* en français. Un troisième stimulus, la prononciation du mot sans sens pour les sujets, *i.e.*: *'tiào'* (saute en chinois), a été prononcé en guise de mot de contrôle. Le protocole expérimental était similaire au notre (voir la Figure 39 dans la section *Matériel et Méthodes*). L'analyse de variance à mesures répétées a révélé un écart significatif entre le saut, chez les hommes, qui suivait la prononciation de *saute* (Hommes, n=15; 24,3 ± 3,8 cm, 2p < 0,001) et le saut de base (SB ; 22,7 ± 3,5 cm). Il est aussi à noter que le verbe *natte* (27,8 ± 3,8 cm, 2p < 0,001) est significativement supérieur au SB. Enfin, le mot n'ayant pas de sens pour les sujets, *tiào*, n'a eu aucun effet sur la hauteur du saut (22,5 ± 3,9 cm, 2p = 0,86). Concernant les résultats des sujets féminins (n = 12), aucun effet n'a pu être mis en évidence sur la performance du

SVJ, quelle que soit la condition cognitive (2p ≥ 0,18) probablement due à un faible nombre de sujets.

Le second résultat libanais se rapporte à la visualisation sur écran d'un saut vertical et son impact sur le SVJ réalisé par l'observateur. Trois groupes ont été constitués : le groupe 1 (n = 7) n'a bénéficié d'aucune visualisation du saut (groupe témoin) ; le groupe 2 (n = 7) a visualisé une vidéo d'un Squat Vertical Jump (SVJ), présenté sur un écran d'ordinateur ; le groupe 3 (n = 7) a eu à visualiser deux vidéos de SVJ, diffusées simultanément sur le même écran et réalisées par deux sauteurs distincts. Le protocole prévoyait 90 secondes de visualisation entrecoupées de 30 secondes de pause, le tout répété 12 fois (45 secondes de repos sont prévues avant d'entamer le saut en trois essais) au rythme de deux entrainements par semaine, sur une période totale de six semaines.

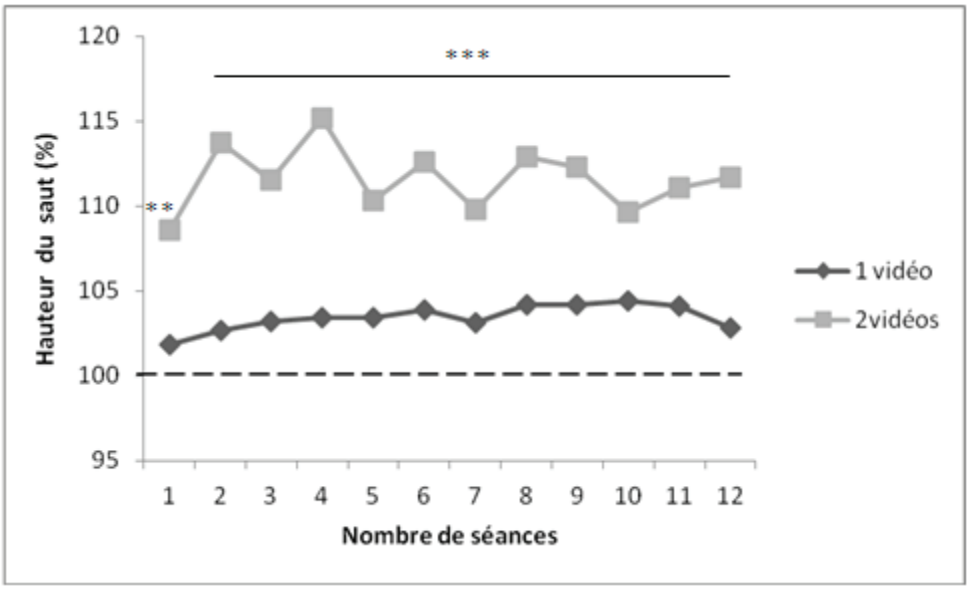


Figure 46. Evolution de la hauteur du SVJ au cours de 12 semaines de visualisation. *La visualisation de sauts verticaux par le biais d'une seule vidéo (tracé noir en losange) ou de deux vidéos (tracé gris clair en carreaux) a été réalisée par les groupes expérimentaux 2 et 3 (sept sujets chacun). Les valeurs de la hauteur ont été normalisées par rapport aux sauts des mêmes sujets avant visualisation (section Méthodes) et ici représentées en 100 % pour chaque séance (ligne en petit traits). **p < 0,01 et ***p < 0,001 par rapport au 100 %.*

Les résultats normalisés en pourcentage des sauts contrôles, ceux réalisés en amont de la visualisation, montrent que celle-ci tend à améliorer, mais de manière non significative, la hauteur du SVJ chez les sujets du groupe 2 (visualisation d'une seule vidéo) : Séance 1 ; 28,7 ± 1,8 cm avant la visualisation *vs.* 29,2 ± 1,9 cm après visualisation (2p = 0,99), Séance 12 ; 30,9 ± 2,1 cm avant la visualisation *vs.* 31,7 ± 2,2 cm après visualisation (2p = 0,91). La visualisation de deux vidéos (groupe 3) apparait susciter quant à elle une amélioration accrue de la hauteur de saut, laquelle apparait statistiquement significative : Séance 1 ; 27,5 ± 2,3 cm avant la visualisation *vs.* 29,8 ± 2,1 cm après visualisation (2p < 0,01), Séance 12 ; 30,3 ± 2,1 cm avant la visualisation *vs.* 33,7 ± 2,2 cm après visualisation (2p < 0,001 Figure 46).

III. DISCUSSION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Chapitre 7. DISCUSSION GENERALE

7.1. Préambule : Quelle relation existe-t-elle entre stimuli cognitifs et action motrice ?

Telle a été la question qui a conduit aux études qui ont été ici résumées. L'une des hypothèses au départ de cette recherche était basée sur la connaissance du fait que toutes les aires cérébrales sont en relation l'une avec l'autre et cela est aujourd'hui visible grâce à l'extraordinaire développement de la technologie d'imagerie IRM par diffusion[25] (Figure 47). Il est alors possible que chaque stimulus cognitif (dont la source corresponde à une ou à plusieurs aires corticales) soit, proportionnellement, capable de stimuler ou d'inhiber les actions spécifiques des autres aires. Compte tenu de la *centralité géométrique* des aires sensorimotrices dans le cerveau, pourquoi alors ne pas penser à une relation étroite entre les diverses aires corticales afin de faciliter la fonction de ces deux (motrice et sensitive), qui représentent par ailleurs les caractéristiques fondamentales du vivant, la sensation et l'action. Ceci est d'ailleurs représenté par les faisceaux centraux bleus et rouges de la Figure 47.

L'une des théories les plus acceptées dans le domaine de la cognition est celle liant la perception à l'action (voir l'ouvrage d'Alain Berthoz, 1997). Elle présente un intérêt particulier pour la majorité des scientifiques qui s'évertuent à comprendre les relations existantes entre les stimuli qui proviennent de notre corps (proprioception) ou du monde extérieur (perception) et nos actions ou réactions (motricité), que nous réalisons ou pas, en réponse à ces stimuli. On est ainsi arrivé à comprendre que tout élément cognitif que l'individu peut intégrer en provenance de son moi et de son entourage, a une importance significative sur son comportement. Or l'agir et l'action motrice en particulier est l'une des premières caractéristiques qui définit le biologique, le vivant et l'homme en particulier, la différence *princeps* entre l'animé et l'inanimé.

Nous acceptons le concept de l'*incarnation* du mental dans le corps (en anglais, *embodiment*), théorie cognitive qui a résolu une diatribe vieille de millénaires entre les

[25] Voir le projet *connectome* qui est à l'origine de plusieurs projets de cartographie de la connectivité du cerveau humain.

défenseurs de la séparation du mental[26] et du corps et les adeptes de l'unité des deux éléments. Le premier est souvent appelé *esprit* (*psyché*) par des philosophes depuis l'ancienne tradition grecque, mais aussi par des scientifiques. Le second a été et il l'est souvent encore vu en sa qualité de *chair*, notamment à partir de la philosophie qui a vu son essor depuis la chute de l'empire romain. Il était ainsi impensable pour les philosophes du Moyen Age de ne pas séparer l'esprit de la chair en raison de la pression conséquente, en Occident, de la théologie Chrétienne. Ainsi et nonobstant des auteurs comme Aristote, et Spinoza bien plus tard, la dualité du corps et du mental est restée dans la culture occidentale (et non seulement) jusqu'à des temps récents. Toutefois, plusieurs études qui ont eu cours dans les trente dernières années, ont apporté un regard nouveau sur l'étude de la conscience[27] et sur la reconnaissance de l'impossibilité de séparer le corps du mental (voir Varela et al, 1993 ; Edelman et Tononi, 1999 ; Libet, 2006).

Cette *incarnation* du mental rend compte des relations et des influences que ce dernier a sur le corps, et vice-versa. Mais ce n'est pas tout, car, comme cela a été vu par certains auteurs (voir notamment Clark et Chambers, 1998 ; Clark, 2008), l'unité corps-mental ne peut exister en absence d'un monde qui l'entoure. En réalité l'unité corps-mental semblerait ne pas servir à grand-chose en absence du monde dans lequel elle se trouve. Ce concept d'environnement-monde, plus ou moins immédiat et proche pour chaque individu, dérive de l'œuvre d'un biologiste peu connu en neurosciences, le germano-balte Jakob von Uexküll (1864-1944) qui l'a défini comme l'*Umwelt* (de *Um* = autour et *Welt* = monde) de chaque être vivant. Certains auteurs ont alors parlé d'*inorbation*[28] (en anglais *emworldiment*) en continuation du concept d'incarnation et indiquant par-là l'impossibilité de séparer la triade corps-mental-monde. Ce concept reliant le corps-mental au monde a été aussi développé, à peu de choses près au cours

[26] Dans notre vision sur le sujet, nous faisons une claire et nette différence entre mental et esprit, le premier correspondant au latin *mens* et d'où provient l'anglais *mind*, est l'expression de ce que l'on nomme 'fonctions supérieurs' des organismes animaux, émotions, sentiments, pensée, conscience… le second terme, esprit, ne peut être étudié à présent que par les théologiens ou les philosophes et donc il ne sera pas de notre ressort ici .

[27] Il faut préciser que, déjà, les études qui seront rappelées ont montré qu'il est possible d'étudier la conscience mentale.

[28] Mot (du latin *in orbe*) qui évidemment n'existe pas dans la langue française et que nous essayons de traduire de l'anglais *emworldiment*.

de la même époque (fin du 19ème, début du 20ème siècle) et indépendamment, par le philosophe Edmund Husserl qui en a fait l'une des idées clés du courant philosophique qu'il a initié, la Phénoménologie. Il a parlé d'*intentionnalité*[29] de l'individu (Husserl, 1913/2004), dont la définition précise ainsi le *rapport* conscient que le sujet (l'individu) a avec l'objet (le monde extérieur).

On en arrive à l'idée que nos actions sont dépendantes non seulement de notre volonté mais aussi de notre environnement et qu'en conséquence notre corps agit sur le mental tout comme le mental agit sur le corps. Des concepts bien connus dans les activités sportives depuis l'invention grecque des Jeux Olympiques et qui pourtant ont suscité, comme nous l'avons mentionné, des débats depuis des siècles. Si nous réagissons à l'environnement cela ne peut se faire que par l'entremise de nos perceptions.

7.1.1. Que sont-elles ces perceptions ?

Nos sens évidemment, mais dans un sens élargi, car ce ne sont pas les seuls cinq sens (vue, odorat, toucher, goût, ouïe) mais aussi tout ce qui nous permet de savoir si nous sommes debout ou assis ou penché, en d'autres termes toutes les 'sensations' qui concernent aussi la perception de l'espace ou du temps et qui sont reliées au terme plus général de 'proprioception'. Ces sensations concernent aussi la position du corps et la contraction musculaire et donc elles nous permettent de nous situer dans l'espace-temps avec une relative aisance.

Si on considère que ces 'perceptions et sensations' (terme qui est ici utilisé comme englobant tous ces divers aspects de nos relations avec le *Umwelt*) influencent notre agir, elles doivent nécessairement être intégrées au niveau cérébral afin d'amener à une réponse de l'individu ou pas.

Or, nous savons, depuis le travail liminaire de Korbinian Brodmann (1909), que chaque aire du cortex cérébral semble être spécialisée dans une fonction particulière.

[29] A ne pas confondre avec l'intention qui est l'action de tendre vers quelque chose ou un objectif. L'intentionnalité est une relation, un rapport entre l'individu et le monde ou, autrement dit, c'est la conscience de l'individu qui le confronte à son entourage et qui régira ses intentions, donc ses actions.

Grosso modo en regardant la distribution de ces aires fonctionnelles dans un hémisphère cérébral, il semble bien qu'elles soient distribuées *autour* du sillon central de Rolando où se trouvent les aires sensorimotrices primaires (Figure 48). Cela semble intéressant comme localisation géométrique car le cortex sensitif et le moteur, nous venons de le remarquer précédemment, sont indissolublement liés, car l'un dépend de l'autre. La conscience de l'individu peut utiliser l'un, le sensitif, pour agir grâce à l'autre, le moteur.

Cette position centrale laisse la place à un développement important du lobe frontal (qui contient aussi une aire pré-motrice et une aire supplémentaire, motrice, capitales dans la préparation des mouvements), pariétal et temporal. En réalité, déjà Brodmann avait mis en évidence qu'une bonne partie de ces aires (en rouge dans la Figure 48) sont en support des aires sensorimotrices et semblent permettre une modulation fine des fonctions essentielles développées dans les aires sensorimotrices. On trouve donc des aires associatives dans le pariétal (Wernicke notamment pour le langage, mais aussi le pariétal supérieur et inférieur pour la vision; voir Rizzolatti et Sinigaglia, 2011), dans le frontal inférieur et supra-orbital (reliés aux émotions ; Dolan, 2002) et dans le temporal central-inférieur (relié à l'audition mais aussi au langage et au visuel).

A cela il faut ajouter le fait qu'en dehors des fonctions *perceptives*, nous ne connaissons pas d'aires spécialisées pour les autres aspects du mental, considérées comme *supérieures* dans une littérature encore récente, comme la mémoire (à part l'hippocampe) ou l'intellect ou encore la pensée, etc. Ce terme de fonctions cérébrales supérieures (traduit par *higher brain function*, dans la littérature anglaise, voir : Masland, 1958 ou Edelman et Mountcastle, 1978 ; et aussi, pour le volet clinique : Borgaro et Prigatano, 2002) indique tout ce qu'on attribue au mental pour définir la différence entre homme et animaux et, plus particulièrement, la différence entre l'homme et les autres Mammifères en ce qui concerne la conscience. En tout cas cette partie de la conscience qui est plus précisément traduite par *consciousness* en langue anglaise (la conscience que nous appelons 'mentale'). Les animaux et les Mammifères en particulier ont une conscience mentale qui ressemble à celle que nous possédons, notamment en

ce qui concerne la conscience d'être conscient. Par exemple, un chimpanzé ou un éléphant a la capacité de se reconnaitre en regardant dans un miroir, ce qui paraissait, dans un passé encore récent, n'être qu'une capacité exclusivement humaine (voir Dennet, 1985 ; Griffin et Speck, 2004). Ce qui diffère des autres mammifères (et c'est bien plus qu'une simple nuance) c'est la subtilité et la complexité avec lesquelles peut travailler un cerveau humain.

Cette complexité est ultérieurement augmentée par quelque chose que nous n'avons pas encore abordé et qui est définie par des termes que tout le monde connait bien : émotions et sentiments. Jusqu'à il y a une dizaine d'années, il semblait clair que le site des émotions était le cortex limbique qui comprenait un certain nombre de noyaux de la base (voir pour revue Damasio, 1998). Malheureusement il n'y avait pas d'accord sur les noyaux et les diverses parties du cortex cérébral qui faisaient partie de ce que l'on appelait aussi 'système limbique'. Les nouvelles recherches sur le thalamus (Mazzola et al, 2013 ; Jankowski et al, 2013) font comprendre l'extraordinaire complexité de ce noyau de la base et des nombreuses interactions qu'il détient avec le cortex d'une part, le cervelet et le reste du corps d'autre part. Cette complexité ne comprend pas seulement le rôle de relais sensorimoteur intermédiaire entre le cerveau et le reste du corps mais aussi, avec l'amygdale, son importance dans la régulation des émotions. Damasio (2005) introduit son propos par cette phrase : « *Les sentiments de douleur et de plaisir, ou toute autre qualité se trouvant entre eux, forment le soubassement de notre esprit »*. Force est de conclure que toute autre émotion n'est qu'une variation sur le thème de douleur et plaisir.

Nous réalisons ainsi que nous connaissons un peu la distribution des aires cérébrales, mais nous en savons encore bien peu sur la complexité qui se cache derrière cette apparente modularité. L'abondante littérature, depuis une quinzaine d'année, sur le sujet de l'influence de la parole dans l'exécution de geste simples, a attiré notre attention car, d'une part, la parole est l'une des très grandes différences qui existe entre l'humain et les autres Mammifères et d'autre part, les résultats semblaient montrer une spécificité parole-action (motrice) qui semblait être partagée par de nombreux chercheurs (Hauk et al, 2004 ; Shtyrov et al, 2004 ; Buccino et al, 2005 ; Pulvermuller et

al, 2005b ; Tettamanti et al, 2005 ; Aziz-Zadeh et al, 2006 ; Kemmerer et al, 2008 ; Scorolli et Borghi, 2007 ; Boulenger et al, 2006, 2009 ; Pulvermuller et Fadiga, 2010). L'ensemble de ces résultats montrait en effet que la parole (sous forme de verbes d'action ou de substantifs représentatifs de l'action ou même de courtes phrases évoquant une action) a un effet que certains ont cru déceler directement dépendant de l'activation du cortex moteur primaire (Hauk et al, 2004). D'autres par contre, et plus raisonnablement à notre avis, identifient l'action de la parole sur le cortex pré-moteur ou autre structure cérébrale (Bedny et al, 2008 ; Postle et al, 2008 ; De Zubicaray et al, 2008 ; Mahon et Caramazza, 2008 ; Fernandino et Iacoboni, 2010 ; Arévalo et al, 2010 ; Tremblay et Small, 2011 ; Bedny et Caramazza, 2011). Quoi qu'il en soit il semble très probable que la parole stimule l'action, peu importe si elle est parlée à haute voix ou énoncée silencieusement ou lue ou écoutée.

7.1.2. Pourquoi la parole stimule l'action ?

La question de fond est justement de comprendre la (ou les) raison(s) qui sous-tendent cet effet remarquable. Il s'agit d'une question difficile car l'expérimentation ne peut pas encore donner une réponse, mais on peut recourir à d'autres raisonnements qui ne soient forcement techniques. En effet la parole, et les langues qui en dérivent, sont des phénomènes culturels devenus tantôt sacrés, techniques, scientifiques, poétiques, littéraires, politiques, des outils, en somme, qui interviennent dans toutes les instances de la vie humaine et que l'homme défini 'vivants', les langues 'vivantes'. Est-ce pour les distinguer des soi-disant langues mortes ? Claude Hagège (2000) pense qu'il n'en est pas ainsi. Il dit en effet : « *on peut considérer que si les langues sont pourvoyeuses de vie […], il est logique d'en induire qu'elles ont quelque chose à voir avec le monde vivant* » et il en conclu que toutes les langues sont réellement vivantes, même celles que l'on ne parle plus. D'autres, par ailleurs, voient dans la culture, véhiculée par les langues, une démonstration de l'*inorbation* de l'homme, de sa dépendance du monde, comme l'un des traits d'union essentiels entre le monde et l'être humain. Il est ainsi concevable que les langues, ou seulement la parole, puissent agir sur l'action de l'homme, entendu non seulement comme action motrice mais aussi sur l'agir entendu d'un point de vue philosophique.

Le problème suivant peut être démontré plus facilement (en comparaison à celui qui débute par le pourquoi), car il concerne le comment, *i.e.* : comment la parole peut-elle agir sur l'action motrice ? En tenant compte de la question de fond (le pourquoi) nous avons essayé d'apporter des résultats expérimentaux qui puissent donner des indications pour répondre au comment.

7.1.3. Pourquoi s'intéresser à un mouvement complexe ?

L'avantage de faire un travail de thèse dans le domaine des Sciences du Sport nous permet d'être un peu au courant des événements sportifs et des performances dont sont capables certains athlètes. Ayant une certaine connaissance des Arts Martiaux, nous avons admiré l'extraordinaire adresse de certains maîtres dont les capacités hors du commun semblent impossibles à réaliser pour l'homme de la rue.

Pourtant ils sont aussi humains.

Comment font-ils les moines du Temple de Shaolin (*Shàolín Sì*) à se maintenir en l'air soutenus par la pointe métallique des lances de bois (Figure 49) ?

Comment peuvent-ils casser une épaisse barre de bois frappé fortement sur leur tête (et ne pas en avoir de conséquentes migraines, Figure 50) ?

Des actes spectaculaires qui permettent aux moines d'être connus internationalement par des exhibitions où ces genres d'actes physiques suscitent l'intérêt de spectateurs, avides de performances, mais qui n'ont la plus pâle idée de ce qui peut permettre celles-ci. La réponse réside dans une préparation physique longue et sévère et une toute aussi sévère préparation mentale. Voilà le secret de ces moines, le fruit d'années d'entrainement qui rend le corps[30] et le mental dans une parfaite et évidente unicité ; ce que, aujourd'hui en Occident, d'aucuns l'appellent *embodiment* ou *incarnation*.

[30] Les moines du Temple de Shaolin appellent les techniques qui leur permettent ces exploits « la chemise de fer » : une technique Qi Gong qui se base sur des connaissances plus que millénaires basée sur le Qi (prononcé tchi et traduit par énergie ou souffle vital), devenu Ki au Japon (d'où le mot Kiai connu par les fans de Karaté).

Evidemment il était impossible pour nous de se projeter sur de telles performances pour étudier l'influence de certains stimuli cognitifs sur l'action motrice du corps. Impossible car nous ne pouvions pas demander ces performances à des sujets qui n'étaient pas proprement entrainés mentalement, bien qu'en discrète forme physique. Mais nous savions, par la littérature, que la parole peut influer sur une action motrice simple (le mouvement du bras pour attraper un objet). Il a paru alors intéressant d'étudier l'effet de divers stimuli (cognitifs) sur une action motrice qui soit plus complexe que la préhension d'un objet et dont le mouvement est matière de choix par les études de biomécanique, le saut vertical accroupi ou *Squat Vertical Jump* (SVJ). Et il a paru encore plus intéressant de faire cela avec des sujets naifs, n'ayant pas une connaissance de la technique du SVJ, pas si aisée à apprendre à première vue.

7.1.4. Qu'entendons-nous par Stimuli Cognitif ?

Par cette expression nous entendons des perceptions ou des sensations qui nous permettent d'*agir* en conséquence. Evidemment le stimulus le plus connu, concernant le mouvement et la performance sportive, depuis presque 80 ans (Sackett, 1935 ; Perry, 1939), est ce qui est maintenant bien connu sous le nom d'*imagerie mentale* (IM). Ce nom a été supplanté en partie par celui de *simulation* (Paivio, 1971 ; Jeannerod, 2001) qui a malheureusement donné origine à beaucoup de confusion dans la littérature sur le sujet. Une mise au point intéressante a été récemment faite par Moulton et Kosslyn (2009) en introduisant le concept d'é*mulation* en statuant que « [Imagery] *is a specific type of simulation in which the mental processes that 'run' the simulation emulate those that would actually operate in the simulated scenario* ». Pour ces auteurs l'imagerie serait le processus mental qui est responsable de la simulation et qui *mimerait* les processus (d'exécution dans l'acte moteur) pendant le scénario simulé. Nous en arrivons à un terme, *emulation*[31] (en anglais), dont parlent Moulton et Kosslyn (2009) se rapportant à l'ancien terme de '*représentation'* (mentale). Ce dernier, selon certains auteurs (voir Berthoz, 2013), est devenu symboliquement ambigu en raison d'utilisations multiples et variées que ce mot s'est vu attribuer en philosophie et en psychologie.

[31] Le terme anglais '*emulation'* porte le sens d'imitation (Oxford Thesaurus of the English Language. Oxford : OUP, 2012).

Au cours de nos études, toutefois, nous avons utilisé la simulation du geste complexe dans sa simple et, peut-être, plus claire acception d'imagerie kinesthésique (IK), qui définit la sensation d'exécution d'un geste moteur (dans notre cas le SVJ) sans réellement l'accomplir. Ce terme 'IK' nous semble moins ambigu, aujourd'hui, que celui de simulation utilisé par certains auteurs à la place de représentation mentale (voir Barsalou, 2009 ; Berthoz, 2013) ou d'imagerie mentale (voir Kosslyn et Koenig, 1995). Ce dernier terme est d'ailleurs souvent confondu avec l'image 'visuelle' que l'individu peut se faire mentalement d'une situation ou d'un acte moteur, en fermant les yeux par exemple.

Hormis les verbes, d'action ou pas, et l'IK nous avons testé un autre stimulus qui n'aurait pas dû avoir, *a priori,* aucun effet sur le SVJ, le calcul mental. Les études qui ont été portées à ce sujet indiquent, lors d'études par IRM fonctionnelle, différentes activations cérébrales lorsqu'il s'agit de calculs exacts ou approximatifs (Dehaene, 1999). Il nous avait ainsi paru intéressant d'utiliser le calcul approximatif (la soustraction mentale de deux chiffres d'un nombre à trois chiffres) en raison d'activations détectées dans la région frontale postérieure (Dehaene, 1999 ; Burbaud et al, 1999, 2000) qui impliqueraient l'activation du cortex moteur. L'activation importante du cortex visuel occipital, du pariétal supérieur et inférieur, du préfrontal et encore d'autres aires corticales, semble toutefois indiquer un éveil cérébral général sans une spécificité particulière, encore plus particulièrement dans l'action motrice.

Les résultats nous ont contredits.

7.2. Evidences expérimentales

Dans cette partie nous affronterons la discussion exhaustive de nos résultats ainsi que de ceux auxquels nous avons participé et qui ont eu lieu en Algérie et au Liban et ont été obtenu par nos partenaires dans les pays respectives.

7.2.1. Effet des verbes

Au cours de nos expériences, divers verbes ont été choisis sur la base de leur fonction de sorte qu'ils peuvent être considérés comme appartenant à cinq familles

distinctes : 1. Verbes d'action (*saute*, *lèche*, *bouge* et *pince*), 2. Verbes à forte consonance émotive (*gagne* et *perds*), 3. Un verbe décrivant un état mental (*rêve*), 4. Verbes empêchant ou s'opposant au SVJ (*tombe*, *stoppe*) et enfin 5. Un verbe incompréhensible pour les locuteurs français, *tiào* (saute en chinois). Les verbes ont été prononcés à haute voix ou silencieusement, écoutés ou lus à la deuxième personne de l'impératif afin de représenter un ordre, une commande, interne ou externe et de comparer ces différentes manières de recevoir la commande. Les résultats démontrent qu'il n'y a pas de différence entre ces divers modes de stimulation (effet de groupe ; p = 0,88, F = 0,35. Obtenu par une ANOVA à un facteur). On a aussi, dans la mesure du possible, essayé d'utiliser des verbes d'action déjà employés en littérature (comme *lèche* et *pince*, par exemple, Hauk et al 2004) et tous étaient monosyllabiques, pour simplification. Des études, par ailleurs, ont montré que même des courtes phrases pouvaient augmenter la vitesse du mouvement de préhension de la main, pourvu que l'action représentée soit spécifique pour le mouvement (Scorolli et Borghi, 2007 ; Desai et al, 2010).

7.2.1.1. Effet de l'entraînement.

Au préalable nous avons voulu contrôler que la répétition de SVJs ne provoquait pas, au cours d'une séance expérimentale un effet d'entrainement en augmentant ainsi par ce biais la hauteur du saut. A cette fin dix sujets ont exécuté le protocole expérimental mais en absence de stimuli cognitifs et tout en respectant le *timing* expérimental. Les résultats montrent que, dans la durée de la manipulation, il n'y a pas un effet entrainement.

Toutefois, des résultats obtenus au Liban, et partiellement publiés (Rifai et al 2012), ont montré qu'au cours d'un entraînement de plusieurs semaines (deux entraînements/ semaine, pendant six semaines) la hauteur des Sauts de Base (SBs) de sept individus semble augmenter significativement (voir Figure 46)[32]. La forme de la

[32] Khaled F, Rifai A, Rabahi T, Fargier P, Massarelli R, en préparation. Un abstract a été présenté à la Société Française de Neurosciences 2013 (The visual obsevation of a complex movement improves its excecutions by an observer).

courbe par ailleurs suit un développement exponentiel typique des courbes d'entraînement et aussi de tout apprentissage (Wulf et Shea, 2002).

7.2.1.2. Verbes d'action.

L'effet de la prononciation à haute voix ou silencieuse, de l'écoute et de la lecture du verbe d'action *saute* (Expériences 2, 3 et 5 respectivement, voir le § 6.3) produit une augmentation d'environ 2.0 cm de la hauteur du saut, chez les sujets mâles de nos deux institutions (UFR STAPS de l'UCBL et ISOSTEO), et cela avec une remarquable régularité (voir Tableau 8, 9 et 11). Sur la base de ces expériences nous serions donc tentés de conclure que la spécificité montrée par certains auteurs (Hauk et al, 2004 ; Buccino et al, 2005 ; Pulvermüller et al, 2005b ; Aziz-Zadeh et al, 2006) sur l'exécution de gestes simples est confirmée pour ce qui est de la performance d'un geste complexe.

Toutefois nous avons utilisé d'autres types de verbes afin de mieux cerner cette spécificité qui semblait si évidente. Effectivement des verbes d'action non en relation directe avec le mouvement, comme *pince* et *lèche* ne donnent pas une augmentation statistiquement significative. Toutefois, une fois que *pince* est normalisé par rapport au saut de base (SB), on observe une augmentation de 0,9 cm, qui est significative (2p = 0.04, z-score = 2, 78 voir Figure 42). En Tableau 10 nous avons indiqué la non-significativité de *pince* non normalisé (29,9 ± 4,7 cm, comparé à 29 ± 3,8 cm pour le SB ; 2p = 0,13 ; z-score = 2,34). L'observation que nous faisons à la fin de nos expérimentations est qu'une augmentation de 1 cm peut être significative si on augmente le nombre de sujets (voir le § concernant les femmes). De plus afin de donner plus de confiance à nos données, nous avons utilisé la distribution gaussienne à 2p qui conforte considérablement le niveau de significativité. Le verbe *lèche* n'a pas donné de significativité même si, dans l'expérience 5 (Tableau 11), il a augmenté le saut de 0,8 cm, lorsqu'il a été écouté. Ces résultats marquaient le fait que des verbes d'action non spécifiques peuvent conduire à une augmentation statistiquement non-significative de la hauteur du saut, laissant ainsi paraître quelque chose de troublant, car nous n'observions pas d'effet nul ou inhibiteur sur le SVJ, mais, au contraire, une augmentation consistante de plusieurs millimètres. La même observation a été faite avec un verbe d'action générale, *bouge,* qui a augmenté, non significativement, le SVJ de

0,8 cm (voir Tableau 12). Nonobstant ces doutes, les résultats non significatifs de verbes non spécifiques et la significativité constante du verbe d'action spécifique, montraient qu'il restait toujours possible de justifier l'existence d'une spécificité du verbe *saute*.

Nous n'avons pas observé des différences significatives entre la prononciation à haute voix ou silencieuse ou la lecture ou l'écoute de ces verbes d'action. Il fallait en conclure que le *significat*[33] était plus important que le moyen perceptuel (l'image du saut donné par le verbe ; voir Bedny et al, 2008).

7.2.1.3. Verbe incompréhensible (nonsense).

Avant de poursuivre la recherche il était nécessaire de contrôler si la prononciation ou l'écoute d'un verbe monosyllabique, non compréhensible pour les sujets donnait une valeur, sur la hauteur, inférieure ou tout du moins égale à celle des SBs. Le choix est tombé sur le verbe *tiào* (*saute* en langue chinoise), monosyllabique ayant le même significat. Comme on pouvait s'y attendre, aucun effet significatif n'a été remarqué sur la hauteur des SVJs. Cela nous ramène au § précédent et à la dernière phrase de celui-ci sur l'importance du significat des mots dans l'effet qu'ils ont sur l'action.

7.2.1.4. Verbes à fort contenu émotif.

Dans le domaine du Sport l'influence des émotions et des sentiments sur la pratique physique est très bien connue par quiconque ait participé à des compétitions sportives ou s'adonne simplement au *jogging* pour son propre bien-être. D'ailleurs il s'agit d'un phénomène universellement ressenti, ne concernant pas seulement l'action motrice (qui ne l'a pas expérimenté lors d'un examen ?). En effet l'émotion, ou les sentiments qui en découlent (Damasio, 2005), bloquent l'action motrice ou intellectuelle ou à l'opposé ils peuvent la favoriser lorsque les sentiments positifs dominent. Dans nos expériences les verbes *gagne* augmente la hauteur du saut tout autant que *saute*, mais ce qui a été étonnant de constater est que le verbe *perds*, pourtant doté d'un fond fortement négatif, augmente le SVJ autant que *gagne* et *saute* (un peu moins, mais la différence est significative).

[33] Ce qui correspond au « *signifiant* » de Saussure. (1913)1995. *Cours de linguistique générale*. Peris : Payot,

Nous n'avons pas d'explication pour cette donnée qui aurait dû démontrer une diminution du SVJ ou du moins une non-significativité statistique, en réponse à l'influence certaine d'une forte émotivité. A moins que les sujets aient ressenti la nécessité de contrecarrer la commande et, au contraire, de faire mieux que les SBs, en raison de la commande imposée de sauter le plus haut possible obtenue pendant l'échauffement, au début de l'expérimentation (voir § 7.2.1.7.).

7.2.1.5. Verbe décrivant un état mental.

Afin de poursuivre la recherche de la spécificité ou la non-spécificité des verbes d'action nous avons testé l'effet du verbe *rêve*. La nature particulière de ce mot nous faisait croire à un résultat semblable à celui de *tiào* et on aurait aimé pouvoir utiliser aussi le verbe *cauchemarde* comme antonyme (à la deuxième personne de l'impératif), mais étant ce mot pluri-syllabique et ne trouvant pas de synonymes appropriés, en langue française, nous nous sommes limités à *rêve*. Une augmentation non significative, de 0,6 cm, a toutefois été mesurée (Tableau 12), confirmant en cela ce que nous avions déjà observé avec *pince* et *lèche*. Un résultat qui nous a imposé plus de cautèle dans nos prévisions futures et conclusions temporaires, car elle rappelle l'effet obtenu avec *perds* (même si cette fois-ci il n'y a pas eu de significativité). En effet le verbe *rêve* n'étant pas émotionnellement négatif il est fort probable qu'on puisse comparer son effet à celui de *gagne* et en donnant aux sujets une émotion positive qui soutient l'effet de l'ordre initial de sauter le plus haut possible. En d'autres termes il n'est pas exclu que l'on puisse douter de la nécessité d'une spécificité d'un verbe envers l'action motrice prévue. Le résultat obtenu avec *rêve* confirme toutefois la suggestion que l'émotion a une influence positive sur les actions motrices (Coombes et al, 2008, Green et al, 2013), comme d'ailleurs cela est si bien connu dans la pratique sportive.

7.2.1.6. Verbes s'opposant ou empêchant l'action.

Une dernière tentative, dans cette série d'expériences, a porté sur l'usage des verbes *stoppe* et *tombe* qui auraient dû nous apporter, selon nos prévisions, une réduction dans la hauteur des SVJ. Contrairement à ce qui était attendu, les résultats encore une fois ont donné une valeur identique à celle des Sauts de Base (SBs), pour les

deux verbes. De plus cette expérience, conduite aussi dans le but de contrôler si l'effet de la parole était reproductible dans un autre laboratoire (le laboratoire AZM de l'Ecole Doctorale de l'Université Libanaise à Tripoli, Liban)[34] et avec d'autres sujets (tous étudiants en physiothérapie de l'Université Libanaise, d'âge et de valeurs anthropométriques comparables aux sujets français) [35].

7.2.1.7. Conclusion concernant l'effet des verbes.

La première interrogation que nous nous sommes posés concernait l'apparent maintien de la hauteur des sauts au niveau des SBs lorsque des verbes contredisant l'action étaient écoutés. Pourquoi en sommes les verbes *stoppe* et *tombe* ne provoquaient pas de diminution de la hauteur comme on aurait dû s'y attendre ? La réponse est venue des commentaires des sujets mêmes qui ont participé à l'expérimentation.

Au tout début de chaque expérience lors des instructions qui sont données aux sujets, on leur demande de se chauffer les muscles pendant quelque minute par des étirements et plusieurs SVJ. Ces derniers sont exécutés après consigne verbale explicite, de la part de l'expérimentateur, d'exécuter des sauts maximaux, afin d'éviter des variations aléatoires dans la hauteur des SVJ qui pourraient confondre l'effet réel des stimuli cognitifs par des variations indues. Les sujets en somme affirment avoir toujours fourni un effort maximum, comme ils l'ont confié eux-mêmes à la fin de la manipulation. En somme, ils ne faisaient cas du sens des verbes, car la consigne était de sauter au maximum de l'effort.

Il est donc forcé de conclure que les effets sur la performance de l'action motrice, observés suite aux verbes d'action (*saute*) sont évidemment réels et même s'ils apparaissent à la limite de la significativité, sont provoqués spécifiquement par la parole. Il faut aussi considérer que, dans le souci d'obtenir des valeurs statistiques probant la validité des mesures, nous avons analysé une probabilité *two-tails* (2p, résultant d'une

[34] La recherche est conduite par Madame Fatima KHALED et Monsieur Mazen KABBARA sous la co-direction de Monsieur Ahmad RIFAI, Chef Département de physiothérapie de l'Université Libanaise, Haddath – Beyrouth, Liban (Voir l'abstract SFN n° P2-181).

[35] Par ailleurs la reproductibilité de nos résultats, *i.e.* : l'effet de verbes sur l'action complexe a, par la suite, été confirmé par d'autres expérimentations conduites à Alger (Voir l'abstract SFN n° P3-185).

analyse qui tient compte de 2σ de la courbe gaussienne). Ceci a été notre choix, qui a empêché probablement d'observer des significativités 'limites'. Ainsi, avec un *single-tail* p, la plupart des verbes utilisés risquerait probablement de joindre la significativité aux 95% et peut être moins. Mais, comme déjà dit, le 2p était notre choix.

Pourquoi certains verbes de non-action (*gagne*, par exemple) ont-ils un effet sur la performance du SVJ ? Quel sportif ne sait pas que l'*émotion* joue énormément dans la performance ? *Gagne*, dans ce sens, est un exemple éclatant de la puissance de l'émotion dans la performance des SVJ et de même en ce qui concerne l'effet de *perds*, déroutant à première vue, mais qui peut aisément s'expliquer par la consigne donnée aux participants, au début de l'épreuve, de sauter toujours au maximum. L'intervention du système moteur dans l'émotion a été par ailleurs déjà mentionnée par d'autres auteurs : une étude TMS de Hajcak et al (2007) a montré: "…*that MEP amplitude varied as a function of emotional stimuli: When participants viewed pleasant and unpleasant pictures, MEP amplitudes following TMS pulses* [directed in cortical hand areas] *were larger* [in the *abductor pollicis brevis* muscle] *than when participants viewed neutral pictures*." Aux dires des auteurs celle-ci a été la première étude montrant les effets de processus émotifs directement sur la mesure de l'excitabilité corticale et confirme le résultat que nous avons obtenu au cours de nos études avec des verbes ayant une charge émotionnelle. Ceci est d'autant plus conforté par de récents résultats IRMf lorsque la lecture de verbes à fort attribut émotif a impliqué les aires sensorimotrices en plus des régions limbiques (Moseley et al, 2012).

7.2.2. Effets d'autres stimuli cognitifs

La simulation mentale est un vieux sujet d'expérience qui a été traité, par certains d'entre nous, dans le passé (Roth et al 1996 ; Gemignani et al 2004) et plus récemment par d'autres collègues au sein du CRIS (Guillot et al, 2009 ; Collet et al, 2011). C'était ainsi normal que nous utilisions l'imagerie kinesthésique (IK) comme stimulus cognitif, comme quasi-contrôle, car son action sur la performance était connue depuis longtemps (Perry, 1939 ; Sackett, 1935 ; voir Lotz, 2006).

Il nous semble nécessaire, ici, de faire une précision sur la terminologie qui est employée aujourd'hui pour présenter l'*imagerie mentale* (voir aussi Guillot et Collet, 2010). Aujourd'hui par le terme 'simulation' on entend ce qui autrefois on appelait : la *représentation mentale*. Ce terme, largement utilisé par philosophes et scientifiques, a créé des incompréhensions qui ont ultérieurement creusé l'abîme qui existe entre les deux disciplines et aujourd'hui on lui préfère, en neurosciences, le terme de simulation (Berthoz, 2013). En effet, Berthoz (2013, 146-147) tient à souligner que : « *La perception n'est pas une représentation : c'est une action* ***simulée*** *et projetée sur le monde »*, par cela il entend définir que le terme simulation comporte de la part de l'individu une action ou un objet ou un être vivant, mnémoniquement stockés dans l'hippocampe et projeté vers le monde même les yeux fermés. A preuve il suggère que les peintures de Lascaux, peintes avec des torches et donc avec bien peu de lumière, ont une telle force de mouvement, car les artistes avaient les images des animaux stockées dans leur mémoire et, en peignant dans la semi-obscurité, ils ne faisaient qu'appliquer sur la roche leur souvenir, en suivant et en exploitant les aspérités (et les ombres) que la roche même présentait naturellement. Cette simulation correspondrait alors à la mémoire des objets ou des actions. Mais est-elle une représentation mentale ?

Jeannerod (2001) a utilisé le terme simulation pour signifier la répétition mentale d'un geste sans l'exécuter, c'est ce que nous appelons aujourd'hui l'IK. Toutefois, à notre avis, l'IK ne correspond plus à une simulation, mais il se rapproche plutôt à un rappel *proprioceptif* du mouvement. En effet, le terme d'imagerie kinesthésique rend compte d'une caractéristique de l'organisme dont on ne parle que très peu, les sensations, alors que les articles cités se concentrent essentiellement sur les perceptions et les représentations mentales. Pourtant la *proprioception* est tout aussi essentielle (autant, sinon plus, que les perceptions) pour la relation de l'individu avec son corps *et son monde*. C'est grâce aux sensations produites par la proprioception de l'individu qu'il peut savoir comment son corps est orienté dans l'espace et dans le temps, si on se réfère par exemple aux sensations de fatigue et de faim, sans quoi un mental non-incarné n'aurait pas de sens.

En soutient à la définition de l'IK avec le rappel proprioceptif du mouvement, on peut rappeler que le terme *kinesthésie*, plus particulièrement, représente la proprioception des mouvements. L'Imagerie Kinesthésique rend compte de cela en rendant le rappel mnémonique de la proprioception lors d'un mouvement, ici le SVJ. D'ailleurs d'autres auteurs ont utilisé l'IK pour des études de physiothérapie clinique (Kim et al, 2011 ; Cowley et al, 2008) et nous-même l'avons aussi utilisé, dans la tentative d'améliorer le mal au dos non spécifique (*low back pain*)[36].

Dans le cadre de cette discussion, les résultats de l'expérience 2 ont montré que l'IK, comme attendu, provoquait une amélioration sensible de la hauteur des SVJ (voir Tableau 8). En d'autres termes, *la sensation de son propre corps en mouvement est suffisante pour améliorer l'exécution de la performance du même mouvement*. Ce que nous avons esquissé plus haut au sujet de la localisation centrale des aires sensorimotrices se confirme dans la tentative d'expliquer ces résultats. L'activation du cortex sensitif par l'input de sensations ressenties à la périphérie du corps, peut agir sur le cortex moteur primaire en facilitant son action dès que la décision volontaire de sauter activera le cortex M1.

A ce point de nos recherches nous savions que la parole, sous forme de verbes d'action spécifique, et la sensation du mouvement imagé (IK) pouvaient améliorer la performance motrice. En d'autres termes, nos résultats ont montré une spécificité indiquant que, séparément, un *stimulus cognitif*, un *stimulus émotif* ou un *stimulus sensitif* amélioraient la performance d'une action motrice complexe, d'une manière spécifique ou pas. Il nous a semblé intéressant de poursuivre les études sur le contrôle de cette spécificité et la manière de s'y approcher a été par le biais d'une capacité humaine tout aussi particulière que le langage, le calcul arithmétique. La plupart des humains calcule grâce à la parole et cela dans la langue maternelle ou, en tout état de cause, dans la langue au moyen par lequel on a appris à calculer. Ainsi, même après des années de vie dans un pays parlant une langue différente de la maternelle, il reste

[36] Rifai A, Rabahi T, Fargier P, Massarelli R. Kinesthetic imagery and visual observation ameliorate lumbosacral sense of position in individuals with common low back pain. Soumis pour publication.

difficile de calculer dans la langue qui a été apprise, surtout si bien après la puberté. Une sorte d'*imprinting* semble de sorte s'établir dans la capacité d'exécuter un calcul.

Nos résultats montrent que le calcul améliore le SVJ. Plusieurs explications peuvent être avancées et la première concerne les résultats, en provenance de plusieurs laboratoires, montrant que le calcul simple (les quatre opérations arithmétiques) active le cortex moteur primaire (Burbaud et al, 1999, 2000 ; Dehane, 1999 ; Tschentscher et al, 2012). Ces études par IRM fonctionnelle montrent l'apparition de tâches d'activation fonctionnelle au niveau de nombreuses aires occipitales (visuelles), pariétales (aires d'associations verbale, auditive et visuelle), frontales postérieures (pré-motrice et motrice primaire) et frontales ventrales (langage). Nonobstant sa bonne résolution spatiale (de l'ordre du mm) l'IRMf toutefois ne distingue pas de manière précise la localisation des activations à moins d'utiliser des machines à haut champ (entre 2 et 4 Tesla) et un post traitement qui aplanit la géométrie cérébrale en permettant la planification bidimensionnelle des sillons et des circonvolutions (voir par exemple : Postle et al 2008 ; Fernandino et Iacoboni, 2010). En d'autres termes, le point que nous voulons souligner précise qu'il est impossible sur la base des documents cités plus haut (Burbaud et al, 1999, 2000 ; Dehane, 1999 ; Tschentscher et al, 2012) d'établir, en particulier, si les activations mesurées lors de calculs mentaux soient attribuables au cortex M1 ou S1. Souvent, en effet, les activations semblent se situer autour du sillon central (ou de Rolando) qui sépare ces deux aires. Par contre il est tout à fait possible de se rendre compte (c'est une expérience que tout le monde peut faire) que le calcul mental produit la vision (ou l'image) mentale de chiffres (souvent en mouvement), mais aussi l'énonciation silencieuse de chiffres. Il pourrait alors être tout à fait possible que l'activation de toutes ces aires cérébrales (celles de la vision, l'audition, le langage, les sensorimotrices, etc) permette une amélioration non-spécifique du SVJ. Ceci impliquerait, par ailleurs et en conclusion, que, suite à la stimulation cognitive, l'activation généralisée de plusieurs aires du cortex cérébral (ou son éveil) peut améliorer la performance motrice

7.2.3. Différence entre Hommes et Femmes

Les résultats (Rabahi et al 2012) que nous avons observés concernant les femmes nous ont paru, à premier abord, bien surprenant car il était difficile de trouver des effets des stimuli cognitifs, statistiquement significatifs, jusqu'au moment où l'usage de verbes d'action non spécifique pour SVJ nous a donné le soupçon qu'un effet statistiquement significatif, pouvait être possible en augmentant simplement la taille de cohortes. Tel en effet a été le cas et, comme montré en Tableau 3 (du chapitre 6 des résultats), le verbe d'action saute (prononcé à haute voix ou silencieusement) et la soustraction mentale donnent des améliorations significatives des hauteurs des sauts, notamment après normalisation, bien qu'inférieures par rapport à celles observées chez les sujets masculins (0,8-1,0 cm par rapport aux 2,0 normalement observés chez les hommes ; voir Tableau 8, du même chapitre). Par contre aucune significativité n'a été remarquée après l'IK. L'effet obtenu nous a fortement convaincu de ne pas poursuivre avec ces sujets, surtout parce que, à premier abord, nous ne comprenions pourquoi il n'y avait pas la moindre amélioration par rapport aux hommes.

Plusieurs raisons ont toutefois été invoquées pour expliquer le manque d'efficacité des stimuli cognitifs chez les femmes, allant d'éventuelles différences psychologiques ou physiologiques ou éducative (bien plus probables) (Rabahi et al 2012 ; pour une revue sur les non-différences entre homme et femmes, voir Eliot, 2010). Les expériences sur les femmes ont été par la suite poursuivies à l'Institut d'Education Physique et Sportive de l'Université d'Alger 3 où on a visé une population spécifique, les athlètes de haut niveau (basketteuses et volleyeuses de niveau national et international), en pensant que les qualités physiques de ces athlètes pouvaient faire transparaitre une meilleure efficacité des stimuli cognitifs. Des résultats préliminaires obtenus au Liban avaient en effet montré que si le verbe d'action *saute* était prononcé en Arabe local (*notte*) l'amélioration de la hauteur du SVJ s'améliorait considérablement chez les hommes au-delà des 3cm (résultats non encore publiés). L'expérience conduite à Alger a poursuivi l'étude libanaise en utilisant la variété des dialectes algériens. On a demandé aux athlètes de répéter le verbe d'action *saute* en français, arabe classique (*ikfaze*), anglais (*jump*) et dans le dialecte natif de chaque athlète (essentiellement *soté* en algérois*, enteg*, *djelleb,* en Kabyle, et *soté, negueze* pour les sujets natifs des haut plateaux ou du sud). Les résultats montrés en Tableaux 5 et 6 nous ont apporté des surprises, déjà dans

la comparaison entre basketteuses et volleyeuses, car les premières ont présenté un effet statistiquement significatif avec le français, l'anglais et le dialecte mais pas avec l'arabe classique (Tableau 5A). Les volleyeuses par contre n'ont montré aucun effet significatif (Tableau 5B). De toute manière, même chez les basketteuses, les effets n'ont pas dépassé le 1,0 cm, confirmant ainsi le résultat obtenu à Lyon, d'autant plus que, comme le montre le Tableau 6, des étudiantes de l'Ecole Nationale Supérieure du Sport (Dély-Ibrahim, Alger, considérées comme des sujets en bonne condition physiques, mais naïves pour ce qui concerne le SVJ) n'ont montré aucun effet suite à la prononciation des verbes d'action, excepté après *saute*.

7.2.3.1. Pourquoi de telles différences ?

Nous pensons que, dans ces expériences algériennes menées sur les femmes, la raison de ces effets est effectivement d'ordre psychologique. Sur la base d'interviews réalisées post-expériences, ces effets peuvent s'expliquer sur la base des raisons suivantes :

a. Les athlètes, notamment les basketteuses sont entrainées par des coaches anglo-saxons ou éduqués dans des pays anglo-saxons et, en conséquence ont plus l'habitude de réagir surtout au verbe anglais *jump* et jamais au terme *iqfaze*, arabe classique (que tout le monde apprend à l'école, mais qu'on utilise jamais dans la vie de tous les jours) ;
b. La prononciation a créé chez les sujets féminins des crises d'hilarité lorsque elles ont dû prononcer les verbes en arabe ou en dialecte, en raison de la non-utilisation de ces termes dans leur vie d'adulte ;
c. Les volleyeuses ont montré bien moins d'*attention* aux tests en comparaison aux basketteuses.

L'ensemble de ces données nous a toutefois donné des raisons suffisantes pour concentrer notre attention exclusivement sur les sujets masculins.

Chapitre 8. CONCLUSIONS (TEMPORAIRES)[37]

L'objectif de notre étude était au départ de comprendre si la parole pouvait améliorer la performance d'une action motrice complexe telle le *squat vertical jump* (SVJ). Nous savions de la littérature la possibilité d'une amélioration de gestes manuels ou de mouvement de bras (généralement des gestes de prise d'objets, comme des cylindres par exemple ; Fargier et al, 2012 ; Nazir et al, 2008 : Boulenger et al, 2006) et des résultats d'IRM fonctionnelle avaient même suggéré une spécificité de sens, *i.e.* : la lecture de verbes spécifiant l'action, comme *Kick, Pick* et *Lick*, pouvaient révéler une activation non seulement de la région frontale inféro-antérieure (une des régions de traitement de la parole) mais activer même les régions du ruban moteur primaire (M1 ou AB4) spécifiques, respectivement pour le mouvement des pieds, de la main et de la langue (Hauk et al 2004 ; Kemmerer et al, 2008). L'importante littérature parue sur le sujet mentionnait d'ailleurs une apparente spécificité de verbes, de substantif et même de petites phrases envers une action motrice déterminée (Buccino et al, 2005 ; Pulvermüller et al, 2005 ; Aziz-Zadeh et al, 2006 ; Scorolli et Borghi, 2007 ; Sato et al, 2008). La cause semblait entendue lorsque l'on se demanda quelle était la cause de l'amélioration et, notamment, s'agissait-il d'une *simulation* que les mots cachaient (terme préféré à la place de l'ancienne *représentation mentale*) ou d'une *image mentale* ou d'une *émulation* ou d'une *mimésis* ou d'un *concept* ? Et quelle était le rôle des perceptions et des sensations ?

Deux courants sont actuellement prioritaires dans la tentative de donner une réponse à ces questions, qui sont nés sous les termes d'*incarnation* et de *désincarnation.* Nous avons déjà présenté le premier (que certains auteurs français présentent sous le terme d'*incarnation* ; Varela, 1993 ; Venazio, 2009) qui représente l'unité du corps et du mental d'après l'œuvre de nombreux neuroscientifiques qui, sur la base de résultats expérimentaux, ont clos (pour le moment) un débat qui a fait réfléchir et débattre philosophes et scientifiques depuis l'Antiquité. Compte tenu de l'importance théorique qu'assument aujourd'hui les concepts d'*incarnation* et d'*inorbation*, nous essayerons de

[37] Scientifiquement parlant.

résumer brièvement les raisons de ce débat. La première chose à éclaircir dans le *Problème du Corps et de l'Esprit*, comme il a été appelé à la suite de Descartes et Spinoza, était le sens et l'interprétation que l'on peut donner au terme *esprit*. Platon d'Athènes utilisait de préférence le mot *psyché* (= souffle) qui se rapporte plus au terme que l'on a utilisé plus tard dans le sens d'*âme*, alors que son élève, Aristote de Stagire, utilisait dans ses écrits celui de *nous* (le substantif de mental, qui n'a pas lieu dans la langue française, probablement parce que la prononciation de *ment*, en similitude au latin *mens*, le rapprocherait à un autre verbe d'origine latine, *mentire*)[38].

Ce n'est que depuis la fin des années 1980 que, grâce aux neurosciences, le mental est enfin rentré dans le corps (Varela, 1989). Pourtant ce n'est pas seulement cette unicité qui est en jeu, mais aussi celle de l'interaction du corps-mental avec le monde qui l'entoure (Gallese et Lakoff, 2005 ; Mahon et Caramazza, 2008). Un rapport continu et constamment changeant, fait de perceptions, de sensations et, par force, d'émotions et de sentiments (Gallese et al, 2004). Cet ensemble de caractéristiques physiologiques sont à la base de notre étude en y ajoutant encore un élément, l'action. Comme le dit Damasio (2005, p 89) : « *Au commencement était l'émotion, mais au commencement de l'émotion était l'action »* une affirmation qui est soutenue par bien d'autres penseurs[39], mais ici c'est un neurologue qui l'affirme en donnant ainsi un appui expérimental à un concept, l'action motrice, qui est un fait et qui identifie non seulement l'être humain, mais tout être vivant. *Comment donc peut-on améliorer l'action et, plus particulièrement, sa performance avec la parole ?* Le projet que nous nous étions fixé était ambitieux certainement, mais les résultats expérimentaux, avec leur lot de surprises, nous ont montré que tel pouvait être le cas et que plusieurs stimuli cognitifs

[38] De notre point de vue le terme mental (avec les caractéristiques ou *fonctions supérieures* que nous lui connaissons, telles qu'elles sont exprimées par la conscience) est ainsi lié au corps. Par contre, en aucun cas, cela ne nous empêche de considérer l'*esprit* de tout autre point de vue philosophique et religieux. Cette dernière nature que nous lui attribuons sort évidemment des limites scientifiques.

[39] Voir par exemple l'aphorisme *« Agir c'est tout »* de Friedrich Nietzsche, (Contribution à la généalogie de la morale, 1887. Traduction, Notes et Introduction « De la philologie à la généalogie » par Angèle Kremer-Marietti, Paris, L'Harmattan, 2006, XIII, p. 151) ou même le « *Un secret sentiment/ s'émeut en moi, m'avertit de poursuivre,/et j'écris –de l'Esprit m'en vient l'intuition- : 'Dans le Commencement existait l'Action'*. Johan Wolfgang Goethe. Faust (1ère partie, le cabinet d'études). Paris : GF Flammarion, p 63 (Merci à RM)

pouvaient intervenir dans ce processus en démontrant qu'il s'agit d'un phénomène très complexe. Comme tous ceux qui distinguent le cerveau, par ailleurs.

A preuve de cette complexité, il est difficile d'affirmer, à l'état actuel des expériences et par exemple, l'existence d'une spécificité des verbes d'action. Le verbe *saute* donne les meilleurs résultats chez les sujets masculins (une augmentation de 2 cm, 6,8% sur 104 sujets ; Tableau 14 des résultats), mais on ne peut pas ignorer l'effet du calcul simple (la soustraction mentale) qui n'a rien à voir avec l'action motrice (+ 1,2 cm, 4,4% sur 28 sujets ; Tableau 14). Nous expliquons ce résultat par les activations que le calcul semble provoquer au niveau des aires motrices (Hanakawa et al, 2003 ; Rong et al, 2011 ; Tschentscher et al, 2012), mais est-ce la seule explication ? Au vu de la technique employée dans ces expériences (l'IRM fonctionnelle) les activations auraient pu tout aussi bien être l'effet du calcul sur le S1 (cortex sensitif primaire), une région qui est la principale responsable des sensations et, en partie, des émotions et des sentiments (notamment avec la participation de l'insula, du cortex cingulaire antérieur, et du cortex S2 ; Damasio 2005, p. 121). Mais des interactions avec le M1 peuvent tout aussi provenir des aires frontales du langage ou des aires visuelles ou des aires associatives pariétales (comme l'aire de Wernicke), car des activations IRMf ont aussi été observées dans ces régions (Cowell et al, 2000 ; Menon et al, 2000 ; voir pour une revue Dehaene, 2011).

Les autres verbes qui ont été utilisés au cours de ces expériences nous montrent aussi de possibles relations avec les **émotions** (dans le cas des verbes gagne et perds). Les entraineurs sportifs et les athlètes eux-mêmes le savent bien, émotions et sentiments peuvent forcer l'individu à des sommets, tout comme ils peuvent détruire tout espoir de performance. L'équilibre des émotions est un atout important dans toute performance physique et cela est particulièrement observé dans le cas où un athlète arrive à éliminer les émotions. Certains sportifs, et pas des moindres[40], racontent avoir été les protagonistes d'un état mental surprenant au cours duquel les émotions disparaissent soudainement et complètement. Certains auteurs comme Csíkszentmihályi (1996) ont défini cet état le *flow,* Ripoll l'a appelé l'*état de grâce*, alors que la presse et les athlètes américains ont pris l'habitude de l'appeler la *zone*. Au cours de quelques

[40] Voir les mémoires de Pelé (MA VIE, Les mémoires du roi Pelé, 2006, Flammarion).

expériences conduites sur le sujet, nous l'avons appelé le *no-think* pour indiquer que non seulement les émotions disparaissent, mais qu'en plus les individus qui rentrent dans cet état mental ne *pensent pas*. Il s'agit, probablement, du même état qui permet aux moines de Shaolin les incroyables performances dont nous faisions état au début de la discussion et, comme pour ces moines, il existe un préalable indispensable pour rejoindre cet état, l'entraînement. On ne peut pas connaitre ce moment de la vie mentale si on n'a pas été soumis à des entrainements longs, rigoureux et sévères.

Nous avons abordé ce sujet dans une étude (Massarelli et al, 2012) où nous avons interviewé des athlètes qui avaient expérimenté cet état, s'agissant de boxeurs de niveau national avec une certaine expérience dans le domaine (plusieurs combats à leur actif). Leurs dires ont par la suite été traités avec un logiciel d'analyse du langage (*PROSPERO*). Les résultats ont indiqué un état mental où le stress et l'anxiété de l'individu augmentent considérablement au cours de l'entrainement (surtout lors du dernier mois avant la rencontre de boxe), jusqu'au moment où le combat commence et, plus particulièrement sur le ring à l'instant où le boxeur entend le son du gong. Rien ne reste alors des émotions ressenties, les pensées disparaissent, le boxeur sait qu'il doit combattre et il laisse au corps le soin de s'en occuper. En d'autres termes on a l'impression que les parades et les coups sont portés par son propre corps, mais que l'on en est presque spectateur. Ce qui confirme les résultats et les hypothèses de Libet (1999, 2006) lorsqu'il a démontré (chez des patients au cours d'opérations chirurgicales) que les mouvements peuvent démarrer avant que l'individu en ait pris conscience (en moyenne 250 ms avant pleine conscience). Les perceptions des boxeurs sont bien alertes, ils savent qu'ils doivent se battre contre l'adversaire, mais il n'y a pas de haine ni de peur (les boxeurs affirment ne jamais avoir de peur physique « *On a tellement pris des coups*…. », « *je ne lui veux pas de mal*… »).

Nous avons essayé de mesurer l'effet de cet état préalable à un SVJ sur la hauteur du saut. Huit de ces boxeurs ont essayé de se mettre dans un état de *no-think* et d'exécuter à la suite un SVJ. Les résultats n'ont pas été concluants compte tenu du petit nombre de sujets (Massarelli et al, 2012), mais ils ont laissé l'espoir qu'en augmentant le nombre de la cohorte un résultat statistiquement significatif puisse paraître. Pourquoi

nous insistons sur le terme entraînement lorsqu'on parle de *no-think* ? Il s'agit d'une observation empirique, mais non seulement car on sait (voir les revues de Rolls 1996, 2013) qu'une région des noyaux de la base, l'hippocampe, a une importance remarquable dans l'enregistrement des mouvements et donc dans la mémoire des gestes appris. Il est alors suggestif de penser que la mémoire des mouvements appris et stockés dans l'hippocampe puisse intervenir dans l'action motrice en un temps qui défie la vitesse physiologique du potentiel d'action et qui réalise l'action motrice de manière préconsciente.

Revenons aux émotions. Leur présence, tout comme leur absence, peut influencer la performance, comme cela a aussi été confirmé par d'autres recherches (Coombes et al, 2008, Green et al, 2013). Mais les émotions ou leur absence ne sont pas le seul moteur de la performance. Nous avons ainsi vu comment les consignes données au début des expériences influençaient les résultats, car même si les verbes prononcés étaient en contradiction avec l'action, comme dans le cas de *tombe*, *stoppe* ou même *tiào*, l'effet ne pouvait pas *diminuer* la hauteur du SVJ. La consigne de sauter au maximum de ses capacités restait bien implantée dans l'**intention** des sujets. De plus une certaine compétition s'établissait entre les sujets qui, contrairement aux instructions données au début de l'étude, cherchaient à se comparer aux autres en essayant de sauter le plus haut. Dans ces conditions il est bien compréhensible que des mots indiquant une action contraire au saut puissent ne pas produire une diminution de la hauteur. De plus cela montre que l'effet statistique sur la performance peut agir au-delà de la pure force ou puissance musculaire (car les sujets sautaient déjà au maximum de leur performance). Que peut-elle être cette composante ? Des études futures nous donnerons un possible aperçu.

Autre l'intention, une autre caractéristique psychologique doit aussi entrer en jeu, l'*attention* que l'individu porte à l'exécution du SVJ. Les effets que nous avons observés indiquent l'importance de *l'émotion,* de *l'intention* et de *l'attention* de l'individu qui peut être améliorée par la parole ou autres stimuli. Ces états psychologiques demandent la mise en route de circuits neuronaux très complexes et, en conséquence, de diverses aires cérébrales qui interagissent entre elles pour affiner une réponse motrice. Car il ne

faut pas négliger que l'action peut être influencée par de nombreuses sources comme les perceptions, les sensations, les émotions, les sentiments bien avant la pensée. Une bonne partie de ces effecteurs sont inconscients. Prenons par exemple la perte d'équilibre, qui est immédiatement compensée par le système vestibulaire. Celui-ci est en relation avec le cervelet et avec les nécessaires intégrations qui s'accomplissent au niveau du système sensorimoteur. Une ombre soudaine nous fait lever les épaules dans un geste de défense, car elle peut représenter un danger, le cortex visuel doit ainsi être en relation directe avec le système sensorimoteur pour assurer le geste. Tout cela produit des activations dans les circuits des noyaux de la base créant ainsi des émotions (peur) qui peuvent influencer la fonction du lobe frontal et retarder la réaction de l'individu.

Des études en cours à Beyrouth, Tripoli et Alger montrent que le SVJ peut être amélioré par l'observation visuelle de sujets qui accomplissent le même mouvement (Rifai Serraj et al, 2012). Ces résultats font entrer en jeu, probablement, les neurones responsables de la reconnaissance du mouvement, ces neurones sensorimoteurs que l'on a nommé *neurones miroirs* et qui semblent intervenir dans nombreuses activités fonctionnelles du cerveau (Rizzolatti et Sinigaglia, 2011).

Une autre étude, déjà mentionnée, menée à Beyrouth (Rifai et al, soumis pour publication) et portant sur des patients souffrant de mal de dos (*low back pain*), a montré que l'on peut améliorer la capacité de redressement de la colonne vertébrale par l'observation visuelle, mais encore mieux par imagerie kinesthésique (IK). Ceci indique que la sensation du mouvement peut améliorer la pathologie, mieux que la perception représentée dans ce cas de figure par l'observation visuelle d'un sujet qui se redresse.

Ainsi, l'émotion, l'intention, l'attention, mais aussi le *no-think* (en qualité d'éveil des perceptions) et les sensations (la proprioception et le système vestibulaire que nous savons être intégrés dans le cortex pariétal postérieur, y inclus certaines particularités de la vision, voir : Graziano et Gross, 1994a et 1994b ; Berthoz, 2013, pp. 117-119) sont tous des éléments qui peuvent avoir un effet sur la performance de mouvements complexes.

Portons notre attention maintenant sur les résultats obtenus avec la soustraction mentale. Il nous semble que cette activité cérébrale, même si simple comme une soustraction nécessite la participation des 'fonctions supérieures' renvoyant à la pensée. Et voici, en contradiction apparente avec ce que nous avons présenté jusqu'ici, la venue des '*concepts*'. La pensée peut en effet participer à la performance car c'est par la réflexion qu'on améliore le geste de manière kinesthésique et c'est par la mémoire (autre 'fonction supérieure') qu'on peut le stocker. Chaque geste, chaque suite de gestes nécessaire pour une performance sont stockés et peuvent être rappelés au besoin, *sans que la conscience le demande*. Un effet pour lequel il suffit un *état de riposte inconscient*. C'est ainsi que l'on peut expliquer comment un boxeur peut parer un coup porté par l'adversaire et en même temps répondre avec un coup porté par attaque. Souvent ce boxeur ne sait même pas qu'il a réagi, il n'en a pas le temps car il faut 250 ms depuis le début de la réponse pour être conscient d'avoir réagi (Libet, 2006).

8.1. Comment définir un *état de riposte* ?

On essayera d'avancer une hypothèse. Admettons qu'un signal parvenant à la vision d'un boxeur A (ou à d'autres sens de celui-ci), par exemple un geste de l'épaule de son adversaire ou un changement de posture qui lui indique l'intention du boxeur B de donner un coup de droite. Cette perception une fois détectée, inconsciemment, par le boxeur A (le geste ou la variation de posture du B est inscrit dans la mémoire du boxeur A, dans son hippocampe, comme indiquant un très probable danger), suscite une réponse qui suit immédiatement la reconnaissance perceptive du danger. Le boxeur A sera ainsi capable de réagir par une parade suivie par un coup porté en retour par le bras qu'il a appris à utiliser dans des situations analogues. L'*état de riposte* se définit alors comme la réponse la plus adéquate à la situation de danger. Elle peut aussi être bien plus dangereuse et se présenter dans la vie de tout et chacun. Comme par exemple la conduite dangereuse d'une voiture A qui se présente en sens contraire devant un conducteur B, qui, reconnaissant le possible danger, dévie la trajectoire à temps (inconsciemment) afin d'éviter un accident qui aurait pu avoir de graves conséquences (souvent plus qu'un uppercut de droite).

Ce concept d'*état de riposte*, nous semble respecter les capacités apprises par chacun lors de longs apprentissages et au même moment représenter la meilleure réponse obtenue par l'évolution pour la survie de l'individu. Mais la rapidité de la réponse nous suggère que la voie classique œil > thalamus > cortex occipital > pariétal > frontal postérieur (moteur) > striatum, puisse être trop longue pour envoyer la réponse musculaire adéquate en un temps suffisamment court pour réussir à éviter la voiture ou le coup de poing. Par contre si on pense à une séquence œil > thalamus > hippocampe > cortex temporel > cortex moteur > striatum, cela pourrait être suffisamment rapide si la réponse peut prendre une voie extrapyramidale (rubro-spinale, reticulo-spinale, vestibulo spinale, etc). L'*état de riposte* n'est évidemment qu'une hypothèse que nous avançons dont des données expérimentales doivent encore démontrer la validité.

Un point qui nécessite discussion concerne les concepts de *modalité* et d'*amodalité*. Il semblerait exister une certaine confusion au sujet de ces concepts qui sont en relation avec le *mode* de fonctionnement des aires cérébrales et leur modularité. En définitive il y a encore le problème dualistique qui fait encore fureur dans certains cercles intellectuels et scientifiques où l'on considère que soit le cerveau est constitué d'aires spécialisées avec des fonctions modulaires, soit ces aires travaillent en étroite interaction entre elles sans une vraie spécialisation. Or nous savons que le cerveau est l'organe qui peut merveilleusement s'adapter aux conditions changeantes des autres organes du corps et/ou de l'environnement (d'où respectivement l'*incarnation* et l'*inorbation*). Ainsi il est simple de croire que les *deux possibilités* soient choisies par l'organe afin de parier aux variations des stimuli internes ou externes. Seule cette dynamique peut permettre des chances de survie dans des milieux hostiles ou des pathologies incapacitantes.

Une autre question (parmi tant d'autres) pourrait éventuellement être soulevée : par quel biais le verbe d'action (limitons nous au verbe spécifique *saute*) réussi à améliorer la hauteur du saut ? En d'autres termes par quel biais la performance s'améliore ? Comme nous l'avons précisé dans le Chapitre 5 consacré aux *Matériel et Méthodes*, le protocole expérimental requière un échauffement des sujets (d'environ 5 minutes) afin d'apprendre correctement le geste moteur (le SVJ) et de chauffer les

muscles. De plus, la consigne est donnée de sauter au maximum de la puissance et ce n'est qu'après trois ou quatre sauts maximaux que la manip avec stimuli pourrait être initiée. Il y a donc un temps d'apprentissage au cours duquel les sujets appliquent les concepts connus de sauts sous de nouvelles règles (mains sur les hanches, talon par terre, genoux à 90° et surtout pas de contremouvement, ce qui se démontre être le plus difficile). L'expérience acquise sur de centaines de sauts (à Lyon, Beyrouth et Alger) nous montre que l'apprentissage est rapide, surtout si on consente à un très léger contremouvement qui élimine souvent la difficulté de la tâche motrice. On peut aisément imaginer que cet apprentissage utilise les concepts de sauts déjà stockés dans la mémoire motrice de l'hippocampe depuis l'enfance, alors que les spécificités techniques du SVJ peuvent être acquises en quelques minutes et conservées en mémoire à court terme, toujours dans l'hippocampe, afin que le SVJ devienne un concept lui-même. Qu'entendons-nous par concept ? Un souvenir mnémonique qu'on peut continuer à appeler représentation mentale ou intentionnalité (selon la phénoménologie de Husserl), c'est-à-dire un rapport que le cerveau établit entre le sujet (lui-même, en qualité d'organe *incarné*) et l'*objet* (tout simplement le monde ou, comme nous le disions précédemment, le *Umwelt* l'environnement proche de l'individu lui-même). Ce rapport conceptualisé peut être rappelé mnémoniquement par divers stimuli cognitifs de sorte que, *par le recrutement de plusieurs aires cérébrales* (comme dans le cas de la parole, par exemple, mais aussi pour le calcul ou l'IK), il puisse améliorer l'efficacité de la performance d'un geste complexe et donc de sa hauteur. Une analyse biomécanique devrait dans un proche futur pouvoir, peut-être, confirmer cette hypothèse.

Nous voudrions terminer cette discussion générale par préciser une raison qui nous fait penser à une certaine originalité de nos résultats, celle concernant le choix de l'action motrice, le Squat Vertical Jump (SVJ). Chez les singes, il existe la possibilité d'exécuter, des gestes utiles à la communication et qui transmettent une information simple de lointaine source symbolique à la différence de l'homme. Ces gestes sont en stricte relation avec les éléments primordiaux de la vie, *i.e.* : attraper la nourriture, indiquer une direction ou un ordre, caresser les enfants ou les rabrouer, nettoyer la fourrure (où cela est coutume) etc (voir la revue de Cartmill et al 2012). Ainsi la plupart

des gestes qui ont indiqué la relation parole-action ont été des gestes de préhension de différente simplicité suivant la possibilité (généralement non spécifiée) d'utiliser le pouce ou non. Dans leur excellente revue Cartmill et al (2012) définissent des actes moteurs exclusivement exprimés par l'homme, des gestes qu'ils nomment '*representational gestures*' et qui ont la capacité de traduire en action motrice une représentation mentale (propre terme utilisé par ces auteurs). Dans les paroles des auteurs: « *We argue that gesture played an important role in the transition to symbolic thought and language in human evolution, following a cognitive leap that allowed gesture to incorporate representational elements*. », en effet d'autres recherches résumées dans cette revue de littérature montrent que les singes ne sont pas capables d'exprimer des concepts symboliques comme nous pouvons le faire.

L'action que nous avons choisie, le SVJ, doit être considéré comme un acte moteur complexe, car il fait appel à la proprioception, au système vestibulaire, aux systèmes nerveux central et périphérique et à la commande sensorimotrice de la plupart des muscles du corps. L'individu qui accompli le SVJ démontre l'*incarnation* de son mental et sa capacité d'améliorer la performance de l'unité corps-mental. Evidemment tout ça n'aurait pas de sens sans un expérimentateur qui doit passer une thèse et l'environnement dans lequel tout cela se déroule. L'action de l'individu *incarné* n'aurait pas de sens si son *Umwelt* n'existait pas. La revue du groupe de Goldin-Meadows nous aide à la conclusion que notre capacité de communication plus évoluée, a commencé par des gestes simples, devenant cognitivement plus complexes et amenant ainsi à une évolution des paroles émises par nos cordes vocales et qui ont conduit à la formation du langage. Action motrice et langage sont ainsi réunis et il est conséquent de penser que aires du langage et aires motrices sont réunies en manière étroite car l'une peut stimuler l'autre et *vice-versa*.

En conclusion, *émotions, intentions, attentions, sensations (IK), perceptions, pensées* (en qualité de formatrices de concepts ou de représentations mentales) sont les éléments psychophysiologiques qui semblent entrer en jeu, dans le cas de nos expériences, lorsque l'on souhaite améliorer la performance motrice. Nos résultats, de plus, semblent indiquer que d'autres aires peuvent aussi stimuler les aires motrices

comme les visuelles ou les auditives. Enfin il est possible, en shuntant certaines fonctions supérieures (l'état de *ne-pas-penser*) d'améliorer la motricité et la perception.

Chapitre 9. PERSPECTIVES

Nous voici enfin arrivé à l'exercice le plus difficile à écrire dans un document scientifique. Un devoir qui se base sur l'art, très dure pour un culteur en sciences de la vie, de prévoir des future expériences pour répondre, de manière cohérente, à certaines des questions qui ont été posées au cours des expériences précédentes. Le problème est que, à la différence d'autres sciences comme les sciences physiques par exemple, en sciences de la vie il est quasi-impossible de prédire ce que l'organisme, humain ici, a pu construire au cours de son évolution. C'est la raison pour laquelle nous parlons d'art (avec une initiale en minuscule) pour indiquer que c'est plutôt l'intuition qui guide dans ce cas et non pas la pensée structurée.

En exemple nous pouvons citer le cas de l'utilisation du calcul, comme stimulus cognitif dans les expériences que nous venons de présenter, car nous ne nous attendions pas un résultat aussi significatif sur la hauteur du saut, mais plutôt une confirmation du rôle du verbe insignifiant (*tiào*). Le résultat était difficilement prévisible. La complexité du système vivant enseigne qu'en dehors de l'œuvre d'intuition il est bien difficile de structurer mathématiquement, comme dans les sciences exactes, des réponses aux questions concernant le fonctionnement de ces systèmes. Il ne nous reste qu'à avancer des hypothèses et utiliser des conditionnels. Il semblerait donc que, outre une spécificité des verbes reliés à une action particulière, d'autres stimuli cognitifs puissent permettre à l'organisme d'améliorer ses performances motrices. La difficulté réside dans la complexité du système et pour essayer de fixer les idées, des futures recherches partent de ces points qui semblent acquis : 1. Les *concepts* (le verbe spécifique *saute* rappelle un *concept* moteur - ancienne représentation mentale - stocké en mémoire) stimulent la performance d'un mouvement complexe ; 2. Les *sensations proprioceptives* peuvent aussi agir de la sorte ; 3. Les *émotions* (peur et plaisir) font de même, tout comme, 4. L'*intention* de l'individu qui évidemment requière son *attention* et, enfin, si on élimine toutes émotions et pensée on peut, encore mieux probablement, améliorer la performance.

S'ajoute à cela la forte possibilité que le mental soit *incarné* et que donc l'unité agisse non pas en tandem mais en profonde union entre les deux éléments[41]. Sans oublier que cette entité corps-mental fusionne dans le monde par *inorbation*. Comment alors affronter une telle complexité ? Par étapes, comme cela a toujours été fait en sciences de la vie. Ainsi, la première étape sera de confirmer la possibilité que d'autres stimuli cognitifs puissent avoir un effet sur la performance, ceci permettrait plus encore de confiance dans les résultats indiquant une non-spécificité entre langage et action. D'ailleurs pourquoi devrait-elle exister une spécificité ? En 1996 deux articles parurent indiquer, par des expériences d'IRMf, que le cortex moteur s'activerait lors de l'IK d'un geste moteur (l'opposition des doigts au pouce ; Roth et al 1996 ; Porro et al 1996). Les images fonctionnelles indiquaient la présence d'activations au niveau du milieu du cortex moteur, la zone présumée de la motricité de la main, et certaines images montraient ces activations *sur* le sillon de Rolando, à cheval entre le S1 et le M1. Cela peut avoir une bonne raison car, comme déjà mentionné, l'IK provoque le rappel sensoriel (proprioceptif) du mouvement à accomplir. Il semblerait ainsi acceptable que le S1 puisse être activé par l'IK, ce qui expliquerait par ailleurs pourquoi cette imagerie est si efficace dans les traitements physio-thérapeutiques (Kim et al, 2011 ; Cowley et al, 2008).

[41] Nous retrouvons cela bien exprimé dans certaines philosophies religieuses orientales comme chez Mokudo Taisen Deshimaru (1914-1982), bien connu moine Soto Zen. Dans ses propres mots : *L'esprit et le corps sont une même chose, comme les deux faces d'une feuille de papier. L'esprit existe dans chacune de nos cellules et, l'esprit lui-même est le corps et le corps est l'esprit.* In : De Smedt C R, Mollet C. 2004. Les patriarches du zen. Gordes : Editions du Rélié, p 108 (merci à RM)

BIBLIOGRAPHIE

Aertsen, A. & Arndt, M. (1993). Response synchronization in the visual cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *3*(4), 586–94.

Alario, F. X., Chainay, H., Lehericy, S. & Cohen, L. (2006). The role of the supplementary motor area (SMA) in word production. *Brain Research, 1076*(1), 129–43.

Allport, D. A. (1985). Distributed memory, modular subsystems and dysphasia. In: Current perspectives in dysphasia (Newman, S. K., Epstein, R., Eds.), pp 207– 244. Edinburgh: Churchill Livingstone.

Amunts, K., Schleicher, A. & Zilles, K. (2007). Cytoarchitecture of the cerebral cortex-more than localization. *NeuroImage, 37*(4), 1061–5.

Arbib, M.A. (2006). A sentence is to speech as what is to action? *Cortex, 42*(4), 507-14.

Arévalo, A. L., Baldo, J. V. & Dronkers, N. F. (2012). What do brain lesions tell us about theories of embodied semantics and the human mirror neuron system? *Cortex*, *48*(2), 242–54.

Assadollahi, R. & Pulvermüller, F. (2001). Neuromagnetic evidence for early access to cognitive representations. *Neuroreport*, *12*(2), 207–13.

Aziz-zadeh, L., Iacoboni, M., Zaidel, E., Wilson, S. & Mazziotta, J. (2004). Left hemisphere motor facilitation in response to manual action sounds. *Language*, *19*(9), 2609–12.

Aziz-Zadeh, L., Wilson, S. M., Rizzolatti, G. & Iacoboni, M. (2006). Congruent embodied representations for visually presented actions and linguistic phrases describing actions. *Current biology*, *16*(18), 1818–23.

Bak, T. H., O'Donovan, D. G., Xuereb, J. H., Boniface, S. & Hodges, J. R. (2001). Selective impairment of verb processing associated with pathological changes in Brodmann areas 44 and 45 in the motor neurone disease-dementia-aphasia syndrome. *Brain*, *124*(Pt 1), 103–20.

Barsalou, L. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and brain sciences*, *22*(4), 577–660.

Barsalou, L. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617–45.

Barsalou, L. W. (2009). Simulation, situated conceptualization, and prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, *364*(1521), 1281-9.

Barsalou, L. W., Niedenthal, P. M., Barbey, A. K. & Ruppert, J. A. (2003). Social embodiment. In: The psychology of learning and motivation (Ross, B. H., Ed.), pp. 43–92. San Diego: Academic Press.

Bedny, M. & Thompson-Schill, S.L. (2006). Neuroanatomically separable effects of imageability and grammatical class during single-word comprehension. *Brain and Language, 98*(2), 127– 39.

Bedny, M. & Caramazza, A. (2011). Perception, action, and word meanings in the human brain: the case from action verbs. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1224*, 81–95.

Bedny, M. & Saxe, R. (2012). Insights into the origins of knowledge from the cognitive neuroscience of blindness. *Cognitive neuropsychology*, *29*(1-2), 56–84.

Bedny, M., Caramazza, A., Grossman, E., Pascual-Leone, A. & Saxe, R. (2008). Concepts are more than percepts: the case of action verbs. *The Journal of neuroscience*, *28*(44), 11347–53.

Bedny, M., Caramazza, A., Pascual-Leone, A. & Saxe, R. (2011). Typical Neural Representations of Action Verbs Develop without Vision. *Cerebral Cortex*, *22*(2), 1–8.

Behrmann, M. & Plaut, D. C. (2013). Bilateral Hemispheric Processing of Words and Faces: Evidence from Word Impairments in Prosopagnosia and Face Impairments in Pure Alexia. *Cerebral cortex*. doi:10.1093/cercor/bhs390.

Behrmann, M., Black, S. E. & Bub, D. (1990). The evolution of pure alexia: a longitudinal study of recovery. *Brain and Language*. *39*(3), 405-27.

Bell, B. D. (1994). Pantomine recognition impairment in aphasia: An analysis of error types. *Brain and Language, 47*(2), 269–78.

Benson, R. R., Whalen, D. H., Richardson, M., Swainson, B., Clark, V. P. et al. (2001). Parametrically dissociating speech and nonspeech perception in the brain using fMRI. *Brain and Language*, *78*(3), 364–96.

Berndt, R. S., Haendiges, A. N., Burton, M. W. & Mitchum, C. C. (2002). Grammatical class and imageability in aphasic word production: their effects are independent. *Journal of Neurolinguistics*, *15*(3-5), 353–71.

Berthoz A. 2013 [1997]. Le sens du movement. Paris: Odile Jacob.

Beversdorf, D. Q., Ratcliffe, N. R., Rhodes, C. H. & Reeves, A. G. (1997). Pure alexia: clinical-pathologic evidence for a lateralized visual language association cortex. *Clinical Neuropathology*. *16*(6), 328-31.

Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Cox, R. W., Rao, S. M. et al. (1997). Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *The Journal of neuroscience, 17*(1), 353–62.

Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P. S., Springer, et al. (2000). Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cerebral Cortex*, *10*(5), 512–28.

Binkofski, F. & Buccino, G. (2004). Motor functions of the Broca's region. *Brain and Language*, *89*(2), 362–9.

Bisiach, E. & Vallar, G. (2000). Unilateral neglect in humans. In: Handbook of neuropsychology, vol. 1, 2nd edn. (Boller, F., Grafman, J., Rizzolatti, G., Eds.), pp 459–450. Amsterdam: Elsevier Science.

Borgaro, S. & Prigatano, G.P. (2002). Early Cognitive and Affective Sequelae of Traumatic Brain Injury: A Study Using the BNI Screen for Higher Cerebral Functions. *Journal of Head Trauma Rehabilitation, 17* (6), 526-534.

Boronat, C., Buxbaum, L., Coslett, H. B., Tang, K., Saffran, E. et al. (2005). Distinctions between manipulation and function knowledge of objects: Evidence from functional magnetic resonance imaging. *Cognitive Brain Research, 23*(2-3), 361–73.

Boulenger, V., Hauk, O. & Pulvermüller, F. (2009). Grasping ideas with the motor system: semantic somatotopy in idiom comprehension. *Cerebral cortex*, *19*(8), 1905–14.

Boulenger, V., Roy, A.C., Paulignan, Y., Déprez, V., Jeannerod, M. & Nazir, T.A. (2006). Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 ms of processing. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18*(10), 1607-15.

Boulenger, V., Shtyrov, Y. & Pulvermüller, F. (2012). When do you grasp the idea? MEG evidence for instantaneous idiom understanding. *NeuroImage*, *59*(4), 3502–13.

Braitenberg, V. & Schüz, A. (1998). Statistics and Geometry of Neuronal Connectivity: Berlin, Springer.

Braitenberg, V. (1978). Cell assemblies in the cerebral cortex. In: Lecture notes in biomathematics 21, Theoretical approaches to complex systems. (Heim, R., Palm, G., Eds.), pp. 171–188. Berlin: Springer.

Broca, P. (1861). Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphtmie (perte de la parole). *Bull Sot Anat, 36*, 330-57.

Brodmann, K. (1909). Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestelltauf Grund des Zellenbaues, Barth, Leipzig, In: Some Papers on the Cerebral Cortex, translated as: On the Comparative Localization of the Cortex, 201-230, Thomas, Springfield, IL, 1960.

Bub, D.N., Masson, M.E.J. & Cree, G.S. (2008). Evocation of functional and volumetric gestural knowledge by objects and words. *Cognition, 106*(1), 27–58.

Bubanj, S., Stanković, R., Bubanj, R. & Bojić, I. (2010). Reliability of myotest tested by a countermovement jump. *Acta Kinesiologica*, *4*(2), 80–2.

Buccino, G., Binkofski, F. & Riggio, L. (2004). The mirror neuron system and action recognition. *Brain and Language, 89*(2), 370–6.

Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L. et al. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, *13*(2), 400-4.

Buccino, G., Riggio, L., Melli, G., Binkofski, F., Gallese, V. et al. (2005). Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: a combined TMS and behavioral study. *Brain research. Cognitive brain research*, *24*(3), 355–63.

Burbaud, P., Camus, O., Guehl, D., Bioulac, B., Caillé, J. et al. (2000). Influence of cognitive strategies on the pattern of cortical activation during mental subtraction. A functional imaging study in human subjects. *Neuroscience letters*, *287*(1), 76–80.

Burbaud, P., Camus, O., Guehl, D., Bioulac, B., Caillé, J.M. et al. (1999). A functional magnetic resonance imaging study of mental subtraction in human subjects. *Neuroscience letters*, *273*(3), 195–9.

Buxbaum, L.J., Kyle, K.M., Tang, K. & Detre, J.A., (2006). Neural substrates of knowledge of hand postures for object grasping and functional object use: evidence from fMRI. *Brain Research, 1117*(1), 175–85.

Canessa, N., Borgo, F., Cappa, S.F., Perani, D., Falini, A. et al. (2008). The different neural correlates of action and functional knowledge in semantic memory: An fMRI Study. *Cerebral Cortex, 18*(4), 740–51.

Caplan, D., Vijayan, S., Kuperberg, G., West, C., Waters, G. et al. (2002). Vascular repsonses to syntactic processing: event-related fMRI study of relative clauses. *Human Brain Mapping, 15*(1), 26-38.

Cappa, S.F. & Pulvermüller, F. (2012). Language and the motor system. *Cortex, 48*(7), 785-7.

Cartmill, E.A, Beilock, S. & Goldin-Meadow, S. (2012). Aword in the hand: action, gestures and mental representation in humans and non-human primates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, *367*(1585), 129-43.

Casartelli, N., Müller, R. & Maffiuletti, N. (2010). Validity and reliability of the myotest accelerometric system for the assessment of vertical jump height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *24*(11), 3186–93.

Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rocchetti, A. et al. (2013). Concurrent validity of vertical jump performance assessment systems. *Journal of strength and conditioning research*, *27*(3), 761–8.

Catani, M., Jones, D.K. & Ffytche, D.H. (2005). Perisylvian language networks of the human brain. *Annals of neurology*, *57*(1), 8–16.

Chatterjee, A., Southwood, M.H. & Basilico, D. (1999). Verbs, events and spatial representations. *Neuropsychologia, 37*(4), 395–402.

Chee, M.W., O'Craven, K.M., Bergida, R., Rosen, B.R. & Savoy, R.L. (1999). Auditory and visual word processing studied with fMRI. *Human Brain Mapping*, *7*(1), 15–28.

Chersi, F., Thill, S., Ziemke, T. & Borghi, A. M. (2010). Sentence processing: linking language to motor chains. *Frontiers in neurorobotics*, *4*, 1–9. doi: 10.3389/fnbot.2010.00004. eCollection 2010.

Clark, A. (2008). Supersizing the mind. New York: Oxford University Press.

Clark, A. & Chambers, D. (1998). The extended mind. *Analysis, 58*(1), 7–19.

Cohen, L. & Dehaene, S. (2000). Calculating without reading: unsuspected residual abilities in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, *17*(6), 563–83.

Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G. et al. (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, *123(Pt 2*), 291–307.

Cohen, L., Martinaud, O., Lemer, C., Lehéricy, S., Samson, Y. et al. (2003). Visual Word Recognition in the Left and Right Hemispheres: Anatomical and Functional Correlates of Peripheral Alexias. *Cerebral Cortex*, *13*(12), 1313–33.

Collet, C., Guillot, A., Lebon, F., MacIntyre, T. & Moran, A. (2011). Measuring motor imagery using psychometric, behavioral, and psychophysiological tools. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *39*(2), 85–92.

Coltheart, M., Davelaar, E., Jonasson, J. & Besner, D. (1977). Access to the internal lexicon. In: Attention and performance (Dornic, S., Ed), pp. 535-55. Hillsdale (NJ): Erlbaum.

Coombes, S. A., Gamble, K. M., Cauraugh, J. H. & Janelle, C. M. (2008). Emotional states alter force control during a feedback occluded motor task. *Emotion, 8*(1), 104–13.

Cowell, S. F., Egan, G. F., Code, C., Harasty, J. & Watson, J. D. (2000). The functional neuroanatomy of simple calculation and number repetition: A parametric PET activation study. *NeuroImage*, *12*(5), 565–73.

Cowley, P. M., Clark, B. C. & Ploutz-Snyder, L. L. (2008). Kinesthetic motor imagery and spinal excitability: the effect of contraction intensity and spatial localization. *Clinical Neurophysiology*, *119*(8), 1849–56.

Craighero, L., Metta, G., Sandini, G. & Fadiga, L. (2007). The mirror-neurons system: data and models. *Progress in Brain Research*, 164, 39–59.

Csíkszentmihályi, M (1996). Creativity: Flow and the Psychology of Discovery and Invention. New York: Harper Perennial.

Dalla Volta, R., Gianelli, C., Campione, G. C. & Gentilucci, M. (2009). Action word understanding and overt motor behavior. *Experimental brain research. 196*(3), 403–12.

Damasio, A. R. (1998). Emotion in the perspective of an integrated nervous system. *Brain research. Brain research reviews, 26*(2-3), 83–6.

Damasio, A. R. (2005). Spinoza avait raison. Joie et tristesse, le cerveau des émotions. Paris: Odile Jacob.

Damasio, A. R. & Damasio, H. (1983). The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*, *33*(12), 1573–83.

Damasio, A. R. & Tranel, D. (1993). Nouns and verbs are retrieved with differently neural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 90*(11)*,* 4957–60.

Damasio, H., Grabowski, T., Tranel, D. & Hichwa, R. (1996). A neural basis for lexical retrieval. *Nature*, *380*(6574), 499-505.

Damasio, H., Tranel, D., Grabowski, T., Adolphs, R. & Damasio, A. (2004). Neural systems behind word and concept retrieval. *Cognition*, *92*(1-2), 179–229.

Davis, M., Meunier, F. & Marslen-Wilson, W.D. (2004). Neural responses tomorphological, syntactic, andsemantic properties of single words: an fMRI study. *Brain and Language, 89*(3), 439–49.

de Lafuente, V. & Romo, R. (2004). Language abilities of motor cortex. *Neuron, 41*(2), 178–80.

De Zubicaray, G., Postle, N., McMahon, K., Meredith, M. & Ashton, R. (2008). Mirror neurons, the representation of word meaning, and the foot of the third left frontal convolution. *Brain and Language, 112*(1): 77–84.

Decety, J. & Jeannerod, M. (1996). Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitt's law hold in motor imagery? *Behavioural brain research*, *72*(1-2), 127–134.

Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M. et al. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, 120(Pt 10), 1763–77.

Dehaene, S. (1995). Electrophysiological evidence for category-specific word processing in the normal human brain. *Neuroreport, 6*(16), 2153–57

Dehaene, S. (1999). Sources of Mathematical Thinking: Behavioral and Brain-Imaging Evidence. *Science*, *284*(5416), 970–4.

Dehaene, S. (2011). The number sense, how the mind creates mathematics. New York: Oxford University Press.

Dehaene, S. & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in cognitive sciences*, *15*(6), 254–62.

Dehaene, S., Le Clec'H, G., Poline, J.B., Le Bihan, D. & Cohen, L. (2002). The visual word form area : a prelexical represenation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport, 13*(3), 321-5.

Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R. & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, *284*(5416), 970–4.

Dennett, D.C. (1985). Animal consciousness: what matters and why. *Social Research 62*, 691-710.

Desai, R. H., Binder, J. R., Conant, L. L. & Seidenberg, M. S. (2010). Activation of sensory-motor areas in sentence comprehension. *Cerebral cortex*, *20*(2), 468–78.

Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91(1), 176-180.

Dolan, R. J. (2002). Emotion, cognition, and behavior. *Science, 298*(5596), 1191–4.

Downing, P. E., Jiang, Y., Shuman, M. & Kanwisher, N. (2001). A cortical area selective for visual processing of the human body. *Science, 293*(5539), 2470–3.

Edelman, G. M. & Tononi, G. (1999). A universe of consciousness. New York: Basic Books.

Edelman, G. M. & Mountcastle, V.B. (1978). The mindful brain: Cortical organization and the group-selective theory of higher brain function. Oxford, UK: MIT Press.

Ehrsson, H. H., Fagergren, E. & Forssberg, H. (2001). Differential fronto-parietal activation depending on force used in a precision grip task: an fMRI study. *Jouranl of Neurophysiology, 85*(6), 2613-3.

Eickhoff, S. B., Heim, S., Zilles, K. & Amunts, K. (2006). Testing anatomically specified hypotheses in functional imaging using cytoarchitectonic maps. *NeuroImage, 32*(2), 570–82.

Eliot, L. (2010). Pink brain, blue brain: how small differences grow into troublesome gaps- and what we can do about it. New York: HMH.

Fadiga, L., Craighero, L. & D'Ausilio, A. (2009). Broca's area in language, action, and music. Annals of the New York Academy of Sciences, 1169, 448-58.

Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G. & Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. *The European Journal of Neuroscience, 15*(2), 399–402.

Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G. & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology, 73*(6), 2608-11.

Farah, M. J. (1989). The neural basis of mental imagery. *Trends in Neurosciences, 12*(10), 395–9.

Fargier, R., Ménoret, M., Boulenger, V., Nazir, T. A. & Paulignan, Y. (2012). Grasp It Loudly! Supporting Actions with Semantically Congruent Spoken Action Words. *PloS one*, *7*(1), e30663.

Fazio, P., Cantagallo, A., Craighero, L., D'Ausilio, A., Roy, A. C., et al. (2009). Encoding of human action in Broca's area. *Brain*, *132*(Pt 7), 1980–8.

Fernandino, L. & Iacoboni, M. (2010). Are cortical motor maps based on body parts or coordinated actions? Implications for embodied semantics. *Brain and language*, *112*(1), 44–53.

Fischer, M. H. & Zwaan, R. A. (2008). Embodied language: a review of the role of the motor system in language comprehension. *Quarterly journal of experimental psychology (2006)*, *61*(6), 825–50.

Fodor, J. A. (1975). The language of thought. Cambridge: Harvard University Press.

Fodor, J. A. (1983). The modularity of mind. Cambridge: MIT Press.

Fogassi, L., Ferrari, P.F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F. et al. (2005). Parietal lobe: From action organization to intention understanding. *Science*, *308*(5722), 662-7.

Fourkas, A. D., Avenanti, A., Urgesi, C. & Aglioti, S. M. (2006). Corticospinal facilitation during first and third person imagery. *Experimental Brain Research, 168*(1–2), 143–51.

Frak, V., Nazir, T., Goyette, M., Cohen, H. & Jeannerod, M. (2010). Grip force is part of the semantic representation of manual action verbs. *PloS one*, *5*(3), e9728.

Friederici, A. D. (1997). Neurophysiological aspects of language processing. *Clinical neuroscience New York*, *4*(2), 64–72.

Fuster, J. M. (1989). The Prefrontal Cortex, 2nd ed. New York: Raven Press.

Fuster, J. M. (1995). Memory in the cerebral cortex. Cambridge: MIT Press.

Fuster, J. M. (1998). Linkage at the top. *Neuron, 21*(6), 1223-4.

Fuster, J. M. (2003). Cortex and mind: Unifying cognition. Oxford: Oxford University Press.

Fuster, J. M. (2008). The Prefrontal Cortex. London: Elsevier.

Gainotti, G. (2000). What the locus of brain lesion tells us about the nature of the cognitive defect underlying category-specific disorders: a review. *Cortex, 36*(4), 539–59.

Gallese, V. & Lakoff, G. (2005). The brain's concepts: The role of the sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive neuropsychology*, *22*(3), 455–79.

Gallese, V., Keysers, C. & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. (D. K. Brockman & C. P. Van Schaik, Eds.)*Trends in Cognitive Sciences*, *8*(9), 396–403.

Garagnani, M., Wennekers, T. & Pulvermüller, F. (2007). A neuronal model of the language cortex. *Neurocomputing*, *70*(10-12), 1914–19.

Garagnani, M., Wennekers, T. & Pulvermüller, F. (2008). A neuroanatomically grounded Hebbian-learning model of attention-language interactions in the human brain. *The European journal of neuroscience*, *27*(2), 492–513.

Garagnani, M., Wennekers, T. & Pulvermüller, F. (2009). Recruitment and Consolidation of Cell Assemblies for Words by Way of Hebbian Learning and Competition in a Multi-Layer Neural Network. *Cognitive Computation*, *1*(2), 160–76.

Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B. & Mangun, G. R. (2001). Neurosciences cognitives, la biologie de l'esprit. Paris: DeBoeck Université.

Gemignani, A., Distefano, M. R., Sebastiani, L., Ghelarducci B, Jeannerod M et al. (2004). Influence of mental Imagery on the execution of a finger-to-finger thumb opposition task. *Archives Italiennes de Biologie*, 142(1), 1-9.

Gentili, R., Papaxanthis, C. & Pozzo, T. (2006). Improvement and generalization of arm motor performance through motor imagery practice. *Neuroscience*, *137*(3), 761–72.

Gentilucci, M., Dalla Volta, R. & Gianelli, C. (2008). When the hands speak. *Journal of physiology, Paris*, *102*(1-3), 21–30.

Georgopoulos, A.P. (2000). Neural aspects of cognitive motor control. *Current Opinion in Neurobiology*, 10(2), 238-41.

Gerstein, G. L., Bedenbaugh, P. & Aertsen, M.H. (1989). Neuronal assemblies. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *36*(1), 4–14.

Geschwind, N. (1965). Disconnexion syndromes in animals and man. I. *Brain: a journal of neurology*, *88*(2), 237–94.

Geschwind, N. (1970). The organization of language and the brain. *Science, 170*(3961), 940-4.

Geschwind, N. (1979). Specializations of the human brain. *Scientific American 241*(3), 180- 99.

Geyer, S. (2003). The microstructural border between the motor and the cognitive domain in the human cerebral cortex. Wien: Springer.

Glatthorn, J. F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher, S., Impellizzeri, F. M. et al. (2011). Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *25*(2), 556–60.

Glenberg, A. M. (1997). What memory is for. *Behavioral and Brain Sciences*, *20*(1), 19–55.

Glenberg, A. M. & Kaschak, M. P. (2002). Grounding language in action. *Psychonomic bulletin & review*, *9*(3), 558–65.

Glenberg, A. M., Sato, M., Cattaneo, L., Riggio, L., Palumbo, D. & al. (2008). Processing abstract language modulates motor system activity. The *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 61*(6), 905–19.

Goldman-Rakic, P.S. (1987). Development of cortical circuitry and cognitive function. *Child Development*, *58*(3), 601–22.

Goldman-Rakic, P.S. (1995). Cellular Basis of Working Memory Review. *Neuron*, *14*(3), 477–85.

Grafton, S. T., Fadiga, L., Arbib, M. A. & Rizzolati, G. (1997). Premotor cortex activation during observation and naming of familiar tools. *NeuroImage, 6*(4), 231–6.

Grammont, F. & Riehle, A. (1999). Precise spike synchronization in monkey motor cortex involved in preparation for movement. *Experimental brain research*, *128*(1-2), 118–22.

Graziano, M. & Gross, C. G. (1994a). Coding of visual space by premotor neurons. *Science, 266*(5187), 1054-7.

Graziano, M. & Gross, C.G. (1994b). The representation of extrapersonal space: a possible role for a bimodal-visual-tactile neurons. In: The cognitive neurosciences (Gazzaniga, M. Ed.), pp. 1021-34. Cambridge MA: MIT Press.

Grezes, J. & Decety, J. (2002). Does visual perception of object afford action? Evidence from a neuroimaging study. Neuropsychologia 40, 212–22.

Green, A.L., Draper, N. & Helton, W.S. (2013). The impact of fear words in a secondary task on complex motor performance: a dual-task climbing study. Psychological Reseacrh. doi: 10.1007/s00426-013-0506-8.

Grezes, J., Costes, N. & Decety, J. (1998). Top-down effect of strategy on the perception of human biological motion: A PET investigation. *Cognitive Neuropsychology*, *15*(6-8), 553–82.

Griffin, D.R. & Speck, G.B. (2004). New evidence of animal consciousness. *Animal Cognition, 7*(1), 5–18.

Grossman, M. (1998). Not all words are created equal: category-specific deficits in central nervous system disease. *Neurology, 50*(2), 324–5.

Grossman, M., Koenig, P., DeVita, C., Glosser, G., Alsop, D. et al. (2002). The neural basis for category-specific knowledge: an fMRI study. *NeuroImage, 15*(4), 936–48.

Guillot, A., Collet, C., Nguyen, V. A., Malouin, F., Richards, C. et al. (2009). Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study. *Human Brain Mapping*, *30*(7), 2157–72.

Guillot, E. & Collet, C. (2010). The neurophysiological foundations of mental and motor imagery. Oxford: Oxford University Press.

Hagège, C. (2000). Halte à la mort des langues. Paris: Odile Jacob.

Hajcak, G., Molnar, C., George, M.S., Bolger, K. & Koola J. et al. (2007). Emotion facilitates action: A transcranial magnetic stimulation study of motor cortex excitability during picture viewing. *Psychophysiology, 44*(1), 91–7.

Hall, C. R. & Martin, K. A. (1997). Measuring movement imagery abilities: A revision of the Movement Imagery Questionnaire. *Journal of Mental Imagery*, *21*(1-2), 143–54.

Hanakawa, T., Honda, M., Okada, T., Fukuyama, H. & Shibasaki, H. (2003). Differential activity in the premotor cortex subdivisions in humans during mental calculation and verbal rehearsal tasks: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, *347*(3), 199–201.

Hauk, O. & Pulvermüller, F. (2004). Neurophysiological distinction of action words in the fronto-central cortex. *Human brain mapping*, *21*(3), 191–201.

Hauk, O. & Pulvermüller, F. (2011). The lateralization of motor cortex activation to action-words. *Frontiers in human neuroscience*, *5*, 149.

Hauk, O., Shtyrov, Y. & Pulvermüller, F. (2008). The time course of action and action-word comprehension in the human brain as revealed by neurophysiology. *Journal of physiology, Paris*, *102*(1-3), 50–8.

Hebb, D. O. (1949). The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. John Wiley & Sons *Rev.* 20, 557-66.

Heiser, M., Iacoboni, M., Maeda, F., Marcus, J. & Mazziotta, J. C. (2003). The essential role of Broca's area in imitation. *European Journal of Neuroscience*, *17*(5), 1123–8.

Helbig, H. B., Graf, M. & Kiefer, M. (2006). The role of action representations in visual object recognition. *Experimental Brain Research, 174*(2),221–8

Henderson, V. W. (1986). Anatomy of posterior pathways in reading: a reassessment. *Brain and Language*, *29*(1), 119–33.

Hickok, G. (2009). The functional neuroanatomy of language. *Physics of life reviews*, *6*(3), 121–43.

Hickok, G. & Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in cognitive sciences*, *4*(4), 131–8.

Hickok, G. & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, *92*(1-2), 67–99.

Hickok, G. & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Review Neuroscience*, *8*(5), 393–402.

Hickok, G. Houde, J. & Rong, F. (2011). Sensorimotor integration in speech processing: computational basis and neural organization. *Neuron*, *69*(3), 407–22.

Hoyek, N., Collet, C., Rastello, O., Fargier, P., Thiriet, P. & al. (2009). Enhancement of mental rotation abilities and its effect on anatomy learning. *Teaching and Learning in Medecine, 21*(3), 201–6.

Hubley, C. L. & Wells, R. P. (1983). A work-energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump performance. *European Journal Of Applied Physiology And Occupational Physiology*, *50*(2), 247–54.

Humphreys, G. W. & Evett, L. J. (1985). Are there independent lexical and nonlexical routes in word processing? An evaluation of the dual-route theory of reading. *Behavioral and Brain Sciences*, *8*(4), 689–740.

Husserl, H. (2004) [1913]. La crise des sciences européennes et la phénomènologie transcendentale. Paris : Guillimard.

Ingle, D. (1967). Two visual mechanisms underlying the behavior of fish. *Psychologische Forschung*, *31*(1), 44–51.

Ingle, D. (1973). Two visual systems in the frog. *Science*, *181*(104), 1053–5.

Jankowski, M. M., Ronnqvist, K. C., Tsanov, M., Vann, S. D., Wright, N. F. et al. (2013). The anterior thalamus provides a subcortical circuit supporting memory and spatial navigation. *Frontiers in systems neuroscience*, *7*, 45.

Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage, 14*(1 Pt 2), S103-9.

Jeannerod, M. (2011). La fabrique des idées. Paris: Odile Jacob.

Jirak, D., Menz, M. M., Buccino, G., Borghi, A. M. & Binkofski, F. (2010). Grasping language - A short story on embodiment. *Consciousness and Cognition, 19*(3), 711–20.

Johansen-Berg, H., Behrens, T.E.J., Robson, M.D., Drobnjak, I., Rushworth, M.F.S. et al. (2004). Changes in connectivity profiles define functionally distinct regions in human medial frontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *101*(36), 13335–40.

Johnson-Frey, S. H., Newman-Norlund, R. & Grafton, S.T. (2005). A distributed left hemisphere network active during planning of everyday tool use skills. *Cerebral Cortex, 15*(6), 681-95.

Kable, J. W., Kan, I.P., Wilson, A., Thompson-Schill, S. L. & Chatterjee, A. (2005). Conceptual representations of action in the lateral temporal cortex. *Journal of cognitive neuroscience*, *17*(12), 1855–70.

Kable, J. W., Lease-Spellmeyer, J. & Chatterjee, A. (2002). Neural substrates of action event knowledge. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(5), 795–805.

Kazui, H., Kitagaki, H. & Mori, E. (2000). Cortical activation during retrieval of arithmetical facts and actual calculation: a functional magnetic resonance imaging study. *Psychiatry and clinical neurosciences*, *54*(4), 479–85.

Kellenbach, M., Brett, M. & Patterson, K. (2003). Actions speak louder than functions: The importance of manipulability and action in tool representation. *Journal of Cognitive Neuroscience, 15*(1), 30–46.

Kellenbach, M. L., Wijers, A. A., Hovius, M., Mulder J. & Mulder, G. (2002). Neutral Differentiation of Lexico--Syntactic Categories or Semantic Features? Event--Related Potential Evidence for Both. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(4), 561-77.

Kemmerer, D. & Gonzalez-Castillo, J. (2010). The two-level theory of verb meaning: An approach to integrating the semantics of action with the mirror neuron system. *Brain and language*. *122*(1), 54-76.

Kemmerer, D., Castillo, J.G., Talavage, T., Patterson, S. & Wiley, C. (2008). Neuroanatomical distribution of five semantic components of verbs: evidence from fMRI. *Brain and Language*, *107*(1), 16–43.

Kennerly, S., Sakai, K. & Rushworth, M. (2004). Organization of action sequences and the role of the pre-SMA. *Journal of Neurophysiology, 91*(2), 978–93.

Kim, J. S., Oh, D. W., Kim, S. Y. & Choi, J. D. (2011). Visual and kinesthetic locomotor imagery training integrated with auditory step rhythm for walking performance of patients with chronic stroke. *Clinical Rehabilitation*, *25*(2), 134–145.

Klatzky, R. L., Pellegrino, J. W., McCloskey, B. P. & Doherty, S. (1989). Can You Squeeze a Tomato? The Role of Motor Representations in Semantic Sensibility Judgments. *Journal of Memory and Language*, *28*, 56–77.

Knecht, S., Drager, B., Deppe, M., Bobe, L. & Lohmann, H. (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans*. Brain, 123*(12), 2512–18.

Kosslyn, S. M. & Koenig, O. (1995). Wet mind. The new cognitive neuroscience. New York: Free Press.

Kronbichler, M., Hutzler, F., Wimmer, H., Mair, A. & Staffen, W. (2004) The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. *Neuroimage, 21*(3), 946–53.

LaBerge, D. & Samuels, S. J. (1974). Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychologist, 6*, 293-323.

Labruna, L., Fernández-del-Olmo, M., Landau, A., Duqué, J. & Ivry, R. B. (2011). Modulation of the motor system during visual and auditory language processing. *Experimental brain research*, *211*(2), 243–50.

Lakoff, G. (1987). Women, fire, and dangerous things: what categories reveal about the mind. Chicago: University of Chicago Press.

Laws, K. R., Humber, S. A., Ramsey, D. J. C. & McCarthy, A. (1995). Probing sensory and associative semantics for animals and objects in normal subjects. *Memory 3*(3-4): 397–408.

Lewis, J. W., Phinney, R. E., Brefczynski-Lewis, J. A. & DeYoe, E. A. (2006). Lefties get it ``right'' when hearing tool sounds. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(8), 1314–30.

Li, J. Z., Absher, D. M., Tang, H., Southwic, A. M., Casto A. M. et al. (2008). Worldwide human relationships inferred from genome-wide patterns of variations. *Science 319*(5866), 1100–4.

Liberman, A. & Whalen, D. (2000). On the relation of speech to language. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(5), 187–96.

Liberman, A. M. & Mattingly, I. G. (1989). A specialization for speech perception. *Science*, *243*(4890), 489–94.

Liberman, A. M., Cooper, F. S. Shankweiler, D. P. & Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psycholical Review*, *74*(6), 431–61.

Libet, B. (1999). Do We Have Free Will? *Journal of Consciousness Studies*, *6*(8), 47–57.

Libet, B. (2006). Reflections on the interaction of the mind and brain. *Progress in Neurobiology, 78*(3-5), 322–6.

Lichtheim, L. (1885). On aphasia. *Brain*, VII, 433-84.

Linthorne, N. P. (2001). Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *Biological cybernetics*, *69*(3), 1198–204.

Liuzzi, G., Ellger, T., Flöel, A., Breitenstein, C., Jansen, A. et al. (2008). Walking the talk--speech activates the leg motor cortex. *Neuropsychologia*, *46*(11), 2824–30.

Lotze, M. & Halsband, U. (2006). Motor imagery. *Journal of physiology, Paris*, 99(4-6), 386–95.

Luce, P. A. & Pisoni, D. B. (1998). Recognizing spoken words: the neighborhood activation model. *Ear and Hearing*, *19*(1), 1–36.

Luzzatti, C., Raggi, R., Zonca, G., Pistarini, C., Contardi, A. et al. (2002) Verb-noun double dissociation in aphasic lexical impairments: the role of word frequency and imageability. *Brain and Language, 81*(1-3), 432–44.

Lyons, I. M., Mattarella-Micke, A., Cieslak, M., Nusbaum, H. C., Small, S. L. et al. (2010). The role of personal experience in the neural processing of action-related language. *Brain and language*, *112*(3), 214–22.

MacGregor, L. J., van Casteren, M., Shtyrov, Y. & Pulvermüller, F. (2012). Ultra-rapid access to words in the brain. *Nature Communications*, 3, 711. doi:10.1038/ncomms1715.

Mahon, B. Z. & Caramazza, A. (2008). A critical look at the embodied cognition hypothesis and a new proposal for grounding conceptual content. *Journal of physiology, Paris, 102*(1-3), 59–70.

Makris, N., Meyer, J. W., Bates, J. F., Yeterian, E. H., Kennedy, D. N. et al. (1999). MRI-Based topographic parcellation of human cerebral white matter and nuclei II. Rationale and applications with systematics of cerebral connectivity. *NeuroImage*, *9*(1), 18–45.

Martin, A. & Chao, L.L. (2001). Semantic memory and the brain: Structure and processes. *Current Opinion in Neurobiology, 11*(2), 194–201.

Martin, A., Haxby, J. V, Lalonde, F. M., Wiggs, C. L. & Ungerleider, L. G. (1995). Discrete cortical regions associated with knowledge of color and knowledge of action. *Science*, *270*(5233), 102–5.

Martin, A., Wiggs, C., Ungerleider, L. & Haxby, J. (1996). Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature*, *379*(6566), 649–52.

Masland, R.L. (1958). Higher Cerebral Functions. *Annual Review of Physiology, 20*, 533-58.

Massarelli, R., Rabahi, T. &. Fargier, P. (2013). L'homme cet animal doté du verbe. *Nouveaux Actes Sémiotiques.* Sous presse.

Massarelli, R., Rupied, B., Rabahi, T. & Fargier, P. (2012). L'unité du corps et du mental. *Kinésithérapie la Revue. 12*(125), 36–41.

Masson, M., Bub, D. & Newton-Taylor, M. (2008). Language-based access to gestural components of conceptual knowledge. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 61*(6), 869–82.

Mazoyer, B. M., Tzourio, N., Frak, V., Syrota, A., Murayama, N. et al. (1993). The cortical representation of speech. *Journal of Cognitive Neuroscience, 5*(4), 467–79.

Mazzola, V., Vuilleumier, P., Latorre, V., Petito, A., Gallese, V. et al. (2013). Effects of Emotional Contexts on Cerebello-Thalamo-Cortical Activity during Action Observation. *PloS one*, *8*(9), e75912.

McCandliss, B. D., Cohen, L. & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: Expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences, 7*(7), 293–9.

Medin, D. L., Smith, E. E. (1984). Concepts and concept formation. *Annual Review of Psychology, 35*, 113–38

Meister, I. G., Buelte, D., Sparing, R. & Boroojerdi, B. (2007). A repetition suppression effect lasting several days within the semantic network. *Experimental Brain Research*, *183*(3), 371–6.

Meister, I. G., Boroojerdi, B., Foltys, H., Sparing, R., Huber, W. et al. (2003). Motor cortex hand area and speech: implications for the development of language. *Neuropsychologia*, *41*(4), 401–6.

Menon, V., Rivera, S. M., White, C. D., Glover, G. H. & Reiss, A. L. (2000). Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing. *NeuroImage*, *12*(4), 357–65.

Milner, D. & Goodale, M. A. (1995). The visual brain in action. Oxford: Oxford University Press.

Mima, T., Sadato, N., Yazawa, S., Hanakawa, T., Fukuyama, H. et al. (1999). Brain structures related to active and passive finger movements in man. *Brain*, *122*(Pt 10), 1989–97.

Moro, A., Tettamanti, M., Perani, D., Donati, C., Cappa, S. F. et al. (2001). Syntax and the brain: Disentangling grammar by selective anomalies. *Neuroimage, 13*(1), 110–8.

Moseley, R., Carota, F., Hauk, O., Mohr, B. & Pulvermüller, F. (2012). A role for the motor system in binding abstract emotional meaning. *Cerebral cortex*, *22*(7), 1634–47.

Moulton, S. T. & Kosslyn, S. M. (2009). Imagining predictions: mental imagery as mental emulation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 364*(1521), 1273–80.

Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M. & Fried, I. (2010). Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current biology*, *20*(8), 750–6.

Mummery, C. J., Patterson, K., Hodges, J. R. & Price, C. J. (1998). Functional neuroanatomy of the semantic system: divisible by what? *Journal of Cognitive Neuroscience, 10(6)*, 766–77.

Myung, J., Blumstein, S. E. & Sedivy, J. C. (2006). Playing on the typewriter, typing on the piano: manipulation knowledge of objects. *Cognition, 98*(3), 223–43

Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., Huotilainen. M. et al. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature, 385*(6615), 432–4.

Nachev, P., Kennard, C. & Husain, M. (2008). Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nature reviews. Neuroscience*, *9*(11), 856–69.

Nazir, T. A., Boulenger, V., Roy, A., Silber, B., Jeannerod, M. al. (2008). Language-induced motor perturbations during the execution of a reaching movement. *Quarterly journal of experimental psychology (2006)*, *61*(6), 933–43.

Neininger, B. & Pulvermüller, F. (2001). The right hemisphere's role in action word processing: a double case study. *Neurocase, 7*(4), 303–17.

Neininger, B. & Pulvermüller, F. (2003). Word-category specific deficits after lesions in the right hemisphere. *Neuropsychologia, 41*(1), 53-70.

Nikouline, V., Ruohonen, J. & Ilmoniemi, R. J. (1999). The role of the coil click in TMS assessed with simultaneous EEG. *Clinical Neurophysiology, 110*(8), 1325–28.

Nobre, A. C., Allison, T. & McCarthy, G. (1994). Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature, 372*, 260–3.

Noppeney, U., Josephs, O., Kiebel, S, Friston, K..J. & Price, C..J. (2005). Action selectivity in parietal and temporal cortex. *Brain Research. Cognitive Brain Research, 25*(3), 641–9.

Nuzzo, J., Anning, J. & Scharfenberg, J. (2011). The reliability of three devices used for measuring vertical jump height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *25*(9), 2580–90.

Nyberg, L., Eriksson, J., Larsson, A. & Marklund, P. (2006). Learning by doing versus learning by thinking: An fMRI study of motor and mental training. *Neuropsychologia*, *44*(5), 711–7.

Ojemann, G. A. (1991). Cortical organization of language. *Journal of Neuroscience, 11*(8), 2281–87.

Ojemann, G., Ojemann, J., Lettich, E. & Berger, M. (2008). Cortical language localization in left, dominant hemisphere. An electrical stimulation mapping investigation in 117 patients. 1989. *Journal of Neurosurgery*, *108*(2), 411–21.

Oliveri, M., Finocchiaro, C., Shapiro, K., Gangitano, M., Caramazza, A. et al. (2004). All talk and no action: a transcranial magnetic stimulation study of motor cortex activation during action word production. *Journal of cognitive neuroscience*, *16*(3), 374–81.

Paivio, A. (1971). Imagery and verbal processes. New York: Holt, Rinehart Winston.

Palm, G. (1982). Neural Assemblies. Berlin: Springer.

Papathanassiou, D., Etard, O., Mellet, E., Zago, L., Mazoyer, B. et al. (2000). A common language network for comprehension and production: a contribution to the definition of language epicenters with PET. *NeuroImage*, *11*(4), 347–57.

Papeo, L., Vallesi, A., Isaja, A. & Rumiati, R.I. (2009). Effects of TMS on different stages of motor and non-motor verb processing in the primary motor cortex. *PloS one*, *4*(2), e4508.

Passingham, R. E. (1995).The Frontal Lobes and Voluntary Action. Oxford : Oxford University Press.

Patterson, R. D., Uppenkamp, S., Johnsrude, I. S. & Griffiths, T. D. (2002). The processing of temporal pitch and melody information in auditory cortex. *Neuron, 36*(4), 767–76.

Patuzzo, S., Fiaschi, A. & Manganotti, P. (2003). Modulation of motor cortex excitability in the left hemisphere during action observation: a single- and paired-pulse transcranial magnetic stimulation study of self- and non-self-action observation. *Neuropsychologia 41*(9), 1272–8.

Paulignan, Y., Jeannerod, M., MacKenzie, C. L. & Marteniuk, R. G. (1991b). Selective perturbation of visual input during prehension movements. 2. Effects of changing object size. *Experimental brain research, 87*(2), 407–20.

Paulignan, Y., MacKenzie, C., Marteniuk, R. & Jeannerod, M. (1991a). Selective perturbation of visual input during prehension movements. 1. The effects of changing object position. *Experimental brain research, 83*(3), 502–12.

Paus, T., Perry, D. W., Zatorre, R. J., Worsley, K. J. & Evans, A. C. (1996). Modulation of Cerebral Blood Flow in the Human Auditory Cortex During Speech: Role of Motor-to-sensory Discharges. *European Journal of Neuroscience*, *8*(11), 2236–46.

Pecher, D. & Zwaan, R. A. (2005). Grounding Cognition: The Role of Perception and Action in Memory, Language, and Thinking. Cambridge: Cambridge University Press.

Penfield, T. & Rasmussen, W. (1950). The central cortex of man. New York: Macmillan.

Penfield, W. & Welch, K. (1951). The supplementary motor area of the cerebral cortex: a clinical and experimental study. *A.M.A. Archive of Neurology and Psychiatry, 66*(3), 289–317.

Penfield, W. & Boldrey, E. (1937). Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, *60*(4), 389–443.

Péran, P., Démonet, J.-F., Cherubini, A., Carbebat, D., Caltagirone, C. et al. (2010). Mental representations of action: the neural correlates of the verbal and motor components. *Brain Research*, *1328*(1976), 89–103.

Perani, D., Cappa, S.F., Schnur, T., Tettamanti, M., Collina, S. et al. (1999). The neural correlates of verb and noun processing: APET study. *Brain 122*(Pt12), 2337–44.

Perry, H.M. (1939). The relative efficiency of actual and imaginary practice in 5 selected tasks. *Archives of Psychology, 4*, 5–75.

Petersen, S., Fox, P., Posner, M., Mintun, M. & Raichle, M. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, *331*(6157), 585–9.

Petrides, M. & Pandya, D. N. (2009). Distinct parietal and temporal pathways to the homologues of Broca's area in the monkey. *PLoS Biology*, *7*(8), e1000170.

Picard, N. & Strick, P. L. (1996). Motor areas of the medial wall: a review of their location and functional activation. *Cerebral Cortex, 6*(3), 342–53.

Picard, N. & Strick, P. (2001). Imaging the premotor areas. *Current Opinion in Neurobiology, 11*(6), 663–72.

Pinheiro, J.C. & Bates, D. M. (2000). Mixed-effects models in S and S-Plus. New York: Springer-Verlag.

Porro, C., Francescato, M.P., Cettolo, V., Diamond, M.E., Baraldi, P. et al. (1996). Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. *The Journal of neuroscience*, *16*(23), 7688–98.

Posner, M. I. & Raichle, M. E. (1998). L'esprit en image. Bruxcelles: De Boeck Université.

Postle, N., McMahon, K. L., Ashton, R., Meredith, M. & De Zubicaray, G. I. (2008). Action word meaning representations in cytoarchitectonically defined primary and premotor cortices. *NeuroImage*, *43*(3), 634–44.

Preissl, H., Pulvermüller, F., Lutzenberger, W. & Birbaumer, N. (1995). Evoked potentials distinguish nouns from verbs. *Neuroscience Letters, 197*(1), 81–83.

Price, C. J. (1998). The functional anatomy of word comprehension and production. *Trends in cognitive sciences*, *2*(8), 281–8.

Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage*, *62*(2), 816–47.

Price, C. J. & Friston, K. J. (1997). Cognitive conjunction: a new approach to brain activation experiments. *Neuroimage, 5*(4 Pt 1), 261–70.

Price, C. J., Warburton, E. A., Moore, C. J., Frackowiak, R. S. & Friston, K. J. (2001). Dynamic diaschisis: anatomically remote and context-sensitive human brain lesions. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13* (4), 419–29.

Prinz, J. (2002). Furnishing the mind: Concepts and their perceptual bases. Cambridge: MIT Press.

Pugh, K., Shaywitz, B., Shaywitz, S., Fulbright, R., Byrd, D. et al. (1996). Auditory selective attention: an fMRI investigation. *Neuroimage, 4*(3 Pt1), 159–73.

Pulvermüller, F. (1999). Words in the brain's language. *Behavioral and Brain sciences, 22*(2), 253–336.

Pulvermüller, F. (2001). Brain reflections of words and their meaning. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(12), 517–24.

Pulvermüller, F. (2002). The neuroscience of language. Cambridge: Cambridge University Press.

Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*(7), 576–82.

Pulvermüller, F. & Fadiga, L. (2010). Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nature reviews. Neuroscience*, *11*(5), 351–60.

Pulvermüller, F., Härle, M. & Hummel, F. (2000). Neurophysiological distinction of verb categories. *Neuroreport*, *11*(12), 2789–93.

Pulvermüller, F., Härle, M. & Hummel, F. (2001). Walking or talking? Behavioral and neurophysiological correlates of action verb processing. *Brain and Language*, *78*(2), 143–68.

Pulvermüller, F., Hauk, O., Nikulin, V. V. & Ilmoniemi, R. J. (2005a). Functional links between motor and language systems. *The European journal of neuroscience*, *21*(3), 793–7.

Pulvermüller, F., Lutzenberger, W. & Preissl, H. (1999a). Nouns and verbs in the intact brain: evidence from event-related potentials and high-frequency cortical responses. *Cerebral cortex*, *9*(5), 497–506.

Pulvermüller, F., Mohr, B. & Schleichert, H. (1999b). Semantic or lexico-syntactic factors: what determines word-class specific activity in the human brain? *Neuroscience letters*, *275*(2), 81–4.

Pulvermüller, F., Shtyrov, Y. & Ilmoniemi, R. (2003). Spatiotemporal dynamics of neural language processing: an MEG study using minimum-norm current estimates. *NeuroImage*, 20(2),1020–5.

Pulvermüller, F., Shtyrov, Y. & Ilmoniemi, R. (2005b). Brain signatures of meaning access in action word recognition. *Journal of cognitive neuroscience*, *17*(6), 884–92.

Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., Kujala, T. & Näätänen, R. (2004). Word-specific cortical activity as revealed by the mismatch negativity. *Psychophysiology*, *41*(1), 106–12.

Rabahi, T., Fargier, P., Rifai Sarraj, A., Clouzeau, C. & Massarelli, R. (2013). Effect of action verbs on the performance of a complex movement. *PloS one*, *8*(7), e68687.

Rabahi, T., Fargier, P., Rifai-Sarraj, A., Clouzeau, C. & Massarelli, R. (2012). Motor performance may be improved by kinesthetic imagery, specific action verb production, and mental calculation. *Neuroreport*, *23*(2), 78–81.

Rabahi, T., Rifai Sarraj, A., Fargier, P., Clouzeau, C. & Massarelli, R. (2012). Verbe d'action et performance motrice. *Kinésithérapie la Revue, 12*(125), 42–6.

Rauschecker, J. (1998). Cortical processing of complex sounds. *Current opinion in neurobiology*, *8*(4), 516–21.

Recanzone, G. H. (2009). Interactions of auditory and visual stimuli in space and time. *Hearing Research, 258*(1–2), 89–99.

Riehle, A. (2004). Preparation for action: one of the key functions of the motor cortex. In: Motor Cortex in Voluntary Movements: a Distributed System for Distributed Functions (Riehle, A. & Vaadia, E., Eds), pp. 213-40. Boca Raton, FL : CRC-Press.

Rifai Sarraj, A., Khaled, F., Rabahi, T., Fargier, P. & Massarelli, R. (2012). La visuamisation d'un saut vertical améloire la performance d'un geste similaire chez un observateur. *Kinésithérapie la Revue, 12*(125), 47–51.

Rizzolatti, G. & Luppino, G. (2001). The cortical motor system. *Neuron, 31*(6), 889-901.

Rizzolatti, G. & Matelli, M. (2003). Two different streams form the dorsal visual system: anatomy and functions. *Experimental Brain Research*, *153*(2), 146–57.

Rizzolatti, G. & Sinigaglia, C. (2011). Les Neurones miroirs. Paris : Odile Jacob.

Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V. & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain research. Cognitive brain research*, *3*(2), 131–41.

Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(9), 661–70.

Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2002). Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *12*(2), 149–54.

Rocca, M. A., Falini, A., Comi, G., Scotti, G. & Filippi, M. (2008). The mirror-neuron system and handedness: a "right" world? *Human Brain Maping, 29*(11), 1243–54.

Roland, P. E. & Gulyas, B. (1994). Visual imagery and visual representation. *Trends in Neurosciences, 17*(7), 281-7.

Rolls, E. T. (1996). A theory of hippocampal function in memory. *Hippocampus, 6*(6), 601-20.

Rolls, E. T. (2013). A quantitative theory of the functions of the hippocampal CA3 network in memory. *Frontiers in Cellular Neurosciences 7*, 98. doi: 10.3389/fncel.2013.00098. eCollection 2013.

Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C. et al. (1996). Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport, 7*(7), 1280–4.

Rüschemeyer, S. A., Brass, M. & Friederici, A. D. *(2007).* Comprehending prehending: neural correlates of processing verbs with motor stems. *Journal of cognitive neuroscience, 19*(5), 855-65.

Rueschemeyer, S. A., Lindemann, O., Van Rooij, D., Van Dam, W. & Bekkering, H. (2010a). Effects of intentional motor actions on embodied language processing. *Experimental psychology*, *57*(4), 260–6.

Rueschemeyer, S. A., Van Rooij, D., Lindemann, O., Willems, R. M. & Bekkering, H. (2010b). The function of words: distinct neural correlates for words denoting differently manipulable objects. *Journal of cognitive neuroscience*, *22*(8), 1844–51.

Rushworth, M. F., Paus, T. & Sipila, P. K. (2001). Attention systems and the organization of the human parietal cortex. *Journal of Neuroscience, 21*(14), 5262–71.

Sackett, R. S. (1935). The relationship between amount of symbolic rehearsal and retention in maze habit. *The Journal of General Psychology, 13*, 113–28.

Saffran, E. & Scholl, A. (1999). Clues to the functional and neural architecture of word meaning. In: The neurocognition of language (Brown, C.M. & Hagoort, P. Eds.), Oxford: Oxford University Press.

Samar, V. J. & Berent, G. P. (1986). The syntactic priming effect: evoked response evidence for a prelexical locus. *Brain and Language 28*(2), 250–72.

Sato, M., Mengarelli, M., Riggio, L., Gallese, V. & Buccino, G. (2008). Task related modulation of the motor system during language processing. *Brain and language*, *105*(2), 83–90.

Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P. et al. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(46), 18035–40.

Schneider, G. (1969). Two visual systems: Brain mech- anisms for localization and discrimination are dissociated by tectal and cortical lesions. *Science, 163*, 895–902.

Schubotz, R. I. & von Cramon, D. Y. (2002). Predicting perceptual events activates corresponding motor schemes in lateral premotor cortex: an fMRI study. *Neuroimage, 15*(4), 787–96.

Scorolli, C. & Borghi, A. M. (2007). Sentence comprehension and action: effector specific modulation of the motor system. *Brain research*, *1130*(1), 119–24.

Scott, S. K. (2005). Auditory processing--speech, space and auditory objects. *Current Opinion in Neurobiology*, *15*(2), 197–201.

Scott, S. K. & Johnsrude, I. S. (2003). The neuroanatomical and functional organization of speech perception. *Trends in neurosciences*, *26*(2), 100–7.

Scott, S. K. & Wise, R. J. (2004). The functional neuroanatomy of prelexical processing in speech perception. *Cognition, 92*(1-2), 13–45.

Seyal, M., Mull, B., Bhullar, N., Ahmad, T. & Gage, B. (1999) Anticipation and execution of a simple reading task enhance corticospinal excitability. *Clinical Neurophysiology, 110*(3), 424–9.

Shallice, T. (1988). From neuropsychology to mental structure. New York: Cambridge University Press.

Shapiro, K. A., Pascual-Leone, A., Mottaghy, F. M., Gangitano, M. & Caramazza, A. (2001). Grammatical distinctions in the left frontal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*(6), 713–720.

Shtyrov, Y., Hauk, O. & Pulvermüller, F. (2004). Distributed neuronal networks for encoding category-specific semantic information: the mismatch negativity to action words. *European Journal of Neuroscience*, *19*(4), 1083-92.

Shtyrov, Y., Osswald, K. & Pulvermüller, F. (2008). Memory traces for spoken words in the brain as revealed by the hemodynamic correlate of the mismatch negativity. *Cerebral Cortex*, *18*(1), 29–37.

Shtyrov, Y., Pulvermüller, F., Näätänen, R. & Ilmoniemi, R.J. (2003). Grammar processing outside the focus of attention: an MEG study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(8), 1195–206.

Shtyrov, Y., Smith, M. L., Horner, A. J., Henson, R., Nathan, P. J. et al. (2012). Attention to language: novel MEG paradigm for registering involuntary language processing in the brain. *Neuropsychologia*, *50*(11), 2605–16.

Silveri, M. C., Gainotti, G., Perani, D., Cappelletti, J. Y., Carbone, G. et al. (1997). Naming deficit for non-living items: neuropsychological and PET study. *Neuropsychologia, 35*(3), 359–67

Skrandies, W. (1998). Evoked potential correlates of semantic meaning - A brain mapping study. *Cognitive Brain Research, 6*(3), 173–83.

Southgate, V., Johnson, M. H. & Csibra, G. (2008). Infants attribute goals even to biomechanically impossible actions. *Cognition*, *107*(3), 1059–69.

Stanfield, R. A. & Zwaan, R. A. (2001). The effect of implied orientation derived from verbal context on picture recognition. *Psychological Science, 12*(2), 153–6.

Stromswold, K., Caplan, D., Alpert, N. & Rauch, S. (1996). Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain and Language*, *52*(3), 452–73.

Talairach J. & Tournoux P. (1988). Co-planar stereotaxic atlas of the human brain. New York : Thieme.

Talmy, L. (1985). Lexicalization petterns: Semantic structure in lexical forms. In: Language typology and syntactic description (Shopen, T. Ed.), pp 57–149. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Tanji, J. & Kurata, K. (1982). Comparison of movement-related activity in two cortical motor areas of primates. *Journal of Neurophysiology, 48*(3), 633–53.

Tarkiainen, A., Helenius, P., Hansen, P. C., Cornelissen, P. L. & Salmelin, R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, *122(Pt 11*), 2119–32.

Tettamanti, M., Alkadhi, H., Moro, A., Perani, D., Kollias, S. et al. (2002). Neural correlates for the acquisition of natural language syntax. *Neuroimage, 17*(2), 700–9.

Tettamanti, M., Buccino, G., Saccuman, M. C., Gallese, V., Danna, M. et al. (2005). Listening to action-related sentences activates fronto-parietal motor circuits. *Journal of cognitive neuroscience*, *17*(2), 273–81.

Thelen E., Smith, L. B. (1994). A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action. Cambridge, MA: MIT Press.

Toga, A. W. & Thompson, P. M. (2003). Temporal dynamics of brain anatomy. *Annual review of biomedical engineering, 5*, 119-45.

Tokimura, H., Tokimura, Y., Oliviero, A., Asakura, T. & Rothwell, J.C. (1996). Speech-induced changes in corticospinal excitability. *Annals of Neurology, 40(4),* 628-639.

Tomasino, B., Fink, G. R., Sparing, R., Dafotakis, M. & Weiss, P. H. (2008). Action verbs and the primary motor cortex: a comparative TMS study of silent reading, frequency judgments, and motor imagery. *Neuropsychologia*, *46*(7), 1915–26.

Tomasino, B., Weiss, P. H. & Fink, G. R. (2010). To move or not to move: imperatives modulate action-related verb processing in the motor system. *Neuroscience*, *169*(1), 246–58.

Tranel, D., Adolphs, R., Damasio, H. & Damasio, A. R. (2001). A neural basis for the retrieval of words for actions. *Cognitive Neuropsychology, 18*(7), 655–70.

Tranel, D., Damasio, H. & Damasio, A. R. (1997). A neural basis for the retrieval of conceptual knowledge. *Neuropsychologia, 35*(10), 1319–27.

Tranel, D., Damasio, H. & Damasio, A.R. (1998). The neural basis of lexical retrieval. In: Fundamentals of neural network modeling: neuropsychology and cognitive neuroscience (Parks, R. W., Levine, D. S. & Long, D. L. Eds.), pp. 271–96. Cambridge, MA: MIT Press.

Tremblay, P. & Small, S. L. (2011). From language comprehension to action understanding and back again. *Cerebral cortex*, *21*(5), 1166–77.

Trevarthen, C. B. (1968). Two mechanisms of vision in primates. *Psychologische Forschung*, *31*(4), 299–348.

Tschentscher, N., Hauk, O., Fischer, M. H. & Pulvermüller, F. (2012). You can count on the motor cortex: finger counting habits modulate motor cortex activation evoked by numbers. *NeuroImage*, *59*(4), 3139–48.

Turella, L., Pierno, A. C., Tubaldi, F. & Castiello, U. (2008). Mirror neurons in humans: consisting or confounding evidence? *Brain and language*, *108*(1), 10–21.

Ungerleider, L. G. & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In: Analysis of Visual Behavior, Vol. 549 (Ingle, D. J., Goodale, M. A. & Mansfield, R. J. W. Eds.), pp. 549–86. Cambridge, MA: MIT Press.

Van Soest, A. J. & Bobbert, M. F. (1993). The contribution of muscle properties in the control of explosive movements. *Biological Cybernetics*, *69*(3), 195–204.

Varela, F. (1989). Connaitre – Les sciences cognitives tendances et perspectives. Paris : Seuil.

Varela, F., Thompson, E. & Rosch, E. (1993). L'inscription corporelle de l'esprit, sciences cognitives et expérience humain. Paris: Seuil.

Venazio, D. (2009). Sciences cognitives et Phénoménologie: la conscience incarnée. Paris: Connaissances et Savoirs.

Vigneau, M., Jobard, G., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2005). Word and non-word reading: What role for the Visual Word Form Area? *NeuroImage*, *27*(3), 694–705.

Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J.P., Sigman, M. et al. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, *55*(1), 143–56.

Warburton, E., Wise, R. J. S., Price, C. J., Weiller, C., Hadar, U. et al. (1996) Noun and verb retrieval by normal subjects. Studies with PET. *Brain 119*(Pt 1), 159–79.

Watkins, K. E., Strafella, A. P. & Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, *41*(8), 989–94.

Weems, S. A. & Reggia, J. A. (2006). Simulating single word processing in the classic aphasia syndromes based on the Wernicke-Lichtheim-Geschwind theory. *Brain and language*, *98*(3), 291–309.

Wernicke, C. (1874) Der aphasische Symptomenkomplex. Breslau: Cohen and We&art.

Willems, R.M. & Casasanto, D. (2011). Flexibility in embodied language understanding. *Frontiers in psychology*, *2*, 116.

Willems, R. M. & Hagoort, P. (2007). Neural evidence for the interplay between language, gesture, and action: a review. *Brain and language*, *101*(3), 278–89.

Willems, R. M., Toni, I., Hagoort, P. & Casasanto, D. (2009). Body-specific motor imagery of hand actions: neural evidence fromright- and left- handers. *Frontiers in Human Neuroscience, 3*, 39.

Willems, R. M., Toni, I., Hagoort, P. & Casasanto, D. (2010). Neural dissociations between action verb understanding and motor imagery. *Journal of cognitive neuroscience*, *22*(10), 2387–400.

Wilson, S. M., Saygin, A. P., Sereno, M. I. & Iacoboni, M. (2004). Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nature neuroscience*, *7*(7), 701–2.

Wise, R., Scott, S., Blank, S. & Mummery, C. (2001). Separate neural subsystems within Wernicke's area. *Brain*, *124*(Pt1), 83–95.

Woolsey, C. N., Settlage, P. H., Meyer, D. R., Sencer, W., Hamuy, T. P. et al. (1952). Pattern of localization in precentral and "supplementary" motor areas and their relation to the concept of a premotor area. *Association for Research in Nervous and Mental Disease, 30*, 238–64.

Wulf, G. & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simples skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 9*(2), 185–211.

Yi-Rong, N., Si-Yun, S., Zhou-Yi, G., Si-Run, L., Yun, B. et al. (2011). Dissociated brain organization for two-digit addition and subtraction: an fMRI investigation. *Brain Research Bulletin*, *86*(5-6), 395–402.

Young, M. P., Scannell, J. W., Burns, G. & Blakemore, C. (1994). Analysis of connectivity: neural systems in the cerebral cortex. *Reviews in Neurosciences*. 5(3), 227–49.

Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E. & Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, *256*(5058), 846–9.

Zatorre, R. J., Halpern, A. R., Perry, D. W., Meyer, E. & Evans, A.C. (1996). Hearing in the Mind's Ear: A PET Investigation of Musical Imagery and Perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*(1), 29–46.

Zatsiorsky, V. & Seluyanov, V. (1983). The mass and inertia characteristics of the main segments of the human body. In: Biomecanics VIII-B. (Matsui, H., Kobayashi, K. Eds.), pp. 1152–1159. Illinois: Human Kinetics.

Zwaan, R. A. & Taylor, L. J. (2006). Seeing, acting, understanding: motor resonance in language comprehension. *Journal of experimental psychology. General*, *135*(1), 1–11.

Zwaan, R.A. (2004). The immersed experience: toward an embodied theory of language comprehension. In: Psychology of learning and motivation (Ross, B.H. Ed.), pp 35-62. New York: Academic Press.

PUBLICATIONS

PUBLICATION 1

T. Rabahi, P. Fargier, A. Rifai Sarraj, C. Clouzeau & R. Massarelli. *Effect of action verbs on the performance of a complex motor movement*. *PLoS One.* 2013; 8: e68687

OPEN ACCESS Freely available online

PLOS | ONE

Effect of Action Verbs on the Performance of a Complex Movement

Tahar Rabahi[1]*, Patrick Fargier[1], Ahmad Rifai Sarraj[2], Cyril Clouzeau[3], Raphael Massarelli[1]

1 Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport (CRIS, EA 647), Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France, **2** Département de Physiothérapie, Faculté de Santé Publique-I, Université Libanaise Rafic Hariri, Hadath-Beyrouth, Lebanon, **3** Unité de Recherche, Institut Supérieur d'Ostéopathie (ISOSTEO), Limonest-Lyon, France

Abstract

The interaction between language and motor action has been approached by studying the effect of action verbs, kinaesthetic imagery and mental subtraction upon the performance of a complex movement, the squat vertical jump (SVJ). The time of flight gave the value of the height of the SVJ and was measured with an Optojump® and a Myotest® apparatuses. The results obtained by the effects of the cognitive stimuli showed a statistically significant improvement of the SVJ performance after either loudly or silently pronouncing, hearing or reading the verb *saute* (*jump* in French language). Action verbs specific for other motor actions (*pince* = *pinch*, *lèche* = *lick*) or non-specific (*bouge* = *move*) showed no or little effect. A meaningless verb for the French subjects (*tiáo* = *jump* in Chinese) showed no effect as did *rêve* (*dream*), *tombe* (*fall)* and *stop*. The verb *gagne* (*win*) improved significantly the SVJ height, as did its antonym *perds* (*lose*) suggesting a possible influence of affects in the subjects' performance. The effect of the specific action verb *jump* upon the heights of SVJ was similar to that obtained after kinaesthetic imagery and after mental subtraction of two digits numbers from three digits ones; possibly, in the latter, because of the intervention of language in calculus. It appears that the effects of the specific action verb *jump* did seem effective but not totally exclusive for the enhancement of the SVJ performance. The results imply an interaction among language and motor brain areas in the performance of a complex movement resulting in a clear specificity of the corresponding action verb. The effect upon performance may probably be influenced by the subjects' intention, increased attention and emotion produced by cognitive stimuli among which action verbs.

Citation: Rabahi T, Fargier P, Rifai Sarraj A, Clouzeau C, Massarelli R (2013) Effect of Action Verbs on the Performance of a Complex Movement. PLoS ONE 8(7): e68687. doi:10.1371/journal.pone.0068687

Editor: Angela Sirigu, French National Centre for Scientific Research, France

Received January 14, 2013; **Accepted** June 2, 2013; **Published** July 3, 2013

Copyright: © 2013 Rabahi et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: These authors have no support or funding to report.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: taharrabahi@gmail.com

Introduction

The relation between language and motor action has been the domain of philosophy much before becoming that of neuroscience (see: [1]), but in the last decades numerous findings (e.g.: [2–6]) have reported the existence of a probable interaction among the areas involved in language and movement. This has been shown, for example, by the fMRI experiments of Hauk et al [3] showing that silent reading of action verbs *lick*, *pick* and *kick* might apparently activate somatotopically the cerebral motor areas corresponding, respectively, to tongue, hand and foot. Other results ([7,8] and for review see: [9]) have supported the hypothesis that reading action verbs may create specific links between the cortical areas specialised in language, audition and motor action. For instance, during lexical decisions on words related to action, Pulvermüller et al [10] reported that these cortical areas are interconnected in a category-specific manner. In other studies it was found that reading action verbs related to the hand and the arm, facilitates the execution of a reaching movement, when compared to reading other verbs describing mouth and leg actions [11,12]. Hearing sentences that describe hand and foot action may also modulate the corresponding effectors, as it has been verified directly by monitoring motor-evoked potentials [5]. In an fMRI experiment, listening to sentences describing actions performed with the mouth, the hand, or the leg activated a left-hemispheric fronto-parieto-temporal network, known to be activated by action execution and observation [6]. In line with these findings, Dalla Volta et al [13] found that opening the fingers of the hand in response to hearing hand-related verbs was faster than when foot-related verbs were heard; a similar effect was observed on arm velocity during reaching-grasping movements. Other experiments have confirmed that a link between action words and motor performance might indeed exist [14–17], probably through the mediation of a mental simulation process (for review see: [18,19], *vide infra*). Some authors are however more cautious concerning a somatotopic, modal relationship between action verbs understanding and activation of motor areas (see: [20–23]), preferring instead a more amodal 'grounded hypothesis' of interaction among the concerned areas (see for review: [24,25]).

Several hypotheses have been advanced to explain the relation of language and motor actions (see for review: [26,27]). Some authors have suggested that gestures, in particular, may assume the role of a "primitive meaning processor" ([27], p 944) (see also: [28]), while others have advanced the possibility that the effect of words or phrases on the motor system might arise through the mental representation of a given motor action [18,24,29]. Mental representations may create mental images and the use of these has been well studied in the past under the term of *simulation* [30,31], which was intended as the 'mental rehearsal' of a motor action (for

reviews see: [32,33]). Such procedure had been used by athletes and coaches in sport activities as early as the 1930's [34,35] and it has been renamed *kinaesthetic* imagery (KI) later on to clearly distinguish it from visual imagery. The latter represents the mental vision of a movement, while the former concerns the kinaesthetic sensation of the action in the absence of an actual execution [36]. The effects of KI on the amelioration of a gesture performance when executed before the actual motor action have been well documented for simple and complex motor action (for reviews see: [37,38]). The overall research led on the subject suggests then that language, motor, audition, vision and associative areas, including Wernicke's, form a peri-Sylvian circuitry [39] of sensory and motor neurons some of which (mirror neurons) may fulfil both functions (see for review: [9,27,40,41]). This ensemble of cortical areas is partly involved also during KI (for review see: [29]).

The activation of brain functional areas, recruited when using various cognitive stimuli and found in most of the above cited studies, let suppose that the effect of language on the activation of motor areas (in particular premotor areas) may also lead to an improvement of the physical performance of an individual, i.e. having an effect upon the efficiency of a complex movement. Consequently, the experiments that will be presented were realised with the aim to observe the potential effects of action verbs upon the execution of a complex motor action commonly used in biomechanical studies, the Squat Vertical Jump (SVJ) [42]. The leading concept, in the present research, was to observe whether the reported activations solicited in the motor areas by action verbs might produce a macro-scale effect upon an action as complex as the SVJ or might instead resemble to the effect produced in simpler movements as those concerning fingers, hand or arm [11–13,43]. The rationale was based upon results [44,45] showing discordance in motor acquisition when actions of different complexity are executed. Wulf and Shea [44], pointing out that a 'complex' motor action has several degrees of freedom compared to a simpler one, have reached the expected conclusion that motor learning of simple movements is not the same as that of more complex ones, as in the case of the SVJ.

Materials and Methods

General Experimental Procedure

Action verbs were pronounced, heard or read at the second person of the imperative tense, in French, and the effects upon SVJ were studied in seven separate experiments. The possible influence of a specific action verb (*saute* = *jump*) upon the height performance of a SVJ was compared to the effect of KI, which was used here as a control for *jump* considering its known potentiality in improving complex motor action [46]. Possible non-specific effects were verified by: a. Mental calculus (subtractions of two digits numbers from three digits ones); b. verbs specifically describing motor actions other than jumping (*lèche* = *lick* and *pince* = *pinch*) or signifying a failing action (*tombe* = *fall*); c. verbs implying the involvement of affects (not specifying a particular movement but raising feelings and emotions in relation to the goal of the jump: *gagne* = *win* and *perds* = *lose*, or unrelated to the goal: *bouge* = *move* and *rêve* = *dream*, or contradicting the action: *stop*); d. Pronunciation and hearing of a Chinese verb (*tiáo* = *jump*) meaningless for French speaking subjects.

Subjects

This study was approved by the Institutional Review Board of Claude Bernard University. Male French speaking subjects (a total of 114 students of the Faculty of Sport Sciences, University Claude Bernard Lyon 1, of the Institute of Osteopathy, ISOSTEO, Limonest-Lyon and of the Department of Physical Sciences of the Lebanese University, Beyrouth, Lebanon) were asked to participate to the experimental protocol and gave their written and informed consent. The anthropometric average characteristics of all the 114 subjects corresponded to the values for Caucasians (i.e. 104 Europeans: 23.02±2.8 years of age, 177.4±5.7 cm height and 72.3±6.4 kg weight and 10 Mediterraneans: 21.1±1.3 years, 172.9±2.8 cm height and 76.8±3.9 weight [47,48]). The characteristics of the subjects in each experiment are shown in Table 1 and seven different groups of subjects were formed to participate to the seven experiments (one per each experiment). The subjects were briefly instructed before the execution of the experimental protocol, but they were left unaware of the expected results or of possible effects of a given action verb or of any stimulus used in the experimental protocol. The subjects performed SVJs without any previous particular expertise or training and, in this respect, they were considered naïve.

Jumps

The jumps consisted in classical maximal SVJ, i.e.: parallel feet, heels on the ground, separated as wide as the shoulders, knees bent at 90°, hands on hips during the whole jump executed without any noticeable countermovement [42,49].

Experimental Protocols

Before the start of each experiment the subjects were asked to perform some warm-up SVJs for about 5 minutes, to obtain a correct execution of the movement. Afterwards the participants were asked to perform a series of 6 SVJs (each series being called block) with a 3 min rest between blocks (see Figure 1). In a typical block the first 3 jumps were carried without any cognitive conditions (they were defined Baseline Jumps, BJ). The ensuing 3 jumps were executed after the cognitive conditions (lasting 10 s each; Figure 1) as specified below for each experiment. The blocks, comprising BJ and cognitive stimuli, were randomly presented to each subject.

Note that all subjects were asked to draw a particular attention to reach, during the warm-up period, the execution of correct SVJs and the maximal height in order to avoid improper variations in the height of the motor performance in the experimental follow-up. Moreover each subject was told not to communicate with other subjects about the experimental protocol.

Apparatus and Measurement

The heights of the jumps were calculated, by measuring the time of flight, either by an OPTOJUMP® apparatus (Microgate France, 38330 St-Ismier; the apparatus was connected to a Laptop), in experiments 2 and 4, or by an accelerometer Myotest® Pro (Myotest France SAS, 84 210 Pernes les Fontaines), which was used for all other experiments.

A comparison experiment, performed on 8 subjects and using simultaneously both instruments, showed that the absolute heights measured with Myotest® might be higher (6.6 cm in the average) compared to OPTOJUMP®, a value that corresponds well to those found in the literature (Casartelli et al [50] reported values ranging from 5.7 to 6.9 cm). Insignificant differences were instead found between the two instruments in the measures of the effect of the action verb *jump* upon the height of the SVJ when compared, per cent wise, to BJ (when normalised to BJ, Optojump: 106.3±6.9% of height increase after pronouncing *jump*, $n = 44$, experiments 2 and 4; Myotest: 105.9±6.7%, $n = 60$, experiments 3, 5, 6 and 7 group effect: $p = 0.76$, $t = -0.30$; the statistics was performed as specified below).

Table 1. Anthropometric characteristics of experimental subjects.

Experiment	1	2	3	4	5	6	7
Subject (n)	10	28	14	16	16	20	10
Age (years)	21.9±2.6	21.5±2.4	23.2±2.2	23.6±2.4	23.4±2.3	24.9±3.3	21.1±1.3
Height (cm)	176.2±4.1	175.7±6.9	179.2±6.6	178.4±5.2	177.0±5.3	178.7±4.3	172.9±2.8
Weight (kg)	72.1±4.5	70.3±7.0	75.0±7.4	73.4±5.6	70.9±6.7	73.2±5.8	76.8±3.9

As mentioned in the Material and Methods section, the 114 male subjects were from the Faculty of Sport Sciences (UFR STAPS, experiment 2 and 4), the Institute for Osteopathy ISOSTEO (experiments 1, 3, 5 and 6) and the Department of Physical Education of the Lebanese University (experiment 7). The presented values correspond to European anthropometric standards in the age range [47,48]. No statistical difference among the anthropometric values was found ($p<0.063$, $F=2.0714$).
doi:10.1371/journal.pone.0068687.t001

Experiment 1: Reference Subjects

A control experiment was performed on 10 reference subjects (see Table 1) to check the presence of a possible effect of training. This was done according to the same protocol described in Figure 1 with the exception that no cognitive task was demanded to the subjects.

Experiment 2: Pronouncing the Specific Action Verb and Comparison to Non-specific Stimuli

Twenty eight subjects (see Table 1) executed the following cognitive conditions: a. loud pronunciation of the specific action verb *jump* (the verb was repeated 9–10 times, during 10 s, with a steady, monotone, low voice), b. silent pronunciation (S-*jump*) was repeated in a similar way as when loudly pronounced, c. mental subtraction (MS) that was used as a control measure of a non-specific stimulus for the *jump* effect (the subjects were asked to mentally subtract two digit numbers from three digit ones) and d. kinaesthetic imagery (KI; the subjects were asked to feel the movement, without realising it) also used as a possible control for the effect of the action verb *jump*. Prior to the start of the experiment the subjects completed the revised version of the Movement Imagery Questionnaire (MIQ, [51]) to measure the individual ability in kinaesthetic imagery. No significant correlation was found between the values of MIQ and the performance after KI ($r^2=-0.09$; Pearson's test).

Experiment 3: Reading the Specific Action Verb

The action verb *jump* was projected on a black screen (the image was 1.3 m long, in diagonal) and the participants (see Table 1) stood at a distance of 3.5 m from the wall (as specified by the manufacturer, Optoma/ThemeScene® projector, 92100 Boulogne-Billancourt, France). The action verb was written in white (Police: Times New Roman, font 110) on a black background. The subjects carried out 6 cognitive conditions, each lasting 10 s: a. reading loudly *jump* (R-*jump*) written on the middle of the screen; b. reading silently the action verb (RS-*jump*); c. reading loudly *jump* that was moving bottom-up on the screen (Rm-*jump*; the movement speed of the verb was set on medium mode, Microsoft PowerPoint 2007® software); d. reading silently *jump* as in c (RSm-*jump*); e. pronouncing *jump* without visual support as in experiment 2, used as a first specific control; f. looking at the blank unlighted screen as a second control condition.

Experiment 4: Pronouncing Non-specific Action Verbs

Sixteen participants (see Table 1) were asked to perform experimental blocks where the selected verbs either described the specific action (*jump* was used as the standard specific action verb) or actions concerning the fingers (*pinch*) or the tongue (*lick*), while a meaningless verb for all subjects (*tiáo* = *jump*, in Pinjing Chinese) was used as a semantic control.

Experiment 5: Hearing Non-specific Action Verbs

The same experimental protocol used in the previous experiment was here performed with the difference that verbs were not pronounced but were heard by 16 subjects (see Table 1). The action verbs were previously recorded by an experimenter and pronounced once per second with the same tone and pace employed when the subjects pronounced them. The recording was listened for 10s before the execution of the SVJ.

Experiment 6: Pronouncing Emotion and Feeling Verbs

Twenty subjects (see Table 1) took part in this experiment and five verbs were selected as cognitive stimuli: *gagne* (*win*), *perds* (*lose*, considered as the antonym of the previous), *rêve* (*dream*), *bouge* (*move*)

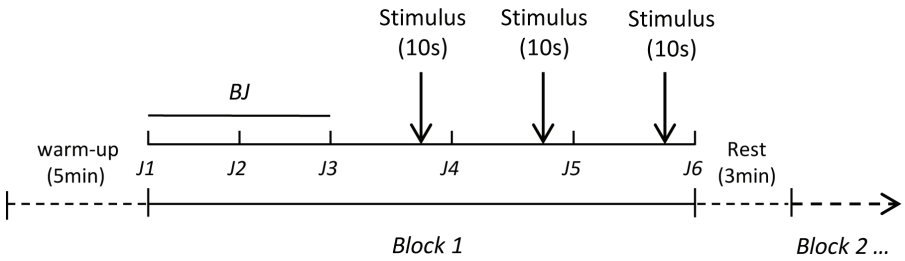


Figure 1. Protocol design. Before the start of the experiment the subjects were asked to perform some warm-up jumps, for about 5 minutes, to obtain a correct execution of the movement. The jumps consisted in classical maximal squat vertical jumps (SVJ). The heights of the jumps were measured as described in Material and Methods (section *Jump*). In a typical block the first 3 jumps were carried without cognitive conditions (to be called baseline jumps, BJ). The following 3 jumps were executed separately after the cognitive stimulus (repeated three times for 10 s before each jump). A rest period of 3 min was observed before a following block.
doi:10.1371/journal.pone.0068687.g001

Table 2. Effect of action and other verbs upon the height of the SVJ.

Experiment 1 (n = 10)							
Condition	BI	J1	J2	J3	J4	–	–
mean±SD	31.8±4.3	30.6±3.5	31.1±3.9	31.1±3.7	31.4±3.2	–	–
p–value	–	.52	.95	.95	.99	–	–
z–value	–	1.95	1.14	1.13	–.88	–	–
Experiment 2 (n = 28)							
Condition	BJ	KI	Jump	S–Jump	MS	–	–
mean±SD	29.2±3.8	30.6±4.4	31.0±4.2	31.0±4.9	30.4±4.1	–	–
p–value	–	<.01	<.001	<.001	.02	–	–
z–value	–	3.49	4.66	4.68	3.13	–	–
Experiment 3 (n = 14)							
Condition	BJ	Jump	R-Jump	RS-Jump	Rm-Jump	RSm-Jump	Blank screen
mean±SD	32.6±3.6	35.3±2.9	34.8±3.0	34.8±2.9	35.1±2.6	34.7±2.9	32.6±3.1
p-value	–	<.001	<.01	<.01	<.001	<.01	1
z-value	–	−5.00	−3.97	4.04	−4.55	3.80	.05
Experiment 4 (n = 16)							
Condition	BJ	Jump	Lick	Pinch	Tiào	–	–
mean±SD	29±5.5	30.6±5.2	29.5±4.9	29.9±4.7	29.2±5.0	–	–
p-value	–	<.01	.78	.13	.99	–	–
z-value	–	3.72	1.14	2.34	.84	–	–
Experiment 5 (n = 16)							
Condition	BJ	H-Jump	H-Lick	H-Pinch	H-Tiào	–	–
mean±SD	32.7±4.0	34.5±3.9	33.5±3.9	33.2±4.5	32.8±4.9	–	–
p-value	–	<.001	.30	.83	.99	–	–
z-value	–	4.13	1.94	1.04	.21	–	–
Experiment 6 (n = 20)							
Condition	BJ	Jump	Win	Lose	Move	Dream	–
mean±SD	33.4±3.6	34.8±3.5	35.0±3.6	34.7±4.3	34.2±3.4	34.0±3.9	–
p-value	–	.006	<.001	.018	.36	.64	–
z-value	–	3.49	−4.10	3.19	−1.96	1.54	–
Experiment 7 (n = 10)							
Condition	BJ	H-Jump	H-Fall	H-Stop	–	–	–
mean±SD	29.8±0.9	31.7±0.4	29.8±0.7	29.9±0.7	–	–	–
p-value	–	<.001	.99	1	–	–	–
z-value	–	7.97	−.13	.10	–	–	–

Squat Vertical Jumps (J_1 to J_4, SVJ) were executed, in experiment 1, in the absence of cognitive stimuli; BJ: control jump; experiment 2 was performed to observe the effect of various cognitive stimuli such as KI (kinaesthetic imagery), the pronunciation of the specific action verb *jump* or its silent pronunciation (S-*jump*), subjects also performed a mental subtraction (MS, three digits minus two digits, the result was told at the end of the experiment); experiment 3 studied the reading (R) of *jump* under different modalities: the control was its pronunciation as in the precedent experiments, *R*: the subjects were asked to read loudly or silently (RS) the verb written on a screen, in Rm the verb was read loudly while moving bottom-up on the screen (moderate speed on Power Point software), (RSm) idem as in Rm, but the reading was silently performed, as control (*blank screen*) the subjects were asked to jump in front of the white (not lighted) screen; the effect of other action verbs (*lick, pinch* and *tiáo*) was studied in experiment 4; hearing action verbs (H) was studied in experiment 5 where subjects heard the same action verbs that in experiment 4 (H-*lick, H-pinch* and H-*tiáo*), through the voice of an experimenter, and in experiment 7 (H-*jump*, H-*fall* and H-*stop*). In experiment 6, the effect of the pronunciation of other non specific verbs upon the SJV height was realised with verbs *jump* (used as control), *win*, *lose*, *move* and *dream*. In all experiments the cognitive stimuli were randomized. The data are expressed as cm ± standard deviation (SD) and probability p and the z-score.

doi:10.1371/journal.pone.0068687.t002

Table 3. Normalized Data: Influence of different cognitive stimuli upon SVJ performance.

Experiment 1 (n = 10)							
Condition	BI	J1	J2	J3	J4	–	–
Mean±SD	100.0%	96.4±5.7	98.1±8.5	98.2±8.6	99.0±8.9	–	–
p-value	–	.45	.90	.92	.99	–	–
z-value	–	1.67	.98	.83	.44	–	–
Experiment 2 (n = 28)							
Condition	BJ	Jump	S-Jump	KI	MS	–	–
Mean ±SD	100.0%	106.5±7.5	106.1±7.7	104.6±5.8	104.4±7.8	–	–
p-value	–	<.001	<.001	.008	.014	–	–
z-value	–	4.69	4.40	3.31	3.16	–	–
Experiment 3 (n = 14)							
Condition	BJ	Jump	R-Jump	RS-Jump	Rm-Jump	RSm-Jump	Blank screen
Mean ±SD	100.0%	108.9±11.0	107.0±7.3	107.3±9.8	108.2±8.3	106.9±8.9	100.1±4.7
p-value	–	<.001	.001	.001	<.001	.003	1
z-value	–	−5.00	−3.97	4.04	−4.55	3.80	.05
Experiment 4 (n = 16)							
Condition	BJ	Jump	Lick	Pinch	Tiào	–	–
Mean ±SD	100.0%	106.1±5.8	102.3±5.9	104.4±8.7	101.4±7.2	–	–
p-value	–	.001	.61	.043	.91	–	–
z-value	–	3.79	1.42	2.78	.86	–	–
Experiment 5 (n = 16)							
Condition	BJ	H-Jump	H-Lick	H-Pinch	H-Tiào	–	–
Mean ±SD	100.0%	105.5±5.3	102.6±3.6	101.2±4.4	100.1±5.3	–	–
p-value	–	<.001	.30	.89	1	–	–
z-value	–	4.13	1.92	.91	.05	–	–
Experiment 6 (n = 20)							
Condition	BJ	Jump	Win	Lose	Move	Dream	–
Mean ±SD	100.0%	104.1±4.0	104.9±5.8	103.6±5.5	102.5±5.9	101.9±6.1	–
p-value	–	.003	<.001	.014	.22	.55	–
z-value	–	3.70	−4.37	3.25	−2.24	1.67	–
Experiment 7 (n = 10)							
Condition	BJ	H-Jump	H-Fall	H-Stop	–	–	–
Mean ±SD	100.0%	106±3.7	99.7±2.1	100.1±2.5	–	–	–
p-value	–	<.001	.98	.99	–	–	–
z-value	–	7.35	−.39	.12	–	–	–

The absolute results in centimetres (see table 2) were normalized with respect to the respective baseline jumps (BJ) to give the per cent values of increase or decrease produced by the various stimuli.

doi:10.1371/journal.pone.0068687.t003

as a general action verb and *jump* as the control specific action verb.

Experiment 7: Hearing Actions Verbs Contradicting SVJs

Ten francophone subjects (see table 1) heard the verbs *saute* (*jump*), *tombe* (*fall*) and *stop* before the execution of the SVJ. The verbs were heard and not pronounced in order to produce a surprise in the subjects; the verbs were thus registered and listened by the subjects as in experiment 5.

Statistical Analysis

Statistical analysis was performed using the software R2.11.1® (www.r-project.org). Analysis of variance for repeated measures (rANOVA) was used to examine the effect of the various

conditions followed by the post-hoc Tukey's test. Both were combined with the linear Mixed Effects Model [52], which was used to compare different conditions and taking into consideration the inter subjects' variability. Statistical significance was set at 2-tail $p<0.05$.

Results

Experiment 1

This experiment was performed to show whether the repetition of SVJ might have a training effect upon the performance of reference subjects. The results (Table 2; group effect: $p = 0.55$, $F = 0.76$) showed that this was not the case. Moreover when the data were normalized to BJ (in per cent of BJ height) they showed a non-significant decrease in the height values (from 96.4±5.7% for J1 to 99.0±8.9% for J4; Table 3).

Experiment 2

The experiment showed a significant group effect ($p<0.001$, $F = 7.32$) and an improvement in SVJs was observed when the subjects pronounced loudly the verb *jump* ($p<0.001$, $z = 4.66$; Table 2) or when they did so silently (without moving lips or tongue) prior to the jump (S-*jump*; $p<0.001$, $z = 4.68$). Kinaesthetic Imagery produced an increase in height ($p<0.01$, $z = 3.49$), thus confirming the potentiality of KI upon the motor execution of even a complex motor task as the SVJ. A height improvement was also obtained when the performed cognitive stimulus was a mental subtraction (MS; $p = 0.02$, $z = 3.13$). The effect of each cognitive condition revealed that the height of SVJ was significantly improved also when the data were normalized to BJ (Table 3) (from 104.4±7.8% for MS, $p = .014$, $z = 3.16$ up to 106.5±7.5%, $p<.001$, $z = 4.69$ for *jump*).

Experiment 3

The results of the third experiment (Table 2) revealed the effect of adding a visual stimulus to the loud or silent pronunciation of *jump*. Reading (R) the action verb shown on a screen was effective in increasing the performance of SVJs either if read and loudly pronounced (R-*jump*; $p<0.01$, $z = -3.97$) or if silently read (RS-*jump*; $p<0.01$, $z = 4.04$), but it was not significantly different from the loud pronunciation of the verb without reading (*jump*; $p<0.001$, $z = -5.0$; Table 2). When the action verb was moving bottom-up on the screen, no additional effect was observed (Rm-*jump*: $p<0.001$, $z = -4.55$; RSm-*jump*: $p<0.01$, $z = 3.8$). The control condition, looking at the blank screen before jumping, did not affect the height of the jump ($p = 1.0$, $z = 0.05$). In any case there was no observable significant difference between pronouncing *jump* and reading it fixed or moving bottom-up. The normalization towards BJ gave results comparable to the absolute values (from 106.9±8.9% for RSm-*jump* up to 108.9±11.0 for *jump*; see Table 3 for statistical significance) indicating that reading and pronouncing were similarly effective.

Experiment 4

The pronunciation of verbs such as *lick* and *pinch* did not show statistically significant effects (Table 2; $p = 0.78$, $z = 1.14$ and $p = 0.13$, $z = 2.34$, respectively). In semantic coherence, the meaningless verb *tiáo* did not affect the height performance ($p = 0.99$, $z = 0.84$) and the normalisation of the values with respect to BJ (Table 3) gave similar results, excepted for *pinch*, which showed a statistically significant improvement in the height of the SVJ (104.4±8.7%, $p = 0.043$, $z = 2.78$), when normalized to BJ (Table 3). However, note that hearing *pinch* (H-*pinch*) did not show any significant improvement (see next experiment).

Experiment 5

The possible effect of hearing (H) these action verbs (Table 2 and 3) gave similar results when compared to their pronunciation. H-*jump* ameliorated significantly the SVJ height ($p<0.001$, $z = 4.13$) but neither did H-*lick* ($p = 0.30$, $z = 1.94$) nor H-*pinch* ($p = 0.83$, $z = 1.04$). The height of SVJs after hearing the meaningless verb *tiáo* was almost identical to that observed in BJs ($p = 0.99$, $z = 0.21$). The comparison of the normalized values between pronounced and heard action verbs gave similar results (Table 3).

Experiment 6

This experiment (Table 2) showed that the height of the jumps was enhanced by the action verb *jump* ($p = 0.006$, $z = 3.49$) and significantly affected by the loud pronunciation of *win*, a verb which may have an emotional association to the physical performance ($p<0.001$, $z = -4.1$). However a significant effect was also found with the antonym *lose* ($p = 0.018$, $z = 3.19$) and this was confirmed when the values were normalized to BJ (table 3; $p = 0.014$, $z = 3.25$). The loud pronunciation of *dream* did not affect the performance of the jump ($p = 0.64$, $z = 1.54$) and the same was observed with the non-specific action verb *move* ($p = 0.36$, $z = -1.96$). The meaningless verb *tiáo* was not included in this experiment in order not to burden the task of the subjects with too many stimuli and risk an unwanted sense of fatigue in the subjects.

Experiment 7

The last experiment of the study (Table 2 and 3) was performed to further control the effect of verbs signifying actions opposing the SVJ. To further test the reproducibility of the protocol with other subjects that French nationals, the experiment was performed at the Department of Physiotherapy, Lebanese University (the subjects were students at the Department of Physical Education). The results show a significant group effect ($p<0.001$, $F = 31.86$) with the expected increase of about 2 cm after hearing the verb *jump* (31.7±0.4 vs 29.8±0.9 for BJ, $p<0.001$, $z = 7.97$) and no effect after *fall* (29.8±0.7, $p<0.99$, $z = - 013$) or *stop* (29.9±0.7, $p<1$, $z = 0.1$).

General Comments Concerning the Experimental Setting

It is important to note that all the subjects participating to the study were asked, at the end of each experiment, if they had carefully understood the meaning of the verbs and this was confirmed; moreover the subjects stated that they kept obeying, throughout the experiment, to the instruction given at the beginning of the experiment to execute maximum SVJ (this was necessary to avoid inevitable large variations in the values of the heights).

Furthermore, when all the values obtained with the stimulus *jump*, as delivered in experiments 2 to 7 (Table 2), were summed up the results gave an improvement of 2.0 cm (32.8±4.2 cm vs 30.8±4.2 cm for BJ, $p<.001$, $z = 9.43$, $n = 114$) representing an average increase of 106.8±7.5% of the total jump height ($p<.001$, $z = 8.99$). Moreover, when all the values obtained, in each experiment, by the action verb *jump* were compared one to the other no statistically significant difference was observed among them (the group effect gave $p = 0.88$, $F = 0.35$ when analysed by a one factor ANOVA). Improvements were also obtained with MS (104.4±7.8%), KI (104.6±5.8%) and with the verbs *pinch* (104.4±8.7%; but not H-*pinch*, 101.2±4.4%), *win* (104.9±5.8%) and *lose* (103.6±5.5%) (see Table 3). The meaningless verb *tiáo* did not produce any significant increase in height and its value was quite similar to that of BJ, much as the observation of a blank

screen in experiment 3, and verbs *lick*, *dream*, *move*, *fall* and *stop* showed also no statistically significant effect.

Discussion

The relationship between language and action is based upon experimental evidence reporting the involvement of pre-central frontal cortical areas (premotor, primary motor and Broca's areas) in the expression of language ([10], for a review see: [9,53]) and in action understanding [54]. Conversely, it has also been found that language, and in particular action verbs, may stimulate motion. This was done with kinematic studies, usually after reading action words, and by measuring the velocity in grasping or reaching [11,12]. The observed results showed functional activations in corresponding cortical motor areas [3,8]. The present findings confirm the relation between language and motion and show that the pronunciation, the enunciation, the hearing and the reading of a specific action verb (*jump*) improve subjects' performance of a complex movement as a SVJ. Furthermore, the height improvement produced by this action verb is comparable to the effects produced by KI, which is a well-known stimulus used to enhance physical performance (see for review: [55]).

One of the findings arising from studies reported in the literature shows the possibility that the cerebral cortex, organised in specialised areas, may not appear as clearly structured as it was represented in Talairach and Tornoux's [56] atlas of the brain cortex (see for example: [40,41]). It is a common observation among neuro-anatomists and, particularly, neurosurgeons that the brain circumvolutions are as complex and varied as human fingerprints and, consequently, that each brain is hardly similar to another one. In fact, already Penfield and Boldrey, in their seminal article on intra-cortical electrical stimulation in epileptic patients [57], observed that the brain cortical differences are not only anatomo-morphologic but also functional. Other findings have shown that the relations among word listening, pronunciation and comprehension, and the motor areas imply their participation and interaction into peri-Sylvian circuitries that modulate these functions (see: [9,58,59]). As a consequence the possibility that the brain functional activity corresponds to the regulation of compartmentalised, highly specialised cortical areas does not seem to be confirmed by recent findings as more complex interactions correlate one area to the other through very intricate circuitries (for review see: [18,20,21]).

The present findings have led to the main following results: 1. The four types of stimuli that were given to the naïve subjects: loudly and silently pronouncing, hearing and reading a significant and specific action verb (*jump*; at the second person of the French imperative), ameliorate the height of SVJs; 2. Kinaesthetic Imagery, known to stimulate motor action, improved the performance and so did mental subtraction (MS, *vide infra*); 3. When the SVJ was preceded by the pronunciation of action verbs having no specificity in relation to SVJs (*lick* and *pinch*) a statistically not significant increase in the SVJ height was usually observed. The only exceptions appeared with *pinch* after normalization of the data to BJ (although at the limit of significance, $p = 0.043$, $z = 2.78$); 4. Verbs capable of raising an affect but not specific to SVJ, as *gagne* (*win*) and its antonym *perds* (*lose*), increased the height of the SVJ, while a verb having no relation to motor action but a peculiar emotionality (*dream*) led to a not significant effect; similarly, a verb having a relation to movement (*move*) was not effective; 5. The addition of a visual stimulus, i.e.: when the specific action verb *jump* was read on a screen, immobile or moving from bottom up at a steady pace, it led to an improvement of the jump height. The effect of reading *jump* was not different to pronouncing it (without visual stimulus); 6. All verbs used in the study, however, increased, even if not significantly, the SVJ height (with the exception of the senseless *tiáo* and blank screen when reading in experiment 3; see Tables 2 and 3), possibly implying that verbs having a poor specificity and an affective touch, may increase the height, as it was observed in the case of *win* and *lose* (Experiment 6, Tables 2 and 3) (it should be kept in mind though that these two verbs may be related to a physical effort, contrary to *dream* and *move*, which in fact showed no statistically significant influence on the jumps; emotions might then be important in influencing the motor action [60,61], particularly if related to the motion); 7. In an attempt to assure the specificity of hearing the verb *jump* a seventh experiment was performed to compare its effect to that of *fall* and *stop* (Table 2 and 3). The two verbs opposing to the motor action did not show any effect, much as it was observed with *tiáo*. It might have been expected a decrease in the value of the jumps, but the results are in line with the instruction given at the beginning of each trial, to each subject individually, to execute a maximum SVJ. This confirms that the not significant effects observed in table 3 were possibly the consequence of the *intention* and *attention* of each individual to the given task, i.e.: to perform a maximum SVJ regardless the given stimulus (see below).

An interesting result concerned the effect of simple calculus. Arithmetic is known to activate motor brain areas when an exact answer is demanded [62,63]. Such correlation between simple calculus and the activation of motor areas was the reason that brought to the use of the mental subtraction in the present study, even if the main purpose was to use it as a control for *jump*; the results showed a significant improvement of the SVJ heights after mental subtraction (Table 2 and 3). A possible explanation for this effect may be the reported activation of language areas while calculating in mother tongue (French in this case) [64] and of motor areas found during exact arithmetic [65]. Moreover, and contrary to *tiáo* (senseless verb for whoever is not a sinophone), arithmetic has a significance for all humans representing, much as movement and gestures, a particular form of communication [66]. If this is the answer for the observed effect of calculus upon SVJ height, it may be understandable that a form of communication might improve motor action, probably because of the primitive information qualities of motor actions (gestures), quite common in several cultures in support to language (see: [23]).

The effects observed after KI and after visual observation (when reading) of the action verb require some further comments. As it has been mentioned in the introduction, KI is the kinaesthetic feeling of the motor action that, in the present experiments, was used as a control for the action verb *jump*. The fact that, under the present experimental conditions, KI might also improve the performance of the SVJ gives a further impact of kinaesthetic imagery upon a complex motion.

The improvement in performance induced by some of the stimuli used in the study did not completely follow the specificity usually described in the literature. One possible reason in the discordance may be related to the nature of the motor action itself. A Squat Vertical Jump is a rigorous well-known movement used in biomechanical studies for its reproducibility and the number of information that may be derived from a congruous analysis of the motor action. Compared to a grasping or reaching movement, in neuro-functional terms, a SVJ is a more complex movement as it includes the individual's *intention*, *attention*, *learning*, *automatisms*, *perceptions*, *understanding*, *conceptualisation*, etc.; in other terms, the SVJ movement involves the functional activation of most part of the central sensory-motor systems, including the partial participation of the peripheral nervous systems ([67,68] and for review [21,24]).

From this point of view, the data are in line with the finding that a difference exists in learning and executing movements of different complexity (see [44,45]).

In an attempt to reach a tentative conclusion for the present results it seems possible that the intention of the individual, the attention that she/he gives to the motor act [67] and the emotional status produced by words [60,61] may lead to an interaction of language areas with motor areas to eventually improve performance. This may be particularly so in the case of a complex movement as SVJ.

Conclusion

The present results indicate that specific cognitive stimuli, such as the verb *jump* or KI, improved the performance of SVJs when related to the complex motor action. However, non-specific cognitive stimuli (verbs *win*, *lose*, *pinch* and MS) might also implement the jump (see Table 3 and for review see: [21]). Emotions, represented by verbs *win* and *lose*, may play an important role as it has been recently suggested [60] (especially during a physical effort) and the attention of the individual has also been suggested in the interaction between language and motor action [67], which may possibly happen through a mental simulation process [24,69].

The present data indicate an improving effect of the action verb specific for the SVJ, but they do not seem to indicate an exclusive specificity probably because of the complexity of SVJ. It might also be suggested that it is not only the specificity of the verb that is important but also the intentionality raised in the subject when pronouncing or expressing or hearing any meaningful action verb (for the role of the fronto-parietal cortex in the intention, planning and decision making in sensory-motor actions, see: [68]). This may include other cognitive means such as KI and calculus.

Acknowledgments

Our warm thanks to Dr Stéphane Champely for his valuable help in the statistical analysis of the data.

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: TR PF ARS RM. Performed the experiments: TR CC RM. Analyzed the data: TR PF RM. Contributed reagents/materials/analysis tools: CC RM. Wrote the paper: TR PF RM.

References

1. Gentilucci M, Corballis MC (2006) From manual gesture to speech: A gradual transition. Neurosci Biobehav Rev 30: 949–960.
2. Gentilucci M, Cangitano M (1998) Influence of automatic word reading on motor control. Eur J Neurosci 10: 752–756.
3. Hauk O, Johnsrude I, Pulvermüller F (2004) Somatopic representation of action words in human motor and pre-motor cortex. Neuron 41: 301–307.
4. Aziz-Zadeh L, Wilson SM, Rizzolatti G, Iacoboni M (2006) Congruent embodied representations for visually presented actions and linguistic phrases describing actions. Curr Biol 16: 1818–1823.
5. Buccino G, Riggio L, Melli G, Binkofski F, Gallese V, et al. (2005) Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: a combined TMS and behavioral study. Brain Res Cogn Brain Res 24: 355–363.
6. Tettamanti M, Buccino G, Saccuman MC, Gallese V, Danna M, et al. (2005) Listening to action-related sentences activates fronto-parietal motor circuits. J Cogn Neurosci 17: 273–281.
7. van Dam WO, Rueschemeyer SA, Bekkering H (2010) How specifically are action verbs represented in the neural motor system: an fMRI study. Neuroimage 53: 1318–1325.
8. Kemmerer D, Castillo JG, Talavage T, Patterson S, Wiley C (2008) Neuroanatomical distribution of five semantic components of verbs: Evidence from fMRI. Brain Lang 116: 16–43.
9. Pulvermüller F, Fadiga L (2010) Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. Nature Rev 11: 351–360.
10. Pulvermüller F, Hauk O, Nikulin VV, Ilmoniemi RJ (2005) Functional links between motor and language systems. Eur J Neurosci 21: 793–797.
11. Boulenger V, Roy AC, Paulignan Y, Deprez V, Jeannerod M, et al. (2006) Crosstalk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. J Cogn Neurosci 18: 1607–1615.
12. Nazir TA, Boulenger V, Roy A, Silber B, Jeannerod M, et al. (2008) language-induced motor perturbations during the execution of a reaching movement. Q J Exp Psychol 61: 933–943.
13. Dalla Volta R, Gianelli C, Campione GC, Gentilucci M (2009) Action word understanding and overt motor behavior. Exp Brain Res 196: 403–412.
14. Péran P, Démonet JF, Cherubini A, Carbebat D, Caltagirone C, et al. (2010) Mental representations of action: The neural correlates of the verbal and motor components. Brain Res 1328: 89–103.
15. Boulenger V, Hauk O, Pulvermüller F (2009) Grasping ideas with the motor system: semantic somatotopy in idiom comprehension. Cereb Cortex 19: 1905–1914.
16. Gentilucci M, Campione GC, De Stefani E, Innocenti A (2012) Is the coupled control of hand and mouth postures precursor of reciprocal relations between gestures and words? Behav Brain Res 233: 130–140.
17. Hauk O, Pulwermüller F (2011) The lateralization of motor cortex activation to action-words. Front Human Neurosci 5:149. doi:10.3389/fnhum.2011.00149.
18. Willems RM, Casasanto D (2011) Flexibility in embodied language understanding. Front Psychol 2: 1–11.
19. Fischer MH, Zwaan RA (2008) Embodied language: a review of the role of the motor system in language comprehension. Quart J Exper Psychol 61: 825–850.
20. Fernandino L, Iacoboni M (2010) Are cortical motor maps based on body parts or coordinated actions? Implications for embodied semantics. Brain Lang 112: 44–53.
21. Bedny M, Caramazza A (2011) Perception, action, and word meanings in the human brain: the case from action verbs. Ann NY Acad Sci 1224: 81–95.
22. Postle N, McMahon K, Ashton R, Meredith M, de Zubicaray GI (2008) Action word meaning representations in cytoarchitectonically defined primary and premotor cortices. Neuroimage 43: 634–644.
23. Willems RM, Hagoort P (2007) Neural evidence for the interplay between language, gesture, and action: A review. Brain Lang 101: 278–289.
24. Barsalou LW (1999) Perceptual symbol systems. Behav Brain 22: 557–560.
25. Mahon BZ, Caramazza A (2008) A critical look at the embodied cognition hypothesis and a new proposal for grounding conceptual content. J Physiol Paris 102: 59–70.
26. Gentilucci M, Dalla Volta R (2008) Spoken language and arm gestures are controlled by the same control system. Quart J Exper Psychol 61: 944–957.
27. Cappa SF, Pulwermüller F (2012) Cortex special issue: Language and motor system. Cortex 48: 785–944.
28. Pulvermüller F (2005) Brain mechanisms linking language and action. Nat Rev Neurosci 6: 576–582.
29. Gallese V, Lakoff G (2005) The brain's concepts: The role of the sensory-motor system in conceptual knowledge. Cogn Neuropsychol 21: 455–479.
30. Ingvar D, Phillipson L (1977) Distribution of cerebral blood flow in the dominant hemisphere during motor ideation and motor performance. Ann Neurol 2: 230–237.
31. Driskell JE, Copper C, Moran A (1994) Does Mental Practice Enhance Performance? J Appl Physiol 79: 481–492.
32. Jeannerod M (1995) Mental imagery in the motor context. Neuropsychologia 33: 1419–1432.
33. Decety J, Grèzes J (2006) The power of simulation: Imagining one's own and other's behavior. Brain Res 1079: 4–14.
34. Sackett RS (1935) The relationship between amount of symbolic rehearsal and retention in maze habit. J Gen Psychol 13: 113–130.
35. Perry HM (1939) The relative efficiency of actual and imaginary practice in 5 selected tasks. Arch Psychol 4: 5–75.
36. Schuster C, Hilfiker R, Amft O, Scheidhauer A, Butler J, et al. (2011) Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training element in five different disciplines. BMC Med 17: 9–75.
37. Guillot A, Di Rienzo F, Macintyre T, Moran A, Collet C (2012) Imagining is not doing but involves specific motor commands: a review of experimental data related to motor inhibition. Front Hum Neurosci 6: 1–22.
38. Lotze L, Halsband U (2006) Motor imagery. J Physiol Paris 99: 386–395.
39. Catani M, Jones DK, ffytche DH (2005) Perisylvian language networks of the human brain. Ann Neurol 57: 9–16.
40. Rizzolatti G, Sinigaglia C (2010) The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. Nature Rev 11: 264–274.
41. Rizzolatti G, Sinigaglia C (2010) So quel che fai. Il cervello che agisce e i neuroni specchio. Milano: Raffaello Cortina Editore.
42. Hubley CL, Wells RP (1983) A Work-Energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump performance. Eur J Appl Physiol 50: 247–254.
43. Frak V, Nazir T, Goyette M, Cohen H, Jeannerod M (2010) Grip force is part of the semantic representation of manual action verbs. PloS One 5: e9728.
44. Wulf G, Shea CH (2002) Principles derived from the study of simples skills do not generalize to complex skill learning. Psychon Bull Rev 9: 185–211.
45. Fink PW, Foo P, Jirsa V (2000) Local and global stabilization of coordination by sensory information. Exp Brain Res 134: 9–20.

46. Hoyek N, Champely S, Collet C, Fargier P, Guyot A (2009) Age and gender-related differences in the temporal congruence development between motor imagery and motor performance. Learn Individ Differ 19: 555–560.
47. Zatziorsky V, Seluyanov V (1983) The mass and inertia characteristics of the main segments of the human body. In: Matsui H, Kobayashi K, editors. Biomecanics VIII-B., Champaign: Human Kinetics. 1152–1159.
48. Li JZ, Absher DM, Tang H, Southwick AM, Casto AM, et al. (2008) Worldwide human relationships inferred from genome-wide patterns of variations. Science 319: 1100–1104.
49. Van Soest AJ, Bobbert MF (1993) The contribution of muscle properties in the control of explosive movements. Biol Cybern 69: 195–204.
50. Casartelli N, Muller R, Maffiuletti NA (2010) Validity and reliability of the Myotest accelerometer system for the assessment of vertical jump height. J Strength Cond Res 24: 3186–3193.
51. Hall CR, Martin KA (1997) Measuring movement imagery abilities: A revision of the movement imagery questionnaire. J Mental Imagery 21: 143–154.
52. Pinheiro JC, Bates DM (2000) Mixed-effects models in S and S-Plus. New York: Springer-Verlag.
53. Pulvermüller F (2001) Brain reflection of words and their meaning. Trends Cogn Sci 5: S17–S24.
54. Tranel D, Kemmerer D, Adolphs R, Damasio H, Damasio AR (2003) Neural correlates of conceptual knowledge for actions. Cogn Neuropsychol 20: 409–432.
55. Vogt S (1996). Imagery and perception-action mediation in imitative actions. Brain Res Cogn Brain Res 3: 79–86.
56. Talairach J, Tournoux P (1988) Co-planar stereotaxic atlas of the human Brain. Stuttgart: Thieme.
57. Penfield W, Boldrey E (1937) Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. Brain 60: 389–443.
58. Garagnani M, Wennekers T, Pulvermuller F (2008) A neuroanatomically grounded Hebbian-learning model of attention-language interactions in the human brain. Eur J Neurosci 27: 492–513.
59. Hickok G (2009) The functional neuroanatomy of language. Phys Life Rev 6: 121–143.
60. Moseley R, Carota F, Hauk O, Mohr B, Pulwermuller F (2012) A role for the motor system in binding abstract emotional meaning. Cereb Cortex 22: 1634–1647.
61. Havas DA, Glenberg AM (2007) Emotion stimulation during language comprehension. Psychon Bull Rev 14: 436–441.
62. Kazui H, Kitagaki H, Mori E (2000) Cortical activation during retrieval of arithmetical facts and actual calculation: a functional magnetic resonance imaging study. Psychiatry Clin Neurosci 54: 479–485.
63. Tschentscher N, Hauk O, Fischer MH, Pulwerüller F (2012) You can count on the motor cortex: finger counting habits modulate motor cortex activation evoked by numbers. Neuroimage 59: 3139–3148.
64. Dehaene S, Spelke E, Pinel P, Stanescu R, Tsivkin S (1999) Sources of mathematical thinking: behavioral and brain imaging evidence. Science 284: 970–974.
65. Lin JFL, Imada T, Kuhl PK (2011) Mental addition in bilinguals: an fMRI study of task-related and performance-related activation. Cereb Cortex 22: 1851–1861.
66. Gentilucci M, Dalla Volta R, Giannelli C (2008) When the hands speak. J Physiol Paris 102: 21–30.
67. Shtyrov Y, Smith ML, Horner AJ, Henson R, Nathan PJ, et al. (2012) Attention to language: Novel MEG paradigm for registering involuntary language processing in the brain. Neuropsychol 50: 2605–2616.
68. Andersen RA, Cui H (2009) Intention, Action Planning, and Decision Making in Parietal-Frontal Circuits. Neuron 63: 568–583.
69. Zwaan RA, Madden CJ, Yaxley RH, Aveyard ME (2004) Moving words: Dynamic mental representations in language comprehension. Cogn Sci 28: 611–619.

PUBLICATION 2

R. Massarelli, **T. Rabahi** & P. Fargier. *L'Homme, cet animal doté du verbe. Nouveaux Actes Sémiotiques. A paraître en 2014.*

L'HOMME, CET ANIMAL DOTE DU VERBE

Raphael Massarelli, Tahar Rabahi et Patrick Fargier

Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport (CRIS - EA 647), 69622 Villeurbanne cedex.

Résumé

L'action est de nature à précéder la pensée. Cette dernière requiert le recours à un langage structuré, ce qu'une réaction motrice n'autorise généralement pas, laquelle s'accomplit le plus souvent dans des délais par trop restreint. L'être humain a en effet la possibilité de réagir en des temps si courts, via des gestes longuement appris qui peuvent débuter sans qu'intervienne, a priori, la pensée consciente. Fort possiblement cette relation entre pensée, parole et action peut intervenir avant même l'intuition (l'idée). Ce système complexe intégrant action, pensée et idée, en lequel joue notamment le langage, a suscité une formalisation théorique, dite de l'*ide-a-ction*. Si celle-là tient compte de la capacité de l'être humain à réagir dans des temps très courts pour assurer sa survie en cas de danger, elle ne dénie pas toute possibilité au langage de moduler l'action motrice. Des résultats expérimentaux tendent précisément à montrer que cette modulation est possible, même si son processus apparaît fort complexe et à élucider plus avant, lequel ne tient pas exclusivement et spécifiquement à la désignation verbale signifiante d'une action à opérer. Ces résultats sont par ailleurs à mettre en relation avec l'existence, en l'état hypothétique chez l'homme, de *neurones miroirs*, cellules nerveuses découvertes chez le macaque et ayant des caractéristiques, inconnue jusqu'alors, tout à la fois sensitives et motrices. En définitive, on peut exprimer le souhait que les études à venir puissent ouvrir la voie à des nouvelles perspectives quant à l'entité corps-mental, lesquelles pourraient bénéficier d'un support extraordinaire en la participation de mammifères, notamment au regard du traitement palliatif de certaines pathologies chez l'homme.

L'homme est un animal que la superficialité d'un Epiméthée[1] n'a guère armé physiquement face un monde empli de dangers. La mythologie Gréco-Olympienne explique ainsi que l'Homme a dû développer au maximum ses capacités mentales pour survivre. Ce qu'il a fait au point que naquit la philosophie et, avec elle, toute une forme de pensée qui nous caractérise, directs descendants des Cro Magnon que nous sommes. Forts de ce devenir phylogénétique du mental, nous en sommes venus à croire que la pensée, et la raison qu'elle engendre, fait de nous des êtres au summum de l'évolution. Et nous avons ainsi oublié que des animaux aussi basiques que les méduses peuplent les mers depuis au moins un milliard d'année quand l'*Homo sapiens* n'occupe guère la planète que depuis 100 000 ans environ. Envisageant la vie à l'échelle de l'évolution, un commentateur sportif pourrait ainsi annoncer ce score incroyable : méduses 10 000 – *Homo sapiens* 1. Par ailleurs, en admettant que la pensée ait une quelconque utilité dans le cadre de l'évolution naturelle, est-elle l'unique particularité du mental ? La réponse est évidemment négative, car la pensée est strictement dépendante de deux facteurs : un état d'une conscience supérieure et la possibilité d'une communication très développée résultant de langages structurés et souvent fort complexes. Il existe un autre monde mental, mis en évidence par les psychologues et dénommé état d'inconscience ou simplement inconscient. Celui-là pilote une manifestation très importante du mental, qui renvoie aux intuitions ou, plus simplement, aux idées. Des flux de *formes* ou d'*images*[2], probablement des courants électriques à bas ampérage, passent chaotiquement par les circuits du cortex cérébral et nous stimulent sporadiquement via ce que nous désignons en tant qu'*intuition* (Ferrarini et al 2008). Si nous parvenons à mettre celle-là en mots, il nous sera possible d'en conserver une trace. Sans cela, l'intuition finira sa course dans le cimetière des idées perdues. Si l'idée correspond à un flux à bas ampérage, une pensée est produite par

[1] La traduction du nom d'Epiméthée est en effet : *celui qui pense après*, à la différence de son frère Prométhée, *celui qui pense avant*.
[2] Selon la traduction littérale du mot grec *idea*.

un courant intense qui crée ce que l'on appelle des *potentiels à long terme*, de nature à renforcer les synapses des circuits neuronaux et suscite, par là même, une mémorisation (Barnes et al 1994). Les émotions, qui souvent nous guident dans nos actions, constituent par ailleurs une autre caractéristique du mental, comme les pulsions et autres manifestations de l'intense dialogue-lutte entre conscient et inconscient. Les perceptions qui nous offrent un accès au monde, viennent compléter ce panorama suivent des règles dictées par l'efficacité de nos sens. Il en résulte un Soi unique fait d'idées, de pensées, d'actions, d'émotions, de pulsions, de perceptions en prise avec une corporéité.

Langage et pensée

Wittgenstein (1993), Quine (2010) et Fodor (2010), ont été parmi les premiers[3] à envisager la parole comme un outil essentiel à la pensée, celui-là constituant, vraisemblablement, le majeur attribut distinctif quant aux différents peuples de la Terre : la pensée structurée par la langue chinoise peut ainsi différer significativement de celle qui procède de la langue italienne. Ainsi un chinois aura quelque difficulté à lire la Divine Comédie dans l'original florentin, tout comme un italien aura des difficultés à percevoir le sens d'un Tao Te Qing sans connaitre les finesses des idéogrammes. Par contre, chinois comme italien n'aurons pas de problèmes à se comprendre s'ils communiquent avec des gestes. Goldin-Meadow et al. (2008) ont produit à ce propos une expérimentation révélatrice. Cette dernière a consisté à faire répéter une phrase correspondante à une action précise aux sujets de quatre groupes, dans leur langue maternelle respective qui était l'anglais, l'espagnol, le chinois ou bien le turc, ainsi que d'exprimer cette phrase par gestes. Les sujets ont verbalisé correctement la phrase d'action, les sujets des trois premiers groupes respectant l'ordre « sujet-verbe-objet » et ceux du quatrième groupe, l'ordre « objet-sujet-verbe ». Pour autant, tous ont exprimé cette phrase gestuellement en ordonnant le propos dans l'ordre « objet-sujet-verbe », ce qui pourrait

[3] On peut chercher la relation entre pensée et parole déjà dans l'*Hermeneia* d'Aristote (Ch. 1) ou même dans le *logos*.

suggérer l'existence d'une source primitive de communication, antérieure au développement du langage verbal.

L'action précède la pensée

La prévalence de l'action sur la pensée, voire l'idée, apparaît en outre clairement lorsqu'on observe un boxeur de haut niveau, un expert en un quelconque art martial ou en tennis ou encore dans le cas de la conduite automobile. D'une manière plus générale, il est question ici de toute occurrence de production d'une réponse motrice très rapide par un individu non nécessairement sportif. Dans le cas, sans doute le plus percutant, de la boxe, le combattant bien entraîné parvient à savoir (à percevoir) que l'adversaire va par exemple lui administrer incessamment un crochet du droit et est capable de l'esquiver afin de contrattaquer, dans le même mouvement. Lorsqu'on mesure le temps nécessaire à cette suite d'événements on pointe les éléments suivants : 1. Pendant les 200-250 premières ms, le boxeur se déplace de manière inconsciente (il agit pertinemment sans être conscient de ses gestes) et 2. Il réagit en contrattaquant en un laps de temps qui est à la limite de la vitesse physiologique de conduction nerveuse cerveau-pieds et mains (Libet 1999, 2006). Si l'on ne sait pas encore expliquer ce phénomène, on a repéré qu'il apparaît seulement après un entrainement très intense et prolongé. Il n'est du reste pas nécessaire d'être un champion sportif pour en faire l'expérience : une grande habitude de la conduite automobile autorise des réactions de même nature face à des obstacles impromptus.

Ainsi l'action est-elle de nature à précéder la pensée, voire l'idée ou l'intuition. Point de vue que la Figure 1 propose de formaliser en recourant au concept d'*ide-a-ction* (modifié d'après Massarelli et al 2012). Les relations entre action, perception, émotion, idée et pensée, ainsi envisagées, fondent une dynamique complexe (dont rendent notamment compte les doubles flèches utilisées dans la Figure 1) réfractant le caractère unitaire du système corps–mental ou

suggérant que la spécification des éventuelles délimitations de ses constituants est d'une pertinence moindre. Au demeurant, des philosophes pragmatistes tels que Putnam (2001), Clark et Chalmers (1998) ou Clark (2008) ont du reste envisagé l'existence d'un système unitaire corps-mental-environnement, qui a été appelé l'*embodiement*[4], allant même pour certains jusqu'à suggérer qu'il n'est de système cognitif véritable que celui-là (*e.g*. Eliasmith, 1996). Point de vue qui a toutefois suscité la controverse comme le souligne par exemple la revue de question opérée par Willems et Casasanto (2011). La Figure 1 se centre en tout état de cause sur la relation dynamique entre corps et mental, censée fonder le caractère unitaire de ce système.

Dans la Figure 1 les mots et le langage représentent leur rôle d'étape fondamentale dans le développement de la pensée consciente. Mais l'impact de la parole déborde largement la sphère du conscient puisque nous utilisons le langage dans nos rêves : ainsi, ceux qui parlent couramment une langue étrangère savent bien qu'ils recourent d'autant plus volontiers à celle-là dans leurs rêves lorsqu'ils séjournent dans le pays où prévaut cette langue. Ce qui suggère une relation du langage, non seulement avec l'univers rationnel du conscient, lors de l'éveil, mais aussi avec le monde irrationnel de l'inconscient, lors de la phase de sommeil paradoxale.

Nous pouvons recourir au langage tant en état de conscience que lorsque nous sommes inconscients (lors des rêves, par exemple). Cependant, une structure rationnelle du discours ne peut exister que dans le premier cas, en lequel les mots ne se cantonnent pas à exprimer la pensée mais influent aussi sur celle-là, participant à sa construction. Il est alors envisageable que la fonction langagière puisse influer sur diverses aires du cortex cérébral et, notamment, les aires responsables de la motricité. Ce que nombre d'études tendent à accréditer.

[4] L'*embodiement*, ou l'incorporation, si l'on traduit ce terme littéralement en langue française, prend une diversité de significations selon les auteurs. Pour les plus radicaux, dont le propos est sans doute le plus controversé en l'état, il est question de l'incorporation de l'entité corps-mental dans le monde (e.g. Clark, 2008). D'autres envisagent fondamentalement l'incorporation du mental dans le corps. C'est en ce sens-là qu'a été développé le modèle de l'*ide-a-ction*, en lequel les perceptions et les émotions constituent des intermédiaires particulièrement importants dans la relation au monde.

Parole et Motricité

Une éventuelle relation entre langage et motricité peut s'envisager sous l'angle d'une activation fonctionnelle des zones motrices cérébrales lors de la prononciation ou de la lecture de mots, opérée silencieusement ou à haute voix. De ce point de vue, plusieurs travaux ont montré que les aires motrices cérébrales, localisées dans le cortex frontal et responsables des mouvements volontaires, peuvent être impliquées dans le langage non spécifiquement relié à l'action motrice (Wilson et al, 2004, Fadiga et al, 2002 ; Watkins et al, 2003 ; Tokimura et al, 1996 ; Meister et al, 2003)[5]. Ainsi l'impact du cortex pré-moteur sur l'écoute et la production de syllabes (Wilson 2004) ou sur la lecture de texte à haute voix (Tokimura et al 1996) a-t-il été confirmé. De plus, un effet de facilitation de l'acte moteur avait été observé lors de l'écoute passive des mots concrets (ne portant pas de sens moteur) (Fadiga et al, 2002).

La prononciation répétée de verbes désignant une action motrice donnée, apparaît produire des activations fonctionnelles au niveau des aires motrices cérébrales (Pulvermüller et al, 2005). Certains auteurs ont notamment montré que la lecture de verbes d'action *kick* (donne un coup de pied), *pick* (pince) et *lick* (lèche) active des zones cérébrales distinctives (Hauk et al, 2004). Dans les deux premiers cas il est question de zones de l'aire motrice primaire (M1) intéressant, selon les travaux classiques de Rasmussen et Penfield (1947), spécifiquement les jambes (*kick*) et les mains (*pick*). Dans le troisième cas (*lick*), la partie ventrale de l'aire pré-motrice se révèle activée. L'activation de l'aire M1 a également été observée lors de l'écoute de verbes d'action impliquant des gestes des mains, de la langue ou des jambes (Watkins et al, 2003). La lecture de verbes d'action relatifs à un geste de la main (*grasping*[6]) s'est de plus

[5] Ces études ont ainsi corroboré les suggestions théoriques de Liberman (Liberman et al, 1967 ; Liberman et Whalen, 2000).
[6] Mot qui a le sens de saisir (au gérondif), mais qui aussi veut dire : cupide, avare. Les sujets toutefois étaient des francophones.

révélée susciter une diminution du temps de réaction du poignet facilitant la réalisation de la tâche motrice correspondante (Boulenger et al 2006).

L'essentiel des expérimentations de ce type prennent appui sur des technologies complexes et onéreuses (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle – IRMf -, Magneto-encéphalographie, Stimulation Magnétique Transcraniale – TMS -, Potentiels Evoqués, etc). Il est toutefois possible d'étudier l'influence de la parole sur l'action motrice en utilisant des techniques plus basiques. C'est en ce sens qu'une recherche s'est récemment développée[7] pour vérifier si l'usage de verbes d'action pouvait améliorer la performance motrice. L'expérience était simple dans son exécution car elle comportait la répétition d'un verbe d'action (*saute*, à la deuxième personne de l'impératif) prononcé à voix haute ou silencieusement, ou encore écouté, avant d'exécuter un saut vertical de type *squat jump* (genoux à 90°, mains sur les hanches, initialisation du saut réalisée sans contremouvement). Ce saut, bien connu des biomécaniciens (voir par exemple Bobbert et van Soest 2001) présente l'intérêt de requérir un mouvement bien plus complexe que ceux utilisés dans les travaux classiques en neurosciences cognitives (le plus souvent cantonnés aux doigts, aux mains ou aux bras). Les résultats ont montré (Rabahi et al 2011 ; 2012) que le mot *saute* améliore significativement la hauteur de saut, alors que des mots désignant d'autres actions (*pince*, *lèche*) ou des mots dépourvus de sens pour le sujet expérimental n'ont pas d'effet significatif. On pourrait en déduire l'existence d'une spécificité motrice quant à un verbe d'action donné, *saute* dans le cas en question, mais la prudence est ici de mise. Tout mot prononcé (à l'exception remarquable des mots sans signification pour les sujets) semble augmenter, de manière non significative, la hauteur du saut ; en tout état de cause il ne la diminue jamais. Ce qui est au demeurant cohérent avec les résultats présentés dans le paragraphe précédent quant aux effets de mots qui ne désignent pas une action. Il faut aussi

[7] Grâce à une collaboration entre le laboratoire du Département de Physiothérapie de l'Université Libanaise à Beyrouth, l'Institut d'Ostéopathie de Dardilly (Isosteo) et le CRIS de l'Université Claude Bernard Lyon 1.

noter que l'utilisation de mots suggérant une action non spécifique et présentant une forte valeur émotive (par exemple, *gagne*…) améliore la hauteur du saut, tout comme l'écoute du verbe *saute* énoncé répétitivement avec une fréquence croissante, laquelle est de nature à susciter un état d'excitation émotive (résultats à paraître).

Il semble ainsi prudent de conclure, provisoirement et compte tenu des études rapportées dans la littérature, que le langage, comme l'acte moteur, requiert une sollicitation du cortex moteur cérébral, l'influence précise de tel type de mot sur une action donnée demeurant à clarifier. Si la prononciation, l'écoute ou la lecture de mots, notamment de ceux évoquant une action, active le cortex moteur, c'est qu'il existe une relation entre langage et motricité, dans le sens d'une influence du premier sur la seconde.

La question qui s'ensuit est dès lors celle d'une éventuelle influence réciproque : l'activation du système moteur influe-t-elle spécifiquement sur la compréhension des mots signifiant une action ? Une hypothèse avancée pour répondre à cette question, parmi d'autres (voir : Fodor, 1975; Farah, 1989; Willems et al, 2010), dite aussi de *l'embodiement*[8], implique que les circuits neuronaux intervenant dans la compréhension d'un terme ou d'une phrase désignant une action, sont également utilisés pour percevoir ou exécuter cette action (Lakoff 1987; Barsalou 1999; Pulvermüller 2002; Gallese et Lakoff 2005; Zwaan and Taylor 2006). Cela a concouru à suggérer l'existence, dans le cortex frontal, de neurones particuliers auxquels on a donné le nom de *neurones miroirs* (Di Pellegrino et al 1992 ; Rizzolatti et al, 1996). Ces neurones participeraient au processus donnant sens aux mots d'action et joueraient un rôle non seulement dans la programmation et l'exécution de l'action, mais aussi dans les processus sensitifs déclenchés par les mots d'action correspondants (Pulvermüller et al, 2005).

[8] Voir note 4.

Les *neurones miroirs*

Les neurones miroirs sont une classe particulière de cellules nerveuses ayant tout à la fois des caractéristiques visuelles et motrices. De tels neurones ont été trouvés dans l'aire F5 du singe macaque, laquelle est l'homologue de l'aire pré-motrice chez l'homme (di Pellegrino et al, 1992). Ces neurones déchargent quand le macaque effectue une action ou observe un congénère, voire un expérimentateur, en train d'effectuer cette action (Rizzolatti et al, 1996). Une autre classe de neurones visuo-moteurs, localisés dans la même région du cerveau, répond par ailleurs exclusivement à la présentation d'objets (Rizzolatti et Luppino, 2001).

Dans leur première étude sur le macaque, Di Pellegrino et al (1992) avaient analysés l'activité électrophysiologique de neurones moteurs qui déchargeaient lorsque le macaque saisissait de la nourriture (réponse motrice) ou lorsqu'il observait l'expérimentateur effectuant cette saisie (réponse visuelle).

Les neurones miroir chez l'homme

Une représentation somatotopique des membres du corps apparaît se retrouver dans le cortex moteur lorsqu'un sujet accomplit un geste et quand il observe la réalisation de ce geste par autrui. Buccino et al. (2001) ont mesuré par IRMf, les activations cérébrales de sujets qui observaient des séquences vidéo présentant des actions effectuées avec la bouche, la main et le pied par de tierces personnes. Les résultats ont montré une organisation somatotopique des activations le long du cortex pré-moteur, semblable à celle décrivant l'*homunculus* dans le M1 tel qu'il a été décrit par Rasmussen et Penfield (1947). En outre, Buccino et al. (2001) ont observé une telle somatotopie dans le lobe pariétal postérieur, généralement considéré comme relevant des aires visuelles. Ces résultats suggèrent la présence de neurones miroirs, jouant un rôle tout à la fois visuel et moteur, dans les régions corticales responsables de l'observation visuelle.

Les propriétés des *neurones miroir* du système moteur humain ont été étudiées par Fadiga et al. (1995) via la TMS. Ces auteurs ont mesuré l'activation correspondante à la main de l'aire M1 chez des sujets, observant un tiers en train de saisir un objet. Le potentiel évoqué moteur, enregistré à partir de la main controlatérale, a augmenté lors de la perception des mouvements. Ainsi les régions motrices semblent-elles non seulement dévolues à l'exécution d'un mouvement donné mais encore jouer un rôle dans la reconnaissance de ce mouvement lorsqu'il est produit par un tiers.

L'action complexe des neurones miroirs dans la compréhension de l'action d'autrui (Rizzolatti et Craighero, 2004) a été démontrée dans le cas de divers processus sociocognitifs, dont l'imitation (Iacoboni et al, 1999) et l'empathie (Decety et Jakson, 2004). Des études de neurophysiologie ont ainsi montré que les neurones miroirs constituent d'importants substrats neuronaux dans le processus d'imitation (Iacoboni, 2009). Une expérience d'IRMf a confirmé que des sujets sains utilisent leur cortex pré-moteur, siège des neurones miroirs, pour observer et imiter le mouvement réalisé par un tiers (Buccino et al, 2004). Un dysfonctionnement au niveau de ces circuits est ainsi probablement de nature entraver le processus d'apprentissage par imitation.

L'un des syndromes les plus étudié aujourd'hui dans ce domaine est celui de l'autisme, qui se caractériserait notamment par un déficit majeur en matière d'imitation (Rogers et Pennington, 1991). Une étude d'imagerie cérébrale a ainsi rendu compte d'une réduction dans l'activité des neurones miroirs lorsque les sujets autistes imitent des mouvements de doigts (Williams et al, 2006). Les autistes apparaissent en outre présenter des difficultés à observer et imiter des expressions émotionnelles du visage (Dapretto et al, 2006). Ces résultats montrent clairement une difficulté à reconnaitre et donc à comprendre les actions des autres, notamment celles qui expriment de l'empathie. Ce constat est cohérent avec des études antérieures rapportant que cette population ne parvient pas à manifester les réactions d'empathie habituelles face à des

personnes éprouvant manifestement de la peur, du plaisir ou de la douleur (Hobson, 1993). Le fait nouveau est qu'on commence aujourd'hui à disposer d'un background physiologique pour expliquer, en partie, la raison et/ou la conséquence de ce problème, pour lequel les neurones miroirs sont un marqueur neurophysiologique de premier ordre. La découverte des neurones miroirs a, du reste, d'ores et déjà suscité des applications techniques à fins thérapeutiques, par exemple dans le cas de la maladie de Parkinson, l'observation de l'acte moteur étant ici pratiquée en vue d'améliorer la démarche du patient (Pelosin et al, 2010). Des applications ont également été développées en termes de traitement d'appoint dans la rééducation de sujets ayant subi un accident vasculaire cérébral (Celnik et al, 2008). L'intérêt de ces études, d'ailleurs rapporte à la possible interaction homme-animal et, notamment dans le cas des neuropathologies chez l'enfant, l'imitation des mouvements d'un partenaire animal pourrait concourir à certaines améliorations.

Conclusions et Perspectives

Les données expérimentales et les concepts présentés ici renvoient probablement à un changement paradigmatique majeur dans le champ de la Biologie. Celui-là n'aurait pu s'opérer sans l'advenue de l'Intelligence Artificielle (IA), avec les travaux de son père fondateur Alan Turing (1936). L'IA participa indirectement à une révision de la psychologie, en montrant les limites du comportementalisme, après la mise en place des Sciences et Technologies de la Cognition et des neurosciences qui en ont découlé. Une conséquence majeure de ce processus tient à ce que depuis une vingtaine d'années, l'on admette la possibilité d'une étude scientifique de la *conscience*. Des hypothèses de travail, comme celles de l'*embodiement*, auraient auparavant été mésestimées, qualifiées quelque peu péjorativement de philosophiques, dans le monde de la Science. Les études opérées ont mis en évidence l'étroite relation existante entre l'action et la parole, notamment au plan de

l'amélioration de la performance motrice. Cette influence de la parole ne semble pas spécifiquement reliée à la désignation verbale d'une action motrice donnée. Elle pourrait participer d'un processus plus complexe, relevant d'une sorte « d'éveil » cortical qui permettrait l'amélioration de l'exécution des mouvements via un recours au langage de nature à solliciter une diversité de fonctionnalités cérébrales comme celles associées au cortex limbique, au prise avec les émotions voire les pulsions, peut-être. Cet « éveil » susciterait un état attentionnel élevé qui influencerait en retour toute commande volontaire, en particulier celle qui pilote la motricité.

Ces recherches, à leur tour, concouru à la découverte des neurones miroirs, suscitant un bouleversement conceptuel dans le champ de la neurophysiologie. Les perspectives ouvertes dans le cas de l'homme après la découverte de ces neurones chez le singe, demeurent à élucider[9]. Si on a pu avérer l'existence de ces cellules chez le macaque en recourant à l'électrophysiologie, une telle méthodologie ne saurait être exploitée dans le cas de l'homme, pour des raisons éthiques évidentes. Un apport éventuel de preuves plus directes, via des méthodologies recevables éthiquement parlant, serait évidemment de nature à révolutionner notre entendement du fonctionnement cérébral humain.

En matière de sciences biologiques, il est prudent d'éviter les certitudes absolues. L'ensemble des découvertes ici compilées doit en conséquence appeler à d'autres travaux. Les travaux d'ores et déjà opérés montrent en tout état de cause que l'on peut étudier l'homme en recourant à des méthodologies fort variées quant à leur complexité. L'on s'est ainsi rendu compte qu'il était possible d'employer les animaux (les singes notamment) non plus comme matériau biologique mais comme *partenaires* en vue de pallier les effets fâcheux de certaines pathologies (voir notamment les revues de question suivantes: Beck et Katcher 1984 ; Filan et Llewellyn-Jones 2006 ; Baverstock et Finlay 2008 ; Grandgeorge et Hausberger 2011 ;

[9] Il faut préciser que les techniques complexes utilisées aujourd'hui (IRMf, TMS, etc) n'ont pas la précision spatio-temporelle de l'électrophysiologie. Cette preuve directe fait défaut dans les études sur les neurones miroirs chez l'homme.

Wells 2012). La démocratisation de ce phénomène demeure modérée, principalement en raison de difficultés de disposer d'animaux présentant les attributs adéquats ainsi que d'un pool limité d'experts en éthologie. Des études de plus en plus nombreuses font cependant état de l'emploi heureux d'animaux à des fins thérapeutiques cliniques.

Cela suggère l'intérêt à moyen et long terme d'un développement de ce type d'études notamment dans le but de spécifier les similitudes entre l'homme et les autres mammifères, plutôt que dans le but de pointer, sinon de stigmatiser, leurs différences.

Références

Barnes CA, Jung MW, McNaughton BL, Korol DL, Andreasson K et Worley PF. (1994). LTP saturation and spatial learning disruption: Effect of task variables and saturation levels. *Journal.of Neurosciences*. 14:5793-5806.

Barsalou LW. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral Brain Sciences.* 22:577–660.

Baverstock A et Finlay F. (2008). *Archives of Diseases in Childhood*. 93:994-995.

Beck AM et Katcher AH. (1984). A new look at pet-facilitated therapy. *Journal of American Veternary Medical Association*. 184:414-421.

Bobbert MF et van Soest AJ. (2001). Why do people jump the way they do? *Exercise in Sport Sciences Reviews*. 29:95-102.

Boulenger V, Roy AC, Paulignan Y, Deprez V, Jeannerod M et Nazir TA. (2006). Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. *Journal of Cognitive Neurosciences*. 18:1607–1615.

Buccino G, Binkofski G, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Seitza RJ, Zilles G, Rizzolatti G et Freund HJ. (2001). Action observation activates the premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*. 13:400-404.

Buccino G, Vogt S, Ritzl A, Fink GR, Zilles K, Freund HJ et Rizzolatti G (2004). Neural Circuits Underlying Imitation Learning of Hand Actions: An Event-Related fMRI Study. *Neuron*. 42:323-334.

Celnik P, Webster B, Glasser DM et Cohen LG (2008). Effects of action observation on physical training after stroke. *Stroke*. 39:1814-1820.

Clark A et Chalmers D. (1998). The extended mind. *Analysis* 58:7-19. Reprinted in Clark (2008).

Clark A. (2008). *Supersizing the mind.* Oxford University Press.

Dapretto M, Davies MS, Pfeifer JH, Scott AA, Sigman M, Bookheimer SY et Iacoboni M (2006). Understanding emotions in others: mirror neuron dysfunction in children with autism spectrum disorders. *Nature Neurosciences.* 9:28–30.

Decety J et Jackson PL. (2004). The functional architecture of human empathy. *Behavior and Cognitive Neuroscience Reviews*. 3:71–100.

di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V et Rizzolatti G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*. 91:176-180.

Eliasmith C. (1996). The third contender: A critical examination of the dynamicist theory of cognition. *Philosophical Psychology*. 9 :441-463.

Fadiga L, Fogassi L, Pavesi G et Rizzolatti G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*. 73:2608-2611.

Fadiga, L, Craighero, L, Buccino, G et Rizzolatti G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. *European Journal of Neuroscience*. 15:399-402.

Farah MJ. (1989). The neural basis of mental imagery. *Trends in Neurosciences*. 12:395-399

Ferrarini L, Veer IM, Renken RJ, van der Wee NJ, Veltman DJ, Aleman A, Zitman FG, Penninx BW, van Buchem MA, Rombouts SA et Milles J. (2008). Hierarchical functional modularity in the resting-state human brain. *Human Brain Mapping*. 30:2220-2231.

Filan SL et Llewellyn RH. (2006). Animal-assisted therapy for dementia: a review of the literature. *International Psychogeriatrics.*18:597-611.

Fodor JA. (2010). *LOT 2: The language of thought revisited*. Oxford University Press.

Fodor JA. (1975). *The language of thought*. Harvard University Press.

Gallese V et Lakoff G. (2005). The brain's concepts: the role of the sensory–motor system in conceptual knowledge. *Cognitive Neuropsychology*. 22:455–479.

Goldin-Meadow S, Wing Chee SO, Ozuryek A et Mylander C. (2008). The natural order of events: How speakers of different languages represent events nonverbally. *Proceedings of the National Academy of Sciences* USA. 105: 9163-9168.

Grandgeorge M et Hausberger M. (2011). Human-animal relationship: from daily life to animal-assisted therapies. *Annali de l'Istituto Superiore della Sanità*. 47:397-408.

Hauk O, Johnsrunde I et Pulvermüller F. (2004). Somatotopic representation of action words in the motor and premotor cortex. *Neuron*. 41:301–307.

Hobson RP. (1993). *Autism and the development of mind*. Lawrence Erlbaum .

Iacoboni M, Woods RP, Brass M, Bekkering H, Mazziotta JC et Rizzolatti G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*. 286:2526–2528.

Iacoboni M. (2009). Imitation, empathy, and mirror neurons. *Annual Review of Psychology*. 60:653–670.

Lakoff G. (1987). *Women, fire, and dangerous things: what categories reveal about the mind*. University of Chicago Press.

Liberman AM et Whalen DH. (2000). On the relation of speech to language. *Trends in Cognitive Sciences*. 4:187-96.

Liberman AM, Cooper FS, Shankweiler DP et Studdert-Kennedy M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological Review*. 74:431-61.

Libet B. (1999). Do we have free will? *Journal of Consciousness Studies.* 6: 47-57.

Libet B. (2006). Reflections on the interaction of the mind and brain. *Progress in Neurobiology.* 78: 322-326.

Massarelli R, Rupied B, Rabahi T, Rifai Sarraj A et Fargier P (2012). *Kinésithér Rev.* http://dx.doi.org/10.1016/j.kine.2012.04.001

Meister IG, Boroojerdi, B, Foltys H, Sparing R, Huber W, Topper R (2003). Motor cortex hand area and speech: implications for the development of language. *Neuropsychologia*. 41:401-6.

Pelosin E, Avanzino L, Bove M, Stramesi P, Nieuwboer A et Abbruzzese G (2010). Action observation improves freezing of gait in patients with Parkinson's disease. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 24:746-752.

Pulvermüller F, Hauk O, Nikulin VV, Ilmoniemi, RJ (2005). Functional links between motor and language systems. *European Journal of Neuroscience*. 21:793-797.

Pulvermüller F. (2002). *The neuroscience of language*. Cambridge University Press.

Putnam H. (2001). *The Threefold Cord: Mind, Body, and World*. Columbia University Press.

Rabahi T, Fargier P, Rifai Sarraj A, Clouzeau C et Massarelli R. (2012). Motor performance may be improved by kineasthetic imagery, specific action verb production and mental calculation. *Neuroreport*. 23:78–81 .

Rasmussen T et Penfield W. (1947). The human sensorimotor cortex as studied by electrical stimulation. *Federation. Proceedings*. 6:184-198.

Rizzolatti G & Craighero L. (2004). The mirror neuron system. *Annual Review of Neurosciences.* 27:169-192.

Rizzolatti G et Luppino G (2001). The cortical motor system. *Neuron*. 31:889-901

Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V et Fogassi L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research Cognitive Brain Research*. 3:131-141.

Rogers SJ et Pennington BF. (1991). A theoretical approach to the deficits in infantile autism. *Developmental. Psycholology* 3:137–162.

Tokimura H, Tokimura Y, Oliviero A, Asakura T, Rothwell JC (1996). Speech-induced changes in corticospinal excitability. *Annals of Neurology* 40:628-639.

Turing A. (1936). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http://www.thocp.net/biographies/papers/turing_oncomputablenumbers_1936. Retrieved May 31, 2012.

Watkins KE, Strafella AP, Paus T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*;41:989–994.

Wells DL. (2012). Dogs as a diagnostic tool for ill health in humans. *Alternative Thererapy and Health in Medicine*. 18:12-17.

Willems RM et Casasanto D. (2011). Flexibility in embodied language understanding. *Frontiers in Psychology*. 2:1-11.

Willems RM, Toni I, Hagoort P et Casasanto D. (2010) Neural dissociations between action verb understanding and motor imagery. *Journal of Cognitive Neurosciences*. 22:2387-2400.

Williams JH, Waiter GD, Gilchrist A, Perrett DI, Murray AD et Whiten A (2006). Neural mechanisms of imitation and 'mirror neuron' functioning in autistic spectrum disorder. *Neuropsychologia.* 44:610–621.

Wilson SM, Saygin AP, Sereno MI et Iacoboni M (2004). Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nature Neuroscience*. 7:701-2.

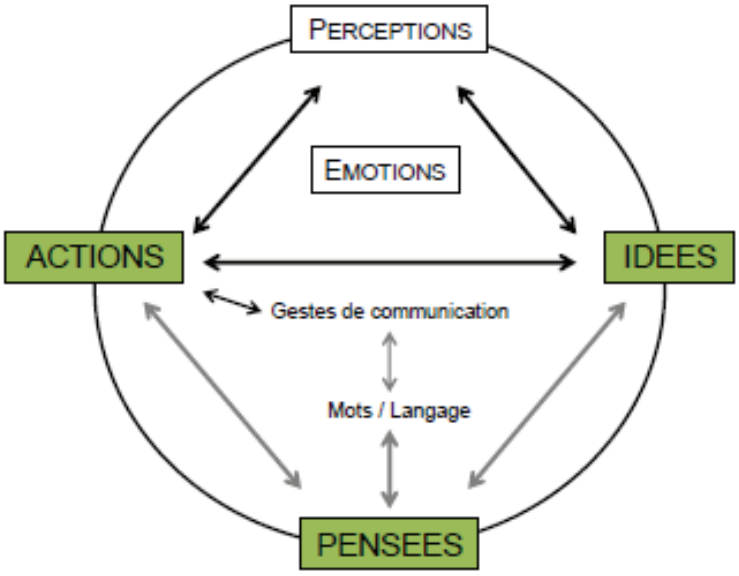
Wittgenstein L. (1993). *Tractatus logico-philosophicus*. Gallimard.

Zwaan RA et Taylor LJ. (2006). Seeing, acting, understanding: motor resonance in language comprehension. *Journal of Experimental Psychology General*. 135:1–11.

<u>Légende à la</u>

Figure 1. Approche théorique de l'*Ide-a-ction*.

Relation entre Actions, Idées et Pensées et effet modulateur de la langue, des perceptions et des émotions. Le cercle correspond à un être vivant doté d'une conscience de haut niveau. La bidirectionnalité des flèches indique une dynamique entre les divers composantes et l'impossibilité de définir une hiérarchie parmi celles-ci. La dimension des lettres correspond à la suggestion principale de l'approche théorique, la relation fondamentale entre action et idée.


PERCEPTIONS
EMOTIONS
ACTIONS
IDEES
Gestes de communication
Mots / Langage
PENSEES

PUBLICATION 3

T. Rabahi, P. Fargier, A. Rifai Sarraj, C. Clouzeau & R. Massarelli. *Motor performance may be improved by kineasthetic imagery, specific action verb production and mental calculation*. *Neuroreport.* 2012; 23:78–81

Motor performance may be improved by kinesthetic imagery, specific action verb production, and mental calculation

Tahar Rabahi[a], Patrick Fargier[a], Ahmad Rifai-Sarraj[b], Cyril Clouzeau[a] and Raphael Massarelli[a]

Several results in the literature show that motor imagery, language production, mental calculation, and motor execution share the same or closely related brain motor cortical areas. The present study aimed at investigating the possible influence of specific action verb (AV) pronunciation and mental calculus upon motor performance compared with kinesthetic imagery (KI). Participants, novice in mental imagery, performed a vertical jump after a cognitive task (AV, silent AV, mental subtraction, meaningless verb, and KI). The results show that specific lower limbs AV, mental calculation, and KI improved the vertical jump in male, but not in female participants. *NeuroReport* 23:78–81 © 2012 Wolters Kluwer Health | Lippincott Williams & Wilkins.

NeuroReport 2012, **23**:78–81

Keywords: action verb, kinesthetic imaging, mental calculation, motor performance

[a]University of Lyon, University Claude Bernard Lyon 1, Centre for Research and Innovation on Sport, Villeurbanne Cedex, France and [b]Department of Physiotherapy, Lebanese University, Beirut, Lebanon

Correspondence to Tahar Rabahi, Centre for Research and Innovation on Sport, 27 bvd du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex, France
Tel: +33611804496; fax: +33472448010; e-mail: taharrabahi@gmail.com

Received 7 October 2011 **accepted** 23 October 2011

Introduction

Motor imagery (MI) is considered to be the dynamic state during which an individual mentally simulates a given motor action [1] and can be understood as the 'covert enactment' of an action [2]. As part of motor imagery kinesthetic imagery (KI), in particular, requires 'the feeling of movement' or the evocation of an action and of the corresponding sensations of the body [3]. In their practice, sportspersons predominantly use repetitive KI for training and performing in order to improve their practice [4], essentially because the motor areas activated during KI appear to be functionally the same during the execution of an overt movement [5].

Brain primary motor and premotor cortical areas, activated during KI, are also activated during pronunciation of an action-related word like an action verb (AV) [6,7], whereas Broca's area is activated during the execution of distal hand movements [8]. Other studies suggest that motor areas play a role in understanding AVs, even during silent enunciation [silent action verb (SAV)] [9]. Studying the simultaneous production of language and action, namely speech and gestures, Willems *et al.* [10] demonstrated that the processing of both share a high-level neural integration system. Furthermore, both understanding AVs and forming mental images of the corresponding actions have an effector-specific activation in regions of the premotor cortex [2]. During a simple arithmetic calculation process [namely mental subtraction (MS)], the motor cortex was similarly involved even with a minor role during this mental process [11]. Other activations were observed in prefrontal lobules, inferior parietal cortex, and in Broca's area [11].

Considering the involvement of the motor cortex in KI, AV, SAV, and, to a lesser extent, MS the purpose of the present study was to evaluate the impact of AV, SAV, and MS upon the performance of a squat vertical jump and compared their effect after KI.

Methods

Participants

Seventy-three individuals (among which 29 women) participated in three experiments.

Experiment 1

Twenty-eight men (mean age = 21.5 ± 2.6 years) and 15 women (mean age = 22.1 ± 1.6 years) students of the sport sciences faculty performed vertical squat jumps. Each student had a regular practice of sporting, without particular relation to jumping, and gave a written informed consent. Prior to the start of the experiment the participants completed the revised version of the Movement Imagery Questionnaire [12] to measure the individual ability of KI. All the participants performed maximum squat jumps with regard to the following constraints: (a) a stationary semisquatted initial position, heels on the ground, and knees bent at an angle of 90°; (b) hands on the hips during the whole jump; (c) starting the push-off phase without any counter-movement. The experimental design included cognitive tasks to be executed in four block designs: (a) three jumps (J_1), considered as control jump, followed by three jumps each executed after 10-s repetition of an AV (AV, loud and distinct pronunciation to oneself of the second person imperative tense *saute* = jump; the word was repeated 9–11 times before the jump), the mother language of all the participants being French; (b) three jumps (J_2), followed by three jumps each executed after 10 s of the silent repetition of an AV (SAV; same procedure as in AV

0959-4965 © 2012 Wolters Kluwer Health | Lippincott Williams & Wilkins DOI: 10.1097/WNR.0b013e32834e7dce

Copyright © Lippincott Williams & Wilkins. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

but the word was mentally and silently repeated by the participants, without any movement of the lips or tongue); (c) three jumps (J_3), followed by three jumps preceded by 10 s of MS task (same requisites as in SAV); (d) three jumps (J_4), followed by three other consecutive jumps, each of which was executed after 10 s of KI. Each cognitive task (AV, SAV, MS, and KI) was executed in a random sequence by each participant and repeated three times. The participants had a rest period of 3 min between each block (a–d).

Experiment 2

Sixteen man (mean age = 23.7 ± 2.5 years) and 14 women (mean age = 22.1 ± 2.2 years) students of the Institute for Osteopathy (Isosteo-Lyon, Limonest) were asked to perform a second set of experiments at a later date. Participants performed, as in the first experiment, three jumps four times (J_{1-4}). The following cognitive tasks consisted in the pronunciation of: *saute*, *lèche* (lick), *pince* (pinch), and *tiao* (jump in Chinese, meaningless for all students). All words were intended as the second person of the imperative tense, and was pronounced with the same frequency and willing tone as in the first experiment.

Experiment 3

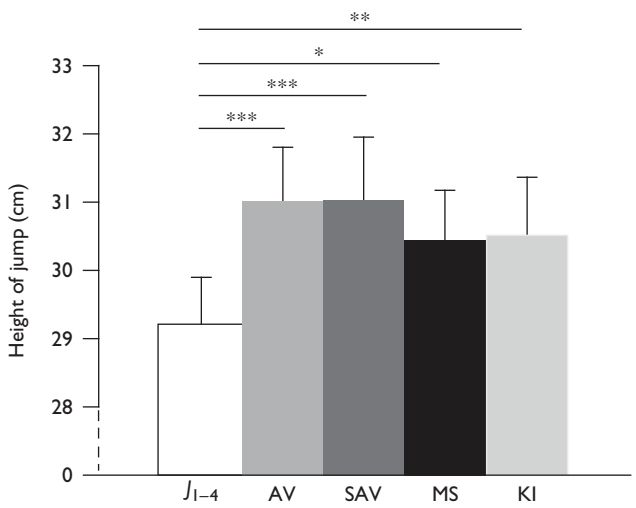
Reference participants (10 men, mean age: 22.1 ± 2.4 years) students of the Institute for Osteopathy performed the same experimental procedure of the first and second experiments separately without getting involved in performing the cognitive tasks.

The height of the jumps was measured by an Optojump (Microgate, Bolzano, Italy) apparatus connected to a laptop. Statistical analysis was performed using the software R 2.11.1. Tukey's test was used to compare different conditions; significance was set at $P < 0.05$.

Results

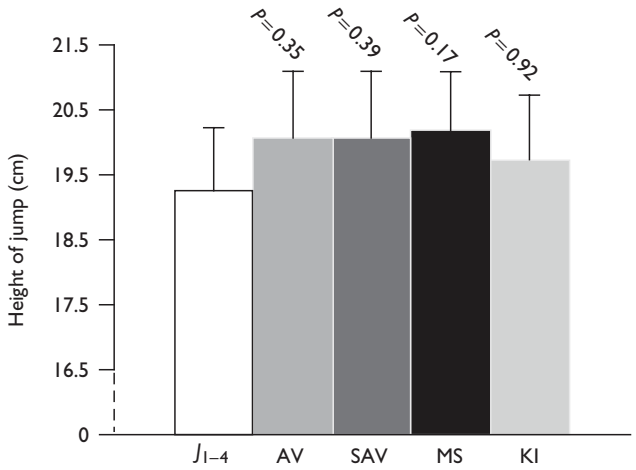
In the first experiment, the repetition of the AV produced a significant increase in the height of the jumps in male participants compared with control jumps (AV: 31.03 ± 4.2 cm vs. J_{1-4}: 29.2 ± 3.8 cm; $P \ll 0.01$) (Fig. 1). The silent enunciation of the action word (SAV: 31.03 ± 4.9 cm compared with J_{1-4}: 29.2 ± 3.8 cm) was equally significant ($P \ll 0.01$) and similar results were found with MS (MS: 30.4 ± 4.1 cm compared with J_{1-4}: 29.2 ± 3.8 cm; $P = 0.02$). A significant difference was also noted after KI (KI: 30.6 ± 4.4 cm compared with J_{1-4}: 29.2 ± 3.8 cm; $P < 0.01$). The results obtained in female participants after each cognitive task used in the study were not significant (Fig. 2; weak effect size for AV, SAV, MS, and KI is $\Delta = 0.2$, 0.19, 0.23, and 0.1, respectively). No difference was found between mental imaging capacities of the participants and the efficacy of the KI (Movement Image Questionnaire effect; $P = 0.88$ for men and $P = 0.27$ for women).

Fig. 1



Effect of cognitive conditions on squat jump performance in male participants (experiment 1). Participants were asked to perform three trials of maximum squat jump, before (J_{1-4}; 29.2 ± 3.8 cm) each cognitive condition [action verb (AV), '31.03 ± 4.2 cm'; silent action verb (SAV), '31.03 ± 4.9 cm'; mental subtraction (MS), '30.4 ± 4.1 cm'; kinesthetic imagery (KI), '30.6 ± 4.4 cm'], randomly ordered for each of the 28 participants. The results are expressed as height of the jumps (expressed in cm) and each condition was compared with J_{1-4}. $^{*}P < 0.05$, $^{**}P < 0.01$, $^{***}P \ll 0.01$.

Fig. 2



Effect of cognitive conditions upon squat jump performance in female participants (experiment 1). Participants were asked to perform three trials of maximum squat jump, before (J_{1-4}; 19.3 cm ± 3.9) each cognitive condition (AV, 20.1 ± 3.9 cm; SAV, 20.05 ± 4.1 cm; MS, 20.2 ± 3.6 cm; KI, 19.7 ± 3.9 cm; size effect $\Delta = 0.2$, 0.19, 0.23, and 0.1, respectively), randomly ordered for each of the 15 participants. The results are expressed as height of the jumps (expressed in cm) and each condition was compared with J_{1-4}. AV, action verb; KI, kinesthetic imagery; MS, mental subtraction; SAV, silent action verb.

The results of the second experiment (Table 1) showed that words related to tongue (*lèche*, $P = 0.78$ compared with the control jumps), hand (*pince*, $P = 0.13$), or meaningless

Copyright © Lippincott Williams & Wilkins. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

Table 1 Effect of action verbs (experiment 2)

	Men ($n=16$)	Women ($n=14$)
J_{1-4}	29.0 ± 3.8	19.5 ± 4.7
Saute	30.6 ± 5.2**	20.2 ± 4.2
Lèche	29.5 ± 4.9	19.7 ± 3.8
Pince	29.9 ± 4.7	19.7 ± 3.7
Tiào	29.2 ± 5.03	19.2 ± 4.3

The height of squat jump (expressed in cm) after pronunciation of the jump action verb (*saute*) was significantly greater in male participants compared with control jumps (J_{1-4}). Other action verbs: *lèche*=lick, *pince*=pinch, *tiao*=jump in Chinese had no significant effect: $^{**}P<0.01$.

(*tiao*, $P = 0.99$) had no effect upon the height of the jumps for both the groups (men and women), which still showed an ameliorating effect (only in men) after the pronunciation of the verb saute ($P < 0.01$).

In the first and second experiment and in both male and female participants, a statistical comparison among the heights of the jumps Js (J_{1-4}) showed no significant difference ($P \geq 0.99$).

To check whether the repetition was responsible for the 'training' of the participants and consequently improving the jumps, the same experimental protocol was repeated (experiment 3) with reference participants who executed the same experiment block without any task during 10 s before the jump. Only men participated in the experiments as no effect was shown on female participants. The results show that training had no significant effect ($P = 0.52$, 0.95, 0.95, and 0.99 for the each 10 s wait, respectively) showing the absence of a training effect.

Discussion

The present results show that the audible and distinct pronunciation of a verb specific for a given action (*saute* = jump; AV) or its silent enunciation (SAV) enhances the performance of a squat jump in male participants. This was also found after mental calculation (MS) and it was comparable with the effect obtained after KI.

The effect of an AV (AV and SAV) is consistent with the motor theory of language processing [13] showing that motor activity can affect and modulate processing of words by taking into account an action-semantic component; a finding that confirms the supposedly specific functional links between action and language systems [14]. The possibility that language and action may both use the motor cortical areas was advanced by Hauk *et al.* [9]. Whenever participants pronounced verbs describing an action performed with feet (kick) and subsequently executed it, both M1 and premotor cortex were functionally activated in the brain areas corresponding to inferior limbs. Interestingly, reading AVs led to a similar somatotopic pattern of activation [9].

Lesions of the M1 cortex do not predictably cause deficits in action-word processing [15], but it has been shown recently that language production is improved in aphasic patients by simply observing motor actions [16]. This leads to the hypothesis that gestures interact closely with language and may consequently produce a lasting modification in the speech production system.

Most of the published results show the impact of motor action on language production and rarely the inverse, that is, the potential effect of language on the performance of the action. An exception is the work of Boulenger *et al.* [17] who showed that language significantly affects hand 'grasping'. In the present experiments the effect of an AV (*saute* = jump) upon the performance of the squat jump is in accordance with the findings of these authors, but only in men. The same result was observed after pronouncing the action verb (SAV) silently.

It is known that M1 is activated, also in a somatotopic manner, when action words related to face, arm, or leg movements are silently read [9]. The involvement of M1 has been found during silent recitation of an alphabet and the naming of animals [18]. It is then possible that the effects upon squat jump performance observed in the present experiments after pronouncing an AV, silently or loudly, should be related to the activation of M1.

Similarly, the effect obtained after MS is a weaker amelioration of the performance, yet in agreement with that found after AV and SAV. Dehaene *et al.* [19] suggested that Exact arithmetic – this is the case in our study – puts emphasis on language-specific representations and relies on a left inferior frontal circuit which is also used for generating associations between words. As a consequence it may be hypothesized that both mental calculation and language generation might implicate Broca's area, known to be involved both in MS [11] and in motor movement [8]. Another study confirms the activation of motor areas during mental arithmetic, where participants were asked to perform all tasks mentally without speaking or using finger movements [20].

The effect of KI upon the squat jump is an expected result considering the important literature on the effects of KI [4]. In the present experiments KI was performed as a 'control' cognitive condition to show its effects upon the squat jump height under the present experimental protocol.

The results of the second experiment confirm the effect of the lower limbs imperative AV (*saute*) in men by showing that imperative and monosyllabic AVs related to other organs (hand and tongue) or meaningless had no effect upon performance. The observation that SAV has the same effect of the pronunciation of the AV may indicate the importance of verb comprehension. A result that perhaps might be related to the function of the mirror neurons located at the conjunction of premotor, Broca's, and primary motor areas [21].

Copyright © Lippincott Williams & Wilkins. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

The lack of effect in female participants is at present unexplained. To our knowledge studies on the effects of language upon a complex motor action, such as a squat jump, have not been performed on female and male participants separately. It may be possible that the effects of language in women produce, perhaps, different functional activations of cerebral areas. A suggestion that should be viewed as a consequence of culture rather than nurture (see: [22]). More research is, however, needed on the participant to give a nonspeculative answer.

Conclusion

The results indicate that the performance of a vertical jump can be improved, in mental imagery novice participants, by the generation (spoken or silent) of an AV (*saute* = jump) in the same way than mental calculation (subtraction) and KI. It is possible that the involvement of motor areas in language processing and in mental calculation may contribute to the preactivation of these areas and thus facilitate the execution of the movement.

Acknowledgements

The authors express their grateful thanks to Dr Stephane Champely for his support in the statistical analysis of the data.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest.

References

1 Decety J, Jeannerod M. Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitt's law hold in motor imagery? *Behav Brain Res* 1996; **72**:127–134.
2 Willems RM, Toni I, Hagoort P, Casasanto D. Neural dissociation between action verb understanding and motor imagery. *J Cogn Neurosci* 2009; **22**:2387–2400.
3 Guillot A, Collet C, Nguyen VA, Malouin F, Richards C, Doyon J. Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study. *Hum Brain Mapp* 2009; **30**:2157–2172.
4 Lotze M, Halsband U. Motor imagery. *J Physiol Paris* 2006; **99**:386–395.
5 Roth M, Decety J, Raybaudi M, Massarelli R, Delon-Martin C, Segebarth C, *et al*. Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport* 1996; **7**:1280–1284.
6 Duffau H, Capelle L, Denvil D, Gatignol P, Sichez N, Lopes M, *et al*. The role of dominant premotor cortex in language: a study using intraoperative functional mapping in awake patients. *Neuroimage* 2003; **20**:1903–1914.
7 Tomasino B, Fink GR, Sparing R, Dafotakis M, Weiss PH. Action verbs and the primary motor cortex: a comparative TMS study of silent reading, frequency judgments, and motor imagery. *Neuropsychologia* 2008; **46**:1915–1926.
8 Gerardin E, Sirigu A, Lehéricy S, Poline JB, Gaymard B, Marsault C, *et al*. Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cereb Cortex* 2000; **10**:1093–1104.
9 Hauk O, Johnsrude I, Pulvermüller F. Somatotopic representation of action words in the motor and premotor cortex. *Neuron* 2004; **41**:301–307.
10 Willems RM, Ozyurek A, Hagoort P. When language meets action: the neural integration of gesture and speech. *Cereb Cortex* 2007; **17**:2322–2333.
11 Burbaud P, Camusb O, Guehla D, Bioulacb B, Caille JM, Allard M. A functional magnetic resonance imaging study of mental subtraction in human subjects. *Neurosci Lett* 1999; **273**:195–199.
12 Hall CR, Martin KA. Measuring movement imagery abilities: a revision of the movement imagery questionnaire. *J Mental Imagery* 1997; **21**:143–154.
13 Rueschemeyer SA, Lindemann O, van Rooij D, van Dam W, Bekkering H. Effects of intentional motor actions on embodied language processing. *Exp Psychol* 2010; **57**:260–266.
14 Pulvermüller F, Hauk O, Nikulin VV, Ilmoniemi RJ. Functional links between motor and language systems. *Eur J Neurosci* 2005; **21**:793–797.
15 Saygın AP, Wilson SM, Dronkers NF, Bates E. Action comprehension in aphasia: linguistic and non-linguistic deficits and their lesion correlates. *Neuropsychologia* 2004; **42**:1788–1804.
16 Marangolo P, Bonifazi S, Tomaiuolo F, Craighero L, Coccia M, Altoè G. Improving language without words: first evidence from aphasia. *Neuropsychologia* 2010; **48**:3824–3833.
17 Boulenger V, Roy AC, Paulignan Y, Deprez V, Jeannerod M, Nazir TA. Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. *J Cogn Neurosci* 2006; **18**:1607–1615.
18 Huang J, Carr TH, Cao Y. Comparing cortical activations for silent and overt speech using event-related fMRI. *Hum Brain Mapp* 2001; **15**:39–53.
19 Dehaene S, Spelke E, Pinel P, Stanescu R, Tsivkin S. Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science* 1999; **284**:970–974.
20 Kazui H, Kitagaki H, Mori E. Cortical activation during retrieval of arithmetical facts and actual calculation: a functional magnetic resonance imaging study. *Psychiatry Clin Neurosci* 2000; **54**:479–485.
21 Watkins K, Paus T. Modulation of cortical excitability during speech perception: the role of Broca's area. *J Cogn Neurosci* 2004; **16**:978–987.
22 Eliot L. *Pink Brain, Blue Brain*. New York: Mariner Books; 2010.

Copyright © Lippincott Williams & Wilkins. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

PUBLICATION 4

T. Rabahi, A. Rifai Sarraj, P. Fargier, C. Clouzeau & R. Massarelli. *Verbe d'action et performance motrice***.** *Kinésithérapie La Revue.* 2012; 12: 42-46

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

http://www.elsevier.com/copyright

Author's personal copy

Kinesither Rev 2012;12:42–46

Verbe d'action et performance motrice

[a]Centre de recherche et d'innovation sur le sport (CRIS, EA 647), université Claude-Bernard–Lyon-1, université de Lyon, campus de la Doua, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne cedex, France
[b]Département de physiothérapie, faculté de santé publique-I, campus Rafic-Hariri, Hadath cedex, Beyrouth, Liban
[c]Institut supérieur d'ostéopathie (ISOSTEO), 330, allée des Hêtres, 69760 Lyon-Limonest, France

Tahar Rabahi [a]
Ahmad Rifai Sarraj [a,b]
Patrick Fargier [a,b]
Cyril Clouzeau [a,c]
Raphael Massarelli [a,b]

Reçu le 10 décembre 2011 ; reçu sous la forme révisé 5 janvier 2012 ; accepté le 17 janvier 2012

RÉSUMÉ

Plusieurs auteurs ont montré que l'imagerie motrice, la production de la parole, et l'exécution motrice sont étroitement liées et peuvent partager les mêmes aires corticales motrices. La présente étude a porté sur l'influence éventuelle de la prononciation et de la perception d'un verbe d'action spécifique sur la performance d'un *squat jump*. Des sujets français et libanais, novices en matière d'imagerie mentale, ont effectué des sauts verticaux avant et après une tâche cognitive (prononciation à haute voix ou répétition mentale ou écoute du mot « saute », en français à Lyon et en français et en arabe à Beyrouth, prononciation d'un verbe sans signification et imagerie kinesthésique). Les résultats montrent que le verbe d'action, évoquant le membre inférieur, sous sa forme parlée, pensée ou écoutée, améliore la performance du saut chez les sujets masculins, mais pas chez les femmes. Les mêmes effets ont été observés pour l'imagerie kinesthésique.

Niveau de preuve. – Non adapté.

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés
Imagerie kinesthésique
Performance motrice
Perception de la parole
Verbe d'action

Keywords
Kinesthetic imagery
Motor performance
Speech perception
Action verb

SUMMARY

*Several results in the literature show that motor imagery, language production, and motor execution share the same or closely related brain motor cortical areas. The present study aimed at studying the possible influence of specific action verb on the performance of a squat jump. French and Lebanese subjects, novice in mental imagery, performed vertical jumps before and after a cognitive task such as: pronunciation of an action verb or its silent enunciation (*saute*: jump in French or* natte *in Arab), pronunciation of a meaningless verb and kinesthetic imagery. The results show that lower limbs action verb and kinesthetic imagery improves the vertical jump in males, but not in female subjects.*

Level of evidence. – *Non-adapted.*

© 2012 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

INTRODUCTION

L'importance de la concentration mentale dans le domaine sportif est bien connue depuis que, dès la première moitié du xxe siècle, des auteurs comme Sackett [1] et Perry [2] se sont employés à montrer le rôle de l'imagerie mentale avant l'exécution d'une tâche motrice. Il s'agit dans ce cas d'imagerie kinesthésique (IK), ainsi appelée car le sujet (pilote automobile, sprinter, etc. ou toute personne bien entrainée pour un mouvement donné) ressent le geste ou le mouvement qu'il doit accomplir [3,4].

Deux études indépendantes publiées en 1996 ont montré, par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), que l'aire motrice primaire (M1 ou aire 4 de Brodmann) intervient lors de la

Auteur correspondant :
Tahar Rabahi,
Centre de recherche et d'innovation sur le sport (CRIS, EA 647), université Claude-Bernard–Lyon-1, université de Lyon, campus de la Doua, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne cedex, France.
Adresse e-mail :
taharrabahi@gmail.com

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.
http://dx.doi.org/10.1016/j.kine.2012.04.003

Author's personal copy

simulation d'un mouvement d'opposition des doigts au pouce [5,6]. Ces résultats étaient inattendus, l'aire M1 étant jusqu'alors considérée comme une aire exclusivement dévolue à l'exécution d'un mouvement moteur. De nombreuses recherches ont, par ailleurs, montré que le langage (notamment via la prononciation répétée de verbes d'action) peut avoir un effet semblable à celui de l'IK en suscitant des activations fonctionnelles au niveau des aires motrices cérébrales (aires prémotrice, motrice primaire et supplémentaire) [7,8]. Une étude, en particulier, a montré que la prononciation des verbes d'action *kick* (donne un coup de pied), *lick* (lèche) et *pick* (pince) activent respectivement des zones de l'aire M1 spécifiquement responsables, des jambes, de la langue et des mains [9]. L'activation du M1 a également été observée lors de l'écoute de verbes d'action impliquant les mains, la langue ou les jambes [10].

La lecture de verbes d'action relatifs à un geste de la main (grasping) a en outre montré une diminution du temps de réaction du poignet pour réaliser le geste correspondant *[11]*, la tâche motrice étant ainsi facilitée.

Par ailleurs, le temps de réaction des mouvements des doigts a été amélioré à la présentation auditive et visuelle des verbes d'action [12].
Compte tenu de l'influence de la parole et de l'IK sur la motricité, la présente étude s'est proposée de mesurer l'éventuel effet de la prononciation des mots d'action, de leur écoute et de l'IK sur la performance d'un geste complexe comme un saut vertical de type *squat jump*.

SUJETS ET MÉTHODE

Cent dix sujets des deux sexes ont donné leur consentement écrit pour participer à une série d'expériences à Lyon et à Beyrouth, après avoir lu le protocole correspondant. À Lyon, les sujets étaient étudiants à l'UFR de sciences et techniques des activités sportives de l'université Claude-Bernard Lyon-1 (les éventuels spécialistes en sauts ont été exclus afin de travailler exclusivement avec des sujets naïfs) ou à l'ISOSTEO (Institut supérieur d'ostéopathie, Lyon-Limonest). À Beyrouth, les sujets étaient étudiants en physiothérapie dans diverses universités libanaises, dont la première langue est l'arabe et la deuxième, le français.

Première expérience (à Lyon)

Un groupe de dix hommes a effectué des sauts selon le même protocole décrit dans les expériences suivantes, sans réaliser les tâches cognitives. Il constitue ainsi le groupe de référence.

Deuxième expérience (à Lyon)

Sujets

Quarante-trois étudiants partagés en deux groupes dont 28 hommes et 15 femmes.

Protocole expérimental

Il a été demandé aux sujets d'effectuer quatre séries de six *squat jumps* (sauts verticaux), espacées de trois minutes de repos. Chaque série a été exécutée en deux temps ; trois sauts successifs sans condition cognitive, suivis de trois sauts réalisés après une tâche cognitive de dix secondes. Les tâches cognitives ont été les suivantes :

- prononciation 11 à 12 fois, à haute voix et de manière claire, du verbe d'action (VA) *saute* (deuxième personne de l'impératif) ;
- énonciation silencieuse du verbe d'action (VAS) *saute* dans la logique de la condition précédente ;
- imagerie kinesthésique (IK) pendant dix secondes.

Avant le début de l'expérience, un questionnaire d'imagerie mentale [13] a été rempli par tous les sujets pour évaluer leurs capacités d'imagerie kinesthésique. Il est enfin à souligner que les conditions cognitives étaient proposées aux sujets de façon aléatoire et cela de même dans les expériences suivantes.

Troisième expérience (à Lyon)

Sujets

Deux groupes de 30 étudiants, 16 hommes et 14 femmes.

Protocole expérimental

Le protocole était similaire à celui de la deuxième expérience, si ce n'est que la tâche cognitive consistait en la prononciation à haute voix des verbes d'action : saute, lèche, pince et tiào (saute en chinois, incompréhensible pour les sujets).

Quatrième expérience (à Beyrouth)

Sujets

Vingt-sept étudiants, 15 hommes et 12 femmes ont participé à cette expérience.

Protocole expérimental

Les verbes d'action *saute*, *natte* (saute en arabe) et *tiào* ont été prononcés par l'un des expérimentateurs (toujours en reprenant le protocole de la deuxième expérience lyonnaise). Dans cette expérience, les sujets entendaient les verbes d'action pendant dix secondes et accomplissaient ensuite le *squat jump*.

Author's personal copy

Mesure des hauteurs

Un appareil de mesure optique, l'Optojump® (Microgate France, 38330 Saint-Ismier) a été utilisé pour mesurer la hauteur des sauts à Lyon. Un Myotest® Pro (Myotest France SAS, 84210 Pernes-les-Fontaines), un accéléromètre portable a été utilisé à Beyrouth. Une expérience de contrôle a révélé une différence de mesure du *squat jump* de 5,9 cm entre l'Optojump et le Myotest en faveur de celui-ci. Cela confirme des résultats récents qui expliquent cet écart comme probablement lié à la méthodologie de mesure, la reproductibilité étant la même dans les deux systèmes [14].

Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R2.11.1. Elle a permis de comparer la différence des moyennes entre les conditions testées à travers une analyse de variance à mesures répétées suivi d'un test de Tukey.

RÉSULTATS

Les sujets de référence de la première expérience (à distinguer des sauts contrôles des autres expériences qui auraient pu montrer un effet d'entraînement), ayant exécuté le protocole sans condition cognitive, font apparaître qu'il n'existe pas d'effet significatif d'entraînement (répétition de saut) ($p \geq 0{,}52$, résultats non montrés). Cela est cohérent avec le fait qu'aucune différence significative entre les sauts effectués sans condition cognitive dans les expérimentations 2 à 4 n'a été observée. Les résultats des trois expériences sont résumés dans le *Tableau I*.

Chez les sujets masculins, l'IK produit une augmentation de la performance du saut (30,6 ± 4,4 cm en comparaison aux sauts contrôles : 29,2 ± 3,8 cm), comme cela était en partie attendu [15], bien que cela se vérifie pour la première fois sur un saut complexe comme le *squat jump*.

La prononciation du verbe correspondant à l'action motrice (saute) produit une augmentation statistiquement significative de la hauteur du squat jump chez les sujets masculins (31,03 ± 4,2 cm) ; de même que la répétition silencieuse de ce mot (31,03 ± 4,9 cm) ou son écoute lorsqu'il est prononcé par un tiers dans la quatrième expérience (24,3 ± 3,8 cm en comparaison aux sauts contrôles : 22,7 ± 3,5 cm).

L'impact du mot *saute*, dans la troisième expérience, à la fois signifiant (sens) et spécifique (en regard de l'action à effectuer), contraste avec l'absence d'effet significatif sur la hauteur de saut des verbes d'action non reliés au saut (*lèche* : 29,5 ± 4,9 cm, *pince* : 29,9 ± 4,7 cm, en comparaison aux sauts contrôles : 29,0 ± 3,8 cm) ou n'ayant pas de sens pour les sujets (*tiào* : saute en chinois : 29,2 ± 5,03 cm).

Il est aussi à noter que le verbe d'action entendu dans la langue maternelle (*natte* : saute en arabe, utilisé dans la quatrième expérience à Beyrouth) est significativement supérieur (27,8 ± 3,8 cm) en comparaison aux sauts contrôles (22,7 ± 3,5 cm ; $p > 0{,}001$).

Enfin, les résultats concernant les sujets féminins sont apparus étonnamment distincts : aucun effet n'a pu être mis en évidence sur la performance du squat jump, quelle que soit la condition cognitive considérée ($p \geq 0{,}18$; Tableau I).

DISCUSSION

Les résultats ici présentés montrent que l'imagerie kinesthésique ainsi que la prononciation, l'énonciation

Tableau I. Effets des conditions sur la performance des sauts.

2e expérience			3e expérience			4e expérience		
Conditions	H(p)	F(p)	Conditions	H(p)	F(p)	Conditions	H(p)	F(p)
Saute	< 0,001	0,35	Saute	0,001	0,56	Saute	< 0,001	0,99
Saute (silencieux)	< 0,001	0,39	Lèche	0,78	0,99	Natte (saute en arabe)	< 0,001	0,91
Imagerie Kinesthésique	0,009	0,92	Pince	0,13	0,99	Tiào (saute en chinois)	0,86	0,18
–	–	–	Tiào	0,99	0,96	–	–	–

Comparaison multiple des moyennes des sauts réalisés avant et après une tâche cognitive de dix secondes (Conditions), chez les hommes (H) et les femmes (F). Les valeurs statistiques de probabilité significative ont été obtenues avec le test de Tukey et la limite de probabilité a été fixée à $p < 0{,}05$. À noter que dans l'expérience 4, les mots ont été écoutés et non pas prononcés.

Author's personal copy

ou l'écoute d'un verbe d'action spécifique et connu peuvent améliorer la performance motrice lors d'un mouvement complexe tel le *squat jump*.
Plusieurs travaux ont montré l'efficacité de l'imagerie mentale en vue d'améliorer la performance motrice chez l'individu sain [16] ou pathologique [17]. Par ailleurs, le langage n'est pas localisé exclusivement au niveau des aires 44 et 45 de Brodmann car des activations fonctionnelles ont été observées par IRMf au niveau des aires motrices, sensitives et temporelles [9,18]. Les résultats présents conduisent à penser que l'audition et, en partie, la compréhension de mots de commande motrice, localisées prioritairement dans la partie postéro-supérieure du temporal, peuvent influencer les aires de la région périsylvienne en général. De ce point de vue, la découverte au début des années 1990 de neurones miroirs, situés dans la région F5 de l'aire ventromédiale prémotrice de macaques [19] et aussi dans la partie postérieure du cortex pariétal, connectés directement aux neurones de l'aire F5 [20], a ouvert le champ à une réinterprétation des relations entre les aires périsylviennes et le cortex pariéto-occipital [18,21]. L'existence de ces neurones a introduit une vision nouvelle des relations existantes entre les circuits neuronaux de diverses aires motrices dont la hiérarchie pour l'exécution de tâches précises, semblait bien établie.
Ainsi, la théorie canonique voit les *inputs* sensoriels (reçus dans l'aire cérébrale sensorielle S1–3) séparés des *outputs* moteurs (réalisés par le cortex M1) [22]. Les processus perceptuels qui en résultent influencent les systèmes moteurs et donc l'action de l'individu [23,24]. Des résultats plus récents [25] indiquent toutefois que ces neurones miroirs, présents dans les régions inféro-frontales, contribuent à la perception et à la compréhension du langage et de l'action, en d'autres termes, il s'agit de neurones sensorimoteurs partageant les qualités de percevoir l'*input* sensoriel et transmettre l'*output* moteur. Point de vue que les résultats de la présente étude concourent à accréditer pour ce qui concerne la réalisation d'un mouvement complexe comme le *squat jump*.
Le manque d'effet des diverses conditions cognitives utilisées chez les femmes demeure pour l'instant inexpliqué. Une possible hypothèse tient à une éventuelle différence dans l'utilisation du langage liée au sexe ou au genre. Ce phénomène a été rapporté dans le cas de l'apprentissage chez les enfants et adolescents [26]. Cela impliquerait une différence dans la fonction de l'aire périsylvienne et ses relations avec les aires motrices cérébrales. Différence qui n'a cependant pas été démontrée en l'état.
Une autre hypothèse serait, plus simplement, que l'acte moteur considéré ici (le saut vertical de type *squat jump*) n'est pas une activité apprécié par les femmes. Certains sujets féminins libanais, par exemple, ont effectivement exprimé aux expérimentateurs des réticences à exécuter le saut qui suivait ou précédait les conditions cognitives. Les sujets féminins lyonnais n'ont cependant pas fait état de telles réticences, présentant sans doute pour certaines (étudiantes en STAPS) une inclination plus naturelle pour cette pratique sportive.
En outre, comment expliquer le manque d'effet de l'IK chez les femmes ? Cela pourrait tenir à ce que ces sujets étaient naïfs en IK, mais les hommes l'étaient tout autant et leurs sauts ont été influencés par celle-ci. L'étude dont nous faisions référence plus haut [26] rapporte, chez des enfants et adolescentes des deux sexes, une différence semblable observée dans la performance et l'apprentissage moteur, indiquant que les filles se montrent moins efficaces que les garçons. Il faut toutefois se méfier de telles différences, qui peuvent être seulement apparentes : les travaux d'Eliot [27] montrent en effet que la plus grande partie des différences fonctionnelles analysées entre hommes et femmes sont d'origine culturelle et éducative plutôt que physiologique.
La question des différences observées entre les deux sexes dans cette étude reste en tout état de cause largement ouverte et appelle de nouvelles investigations.

Points à retenir

1. La répétition (à haute voix ou silencieuse) d'un verbe d'action (saute) améliore la hauteur d'un saut vertical.
2. L'amélioration est spécifique car des mots indiquant d'autres actions ne produisent pas d'effet.
3. Elle est tout aussi importante si la langue maternelle est utilisée ou une langue apprise.
4. Les femmes ne présentent pas d'amélioration avec aucune des conditions cognitives utilisées.

Déclaration d'intérêts
Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Remerciements
Nous remercions chaleureusement notre collègue le Dr. Stephane Champely, spécialiste en statistiques, pour son aide compétente et amicale.

RÉFÉRENCES

[1] Sackett RS. The relationship between amount of symbolic rehearsal and retention in maze habit. J Gen Psychol 1935; 13:113–28.
[2] Perry HM. The relative efficiency of actual and imaginary practice in 5 selected tasks. Arch Psychol 1939;4:5–75.

Author's personal copy

[3] Daselaar SM, Porat Y, Huijbers W, Pennartz CMA. Modality-specific and modality-independent components of the human imagery system. NeuroImage 2010;52:677–85.
[4] Jeannerod M. Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. NeuroImage 2001;14:S103–9.
[5] Roth M, Decety J, Raybaudi M, Massarelli R, Delon-Martin C, Segebarth C, et al. Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. Neuroreport 1996;7:1280–4.
[6] Porro CA, Francescato MP, Cettolo V, Diamond ME, Baraldi P, Zuiani C, et al. Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. J Neurosci 1996;16: 7688–98.
[7] Duffau H, Capelle L, Denvil D, Gatignol P, Sichez N, Lopes M, et al. The role of dominant premotor cortex in language: a study using intraoperative functional mapping in awake patients. NeuroImage 2003;20:1903–14.
[8] Tomasino B, Fink GR, Sparing R, Dafotakis M, Weiss PH. Action verbs and the primary motor cortex: a comparative TMS study of silent reading, frequency judgments, and motor imagery. Neuropsychologia 2008;46:1915–26.
[9] Hauk O, Johnsrude I, Pulvermüller F. Somatotopic representation of action words in the motor and premotor cortex. Neuron 2004;41:301–7.
[10] Watkins KE, Straffela AP, Paus T. Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. Neuropsychologia 2003;41:989–94.
[11] Boulenger V, Roy AC, Paulignan Y, Deprez V, Jeannerod M, Nazir TA. Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. J Cogn Neurosci 2006;18:1607–15.
[12] Sato M, Mengarelli M, Riggio L, Gallese V, Buccino G. Task related modulation of the motor system during language processing. Brain Lang 2008;105:83–90.
[13] Hall CR, Martin KA. Measuring movement imagery abilities: a revision of the movement imagery questionnaire. J Mental Imagery 1997;21:143–54.
[14] Casartelli N, Muller R, Maffiuletti NA. Validity and reliability of the Myotest accelerometer system for the assessment of vertical jump height. J Strength Cond Res 2010;24:3186–93.
[15] Couillandre A, Lewton-Brain P, Portero P. Exploring the effects of kinesiological awareness and mental imagery on movement intention in the performance of demi-plié. J Dance Med Sci 2008;12:91–8.
[16] Driskell JE, Copper C, Moran A. Does mental practice enhance performance? J Appl Psychol 1994;4:481–92.
[17] Heremans E, Feys P, Nieuwboer A, Vercruysse S, Vandenberghe W, Sharma N, et al. Motor imagery ability in patients with early- and mid-stage Parkinson disease. Neurorehabil Neural Repair 2011;25:168–77.
[18] Pulvermüller F, Fadiga L. Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. Nature Rev Neurosci 2010; 11:3513–60.
[19] Di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G. Understanding motor events: a neurophysiological study. Exp Brain Res 1992;91:176–80.
[20] Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions. Brain Res Cogn Brain Res 1996;3:131–41.
[21] Rizzolatti G, Sinigaglia C. The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. Nature Rev Neurosci 2010;11:264–74.
[22] Hubel D. Eye, brain and vision. New York: Scientific American Library; 1995.
[23] Fodor JA, Miller GA, Langendoen DT. The language of thought. Harvard: Harvard University Press; 1979.
[24] Shallice T. From neuropsychology to mental structure. New York: Cambridge University Press; 1988.
[25] Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. Ann Rev Neurosci 2004;27:169–92.
[26] Dorfberger S, Adi-Japha E, Karni A. Sex differences in motor performance and motor learning in children and adolescents: an increasing male advantage in motor learning and consolidation phase gains. Behav Brain Res 2009;198:165–71.
[27] Eliot L. Pink Brain, blue brain. New York: Mariner Books; 2010.

PUBLICATION 5

R. Massarelli, B. Rupied, **T. Rabahi**, A. Rifai Sarraj & P. Fargier. *L'Unité du Corps et du Mental. Kinésithérapie La Revue.* 2012; 12: 36-41

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

http://www.elsevier.com/copyright

Author's personal copy

Kinesither Rev 2012;12:36–41

L'unité du corps et du mental☆

[a]Centre de recherche et d'innovation sur le sport (CRIS, EA 647), université de Lyon, université Claude-Bernard–Lyon-1, campus de la Doua, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne cedex, France
[b]Département de physiothérapie, faculté de santé publique-I, campus Rafic-Hariri, Hadath cedex, Beyrouth, Liban

Raphael Massarelli [a,b]
Benjamin Rupied [a]
Tahar Rabahi [a]
Ahmad Rifai Sarraj [a,b]
Patrick Fargier [a,b]

Reçu le 10 décembre 2011 ; révisé le 5 janvier 2012 ; accepté le 17 janvier 2012

RÉSUMÉ

Basée sur l'hypothèse de l'unicité du corps et du mental, l'approche théorique ici présentée relie l'action (motrice) à l'idée et à la pensée. Selon cette approche s'appuyant sur divers axiomes, l'action semble être prioritaire par rapport à la pensée et, probablement, aussi à l'idée. Par une expérience, conduite sur huit boxeurs, nous avons essayé de montrer si, dans le cadre de cette approche, le corps peut influencer le mental avec un cheminement théorique inverse de celui communément utilisé par l'imagerie mentale. Les résultats montrent que lorsque les boxeurs entrent dans un état mental de « ne pas penser » ils arrivent à donner le mieux de leur performance ce qui pourrait confirmer l'hypothèse de l'approche théorique. Un tel état mental ne peut être rejoint qu'après un entraînement intensif.

Niveau de preuve. – Pas applicable.

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

SUMMARY

Considering that body and mind are a single entity, a theoretical approach is presented that binds motor action, idea and thought. Following this approach based on some axiomatic standpoints, action appears to be pre-eminent with relation to thought and probably idea. An experiment was performed to show that, following the approach; the body functions may influence the mind. This follows an inverse reasoning compared to mental imagery. The results show that a state of mind of no think, which may be attained uniquely after intense training, seems to confirm the hypothesis of the theoretical approach.

Level of evidence. – *Non adapted.*

© 2012 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Mots clés
Action
Mental
Mouvement
Ne pas penser
Unité corps

Keywords
Action
Mind
Movement
No think
Body

INTRODUCTION

Dawkins [1] a suscité nombre de réactions dans la communauté scientifique, en suggérant que les idées, conçues en tant que *memes* (du grec *miméma*, désignant une chose que l'on imite [2]), puissent diffuser, à l'instar des virus, selon un processus de contagion. Sans besoin d'adhérer au propos de Dawkins et en se gardant bien de tomber dans la discussion évolutionniste qui a suivi [3,4], il suffit de noter que l'acceptation de nouvelles idées requiert parfois plusieurs siècles, en raison des obstacles résistants auxquels elles se heurtent. Elles peuvent même entrer en conflit avec d'autres idées qui sont devenues parfois endémiques. Il en a été ainsi et il en est encore dans certains milieux, lorsqu'on aborde la relation entre le corps et le mental. L'idée endémique veut que le corps soit séparé du mental.

Cependant, depuis une vingtaine d'années, de nombreuses preuves scientifiques montrent au contraire que corps et mental sont la même entité.

Les débats mettant en présence les tenants du dualisme et les promoteurs du monisme ont en réalité perduré au fil des siècles mais avec un avantage certain

☆Une partie des résultats a été présenté au 8e congrès international de l'Ordre des physiothérapeutes au Liban, Beyrouth, 17–18 septembre 2011.

Correspondance
Raphael Massarelli,
Centre de recherche et d'innovation sur le sport (CRIS, EA 647), université de Lyon, université Claude-Bernard–Lyon-1, campus de la Doua, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne cedex, France.
Adresse e-mail : raphael.massarelli@univ-lyon1.fr

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.
http://dx.doi.org/10.1016/j.kine.2012.04.001

Author's personal copy

pour les dualistes. Platon, dans le *Phédon*, défend que l'âme (« psyché » = souffle, esprit, psyché) est tout à la fois « chose séparée du corps » (94d5-6) et « prisonnière du corps » (82e-83). Aristote, élève de celui-ci, avance en revanche dans *De Anima* (431a) : « quiconque peut [. . .] aisément voir que le mental (« nous » = mental, lat. mens) ne peut pas être séparée du corps ». Quelques siècles plus tard, René Descartes, semble séparer nettement la *res extensa* (corps) de la *res cogitans* (l'intellect-âme), même s'il y ajoutera des nuances (voir ses *Principes de la philosophie*). Moins d'un demi-siècle plus tard, Baruch Spinoza écrit en revanche (*Éthique*, Proposition xxi, scolie, Livre 2) : « [. . .] nous avons montré que [. . .] l'âme et le corps, sont un seul et même individu qui est conçu tantôt sous l'attribut de la pensée, tantôt sous celui de l'étendue ». Des travaux expérimentaux en neurosciences ont produit, ces 20 dernières années, des résultats accréditant le point de vue de philosophes tels qu'Aristote ou Spinoza [5–11]. Ainsi, nonobstant des résistances philosophiques ou diverses croyances défendant le point de vue dualiste, des nouveaux points de vue neuroscientifiques se sont développés, dépassant même le concept d'unicité du système corps/mental pour envisager celle du système que constitue le corps, le mental et l'environnement, physique ou social. Le concept d'*embodiement*, terme difficilement traduisible en langue française a vu le jour. L'*embodied cognition* renvoie ainsi à l'étude de l'incorporation du mental dans le corps ou de ce que nous entendons ici par système unitaire corps/mental. Les propriétés du mental (pensées, idées, émotions) sont censées être forgées par le corps *via* les perceptions, l'action motrice, l'interaction avec le milieu. L'*embodied embedded cognition* correspond à l'idée d'une incorporation du système corps/mental dans l'environnement. Arguant de l'existence d'un couplage étroit entre l'environnement et le système corps/mental, certains auteurs [12,13] défendent l'existence d'une triade unitaire entre ces trois éléments.

Comment ces idées novatrices peuvent-elles influencer les pratiques de soin ? Depuis une dizaine d'années, l'on a essentiellement escompté ici une action du mental sur le corps, notamment via le recours à l'imagerie mentale [14]. Ce qui était en phase avec le paradigme en place, affirmant la supériorité de fonctions humaines parfois qualifiées de « supérieures » sur le corps souvent entendu en tant que « chair » ou « machine » effectrice. L'idée d'une possible action du corps sur les fonctions dites « supérieures » est autrement décalée en regard de l'orthodoxie. Pour user d'une antimétabole, cela revient à considérer que l'on ne pleure pas parce qu'on est triste mais qu'on est triste car on pleure. En d'autres termes, ce qui cause les larmes peut être accessible au corps avant de toucher la conscience de l'individu.

Les savants considèrent qu'en matière de science, on développe des hypothèses plutôt que des certitudes, tout particulièrement en sciences du vivant. Certains axiomes, toutefois, peuvent conduire à l'échafaudage d'une théorie et ces quelques paragraphes introductifs laissent de fait transparaître un abord théorique non orthodoxe mais précisément fondé en raison d'une mise en question de l'orthodoxie et étayé par des résultats expérimentaux. C'est à partir d'axiomes[1] concernant l'action (motrice), les idées et les pensées qu'une interprétation basée sur le système unitaire corps/mental sera ici présentée.

AXIOMATIQUE

Il est bien connu que l'action motrice, le mouvement, constitue l'une des caractéristiques fondamentales du vivant. Téléologiquement parlant, celle-ci est au demeurant peut-être la plus importante car elle sous-tend les rapports à l'environnement *via* les voies perceptivo-motrices. Dans le paradigme classique, cette relation est linéaire : idée[2] >> pensée[3] >> action. D'une intuition naît une pensée qui détermine à son tour l'action à entreprendre. Cependant, l'Homme n'est pas un animal constamment conscient de sa conscience : sa vie est constamment influencée par cette mystérieuse entité que Freud dénomme le *surmoi* et Jung « l'inconscient ». La réalisation consciente de nos actions survient parfois lorsque celle-ci est déjà réalisée [5,6].

La conduite automobile citadine appelle bien souvent à œuvrer avec des temps de réaction extrêmement rapides, de même qu'un boxeur doit par exemple réagir à l'attaque de son adversaire pour l'esquiver et impulser une contre-attaque, en un laps de temps fort court à la limite des capacités du conscient. Cela peut s'expliquer car nous savons que nos (ré)actions motrices, une fois entraînées, ne sont pas perçues immédiatement par le conscient et qu'elles sont impulsées par l'inconscient [5,6]. Les réactions soudaines d'un automobiliste ou d'un boxeur ci-dessus évoquées sont initialement inconscientes et donc réalisées en l'absence de pensées et probablement même d'idée.

Axiome 1

Nous pouvons dès lors retenir l'axiome 1 selon lequel l'action motrice peut précéder la pensée (et peut-être même l'idée préalable à celle-là).

[1] Il est bien utile de noter que les axiomes qui seront présentés par la suite dérivent d'abondant résultats parus en littérature, mais qu'une revue extensive de celle-ci n'est pas adaptée à la forme du présent article.

[2] Nous définirons l'idée dans le paragraphe suivant.

[3] À toutes fins utiles, nous retenons la définition du terme fourni par le Trésor de la langue française : « ensemble des fonctions psychiques et psycho-physiologiques ayant la connaissance pour objet ; ensemble des phénomènes par lesquels ces fonctions se manifestent ».

Author's personal copy

Une définition du significat d'idée est fournie par Baldwin [15], qui lui donne un sens dérivant de celui que le grec ancien donnait au mot *idéa* (forme, figure, aspect). Ainsi envisagées, les idées renvoient à un flux continu de formes topologiques. L'hypothèse selon laquelle ce continuum peut correspondre à un flux électrique de bas ampérage qui traverse des réseaux neuronaux s'organisant sous des formes topologiques est au demeurant cohérente avec la démonstration de la modularité fonctionnelle du cerveau humain à l'état de repos [16]. Le flux continu de ces formes ne cesse que lors du sommeil profond ou lorsque l'idée se transforme en pensée. Celui-ci peut être assimilé à un flux continu et chaotique de petits potentiels d'action, passant au travers de nombreux réseaux cérébraux. Potentiels dont la force est trop faible pour établir des connexions stables (des synapses robustes, dans le jargon neurophysiologique) et donc susciter une mémorisation [17]. Lorsqu'une idée est captée par la conscience, elle devient pensée et est alors traitée selon les canons de la logique, par des potentiels d'action de plus en plus forts conduisant à une mémorisation via l'établissement de synapses robustes, selon les principes établis par Hebb [18].

Axiome 2

Il en va de l'axiome 2 : les idées sont un flux continu et chaotique de formes.
Qu'en est-il de la nature de la pensée, ainsi considérée ? Chacun peut remarquer que la pensée dépend du langage en lequel nous nous exprimons au quotidien, qu'il soit ou non maternel, hormis dans le cas des calculs mathématiques où celui-là apparaît bien souvent primordial [19]. La langue que l'on parle est un attribut distinctif en prise avec des concepts et une culture distinctive. Nos pensées sont structurées selon la langue dans laquelle nous nous exprimons, ce qui établit la seule vraie différence existante entre les humains, alors que les gestes et certaines expressions du visage (des actions motrices) sont d'une compréhension universelle. La construction du langage parlé forme nos processus rationnels et influence notre conscience. Cette dernière est abondée par des mots et des phrases qui nous permettent de construire des pensées et de les mémoriser. La mémoire correspondant, en partie tout du moins, au passage répété de potentiels d'action (LTP, *long term potentiation* ou potentialisation à long terme) au travers de réseaux de neurones corticaux et au renforcement de synapses robustes [17,20].

Axiome 3

Ce qui conduit à l'axiome 3 : la pensée dépend de la parole (du langage)[4].

[4] La réciproque étant tout aussi vraie, l'axiome indique toutefois que sans parole la pensée ne peut pas se développer.

Le dernier élément de cette esquisse théorique reliant action, idée et pensée renvoie à la sphère des émotions. S'il est sans doute délicat d'opérer un inventaire exhaustif de la palette des émotions que l'humain peut éprouver, l'on peut plus aisément s'enquérir des émotions humaines les plus élémentaires ou basiques. Toute émotivité semble dériver de deux sensations de base qui se détachent en effet de façon nette, la peur et le plaisir [21], qui deviennent ce que Freud [22] dénommait de fait « pulsions » (*Trieb*) et qui, par après, se transforment en émotions. Celles-là peuvent intervenir positivement ou négativement dans l'action, leur gestion constituant évidemment un enjeu dans tous les domaines de la vie quotidienne.

Axiome 4

Retenons dès lors l'axiome 4 suivant : les émotions peuvent moduler l'action motrice (et réciproquement).
On peut en définitive produire un schéma de synthèse *(Fig. 1)* mettant en système les concepts d'action, d'idée et de pensée, voulu plus complet et pertinent que le classique modèle hiérarchisé (idée >> pensée >> action). Ce schéma-ci vise en particulier à signifier la primauté dans l'action et sa performance de l'idée sur la pensée et la possibilité que l'action puisse même intervenir en amont de l'idée. Une réaction plus qu'une action qui renvoie à ce qu'on appelait parfois par le passé des réponses réflexes et nous savons aujourd'hui que

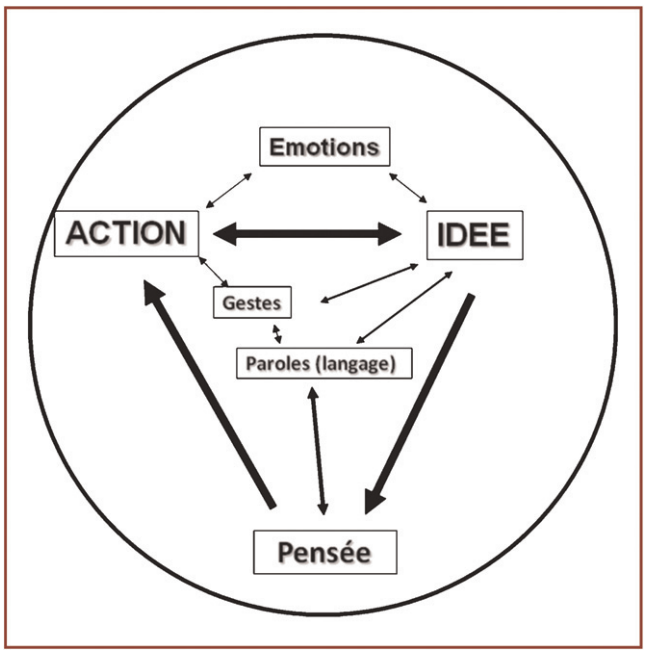


Figure 1. Représentation des relations entre action, idée et langage. Cette image présente de manière simplifiée les concepts de base qui constituent l'approche théorique que nous dénommons de « l'idéaction ».

Author's personal copy

certaines réactions motrices peuvent dépendre du système sensoriel [23] au point de précéder l'idée consciente correspondante [5,6]. Un tel processus serait subordonné à l'état émotionnel de l'individu et sans doute aussi au niveau d'entraînement du geste ou de l'action motrice en jeu. La *Fig. 1* correspond in *fine* à une approche théorique de cette relation entre idée et action, ou « idéaction », qui pourrait être à la base de toute performance motrice, au-delà ou en-deçà de la pensée.

EXPÉRIMENTATION

L'approche théorique concernant « l'idéaction » est de nature à susciter des travaux expérimentaux. Le construit « d'idéaction » procède d'un point de vue radicalement différent de celui dont procède le recours à l'imagerie mentale chez l'individu sain ou dans le cas de certaines pathologies [16,24–26]. Ce construit-ci intéresse l'influence du corps sur le mental plutôt que la réciproque. Le travail dont il est rendu compte ici intéresse le cas de spécialistes en sports de combat, mais il peut tout aussi bien intéresser tous sujets ayant subi un apprentissage rigoureux d'un ensemble de mouvements (e.g., la conduite automobile). Il a été rapporté que les boxeurs abordent un combat en surmontant les émotions, que celui-ci suscite, par un état mental qui les conduit à « ne pas penser ». Nous avons investigué cet état psychologique à la lumière de l'échafaudage théorique exposé précédemment, dont le concept « d'idéaction » constitue une pièce-maitresse. Les résultats préliminaires obtenus sont présentés et discutés ci-après.

MÉTHODE

Huit boxeurs de haut niveau (tous professionnels avec au minimum une dizaine de combats à leur actif en tant que professionnels) ont été interviewés durant en moyenne 40 minutes ; leurs propos ayant été enregistrés et retranscrits sous MS-Word®. Ces entretiens ont été réalisés pour obtenir des informations sur les émotions ressenties par ces boxeurs en précisant leurs états émotifs en amont d'un combat (le mois, la semaine, le jour, l'heure ainsi que les instants précédant un combat).
Leurs propos ont ensuite été analysés en recourant au logiciel PROgramme de sociologie pragmatique, expérimentale et réflexive sur ordinateur (Prospero©) - Doxa ; un analyseur de langage largement utilisé, en sociologie, notamment [27] qui permet d'explorer, d'analyser et de comparer des corpus de textes numérisés.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Il a été demandé aux sujets interviewés de se remémorer leur ressenti à partir du mois précédant leur dernier combat et jusqu'au début même de ce combat. Les résultats de l'analyse opérée avec Prospero© quant aux dires des sujets sont présentés dans le *Tableau I*. Les huit boxeurs interrogés sont apparus ressentir un état d'anxiété perçue environ un mois en amont du combat. Celui-là renvoie essentiellement à une peur de décevoir autrui (*coach*, parents, amis, etc.) et non pas à la peur de perdre une rencontre, voire un titre. Ce qui est cohérent avec le fait que le monde de la boxe est relativement clos, les proches du boxeur formant autour de lui une sorte de barrière de protection [28]. Il est dès lors logique que le boxeur ressente une peur de ne pas être à la hauteur de cette « affection » que ses proches lui manifestent et donc en quelque sorte de les « trahir » [29]. C'est ce qui ressort des dires des huit boxeurs à l'étude qui ont exprimés des mots comme « trahison », « trahir » et « décevoir » ou « déception ».

Tableau I. Ressenti émotif des boxeurs avant le combat.

Temps	Ressenti
D'un mois avant le combat	
À la montée sur le ring	La peur de décevoir (les autres)
D'un mois avant le combat	
À un jour précédent le combat	La peur de gagner du poids
D'une semaine avant le combat	L'anxiété (ressentie) de devoir
À un jour précédent le combat	Perdre du poids (éventuellement)
Lors de l'entrée dans les vestiaires	La peur de décevoir
Avant le combat	Augmente sensiblement
Au son du gong	Disparition soudaine des symptômes
Après le son du gong	État de « ne pas penser »

Les ressentis concernent tous les sujets interviewés (8) dont l'anxiété devient de plus en plus visible et concrète lors de l'entrée dans les vestiaires avant le combat. Le son du gong fait disparaître soudainement toute anxiété. États de ne pas penser. . .

Author's personal copy

L'autre problème majeur ressenti par tous les sujets concerne le poids. Cela peut surprendre en ce qu'on est en présence de personnes en excellente forme physique et présentant de très bons indices de masse corporelle. Il en va pour autant d'un stress pratiquement depuis la fin d'un combat jusqu'à la pesée pour le suivant : les boxeurs combattent par catégories de poids et le spectre du changement non souhaité de catégorie est dès lors quasiment omniprésent. Le combattant se contraint de fait à un régime draconien, évitant même, si nécessaire, de boire le jour précédant la pesée, ce qui suscite évidemment un stress physio-psychologique notable [30] (cela transparaît à nouveau dans les dires des boxeurs interviewés).
En revanche, chez aucun des sujets n'est exprimée une quelconque peur de se faire mal ou de blesser l'adversaire. Le leitmotiv du boxeur « tellement habitué à la douleur » est ici omniprésent [30].
Si l'état psychologique ainsi décrit devient de plus en plus intense au fil du temps, jusqu'au début de la rencontre, il en va tout autrement lorsque retentit le gong signifiant le début du combat. Toute anxiété, angoisse, peur disparaît : les boxeurs interviewés répondent qu'ils « ne pensent plus à rien ».
Selon les mots de Ripoll [31], il s'agit d'un « état de grâce » qui conduit à une « disparition » de l'émotivité, et notamment de l'état d'inquiétude des boxeurs. Peut-être l'explication de cet état de fait peut-elle être autre. Nous connaissons les effets bien connus de l'imagerie mentale sur la performance motrice et particulièrement de l'imagerie kinesthésique. Ils tiennent à ce que le sujet qui la pratique concentre son attention sur le geste à accomplir et « ressent » physiquement ce geste. Dans notre cas de figure, on a l'idée que les boxeurs au moment du gong cessent de penser pour porter une attention extrême à « tout » ce qui les entoure, à l'image d'un félin en chasse, qui se fige devant une proie tout en prêtant attention à d'éventuels signaux pouvant suggérer un danger pour pouvoir y réagir le plus rapidement possible.

S'il en est ainsi du boxeur, comme de tout individu placé dans des circonstances particulièrement intenses, on pourrait avancer que l'état précédemment caractérisé sous l'angle d'une absence de pensée est un état de pleine conscience où les capacités perceptivo-motrices du sujet sont singulièrement potentialisées.

Cela serait possible uniquement à la condition que la préparation physique et technique ait été suffisamment poussée. Une personne au mental fort développé mais au corps peu entraîné ne pourrait parvenir à cet état, à tout le moins au but poursuivi via celui-là. Dans le cas d'un boxeur, un entraînement approprié hypothèquerait une réaction efficace aux attaques adverses (tout comme pour l'automobiliste : des années de conduite assureraient la réaction motrice appropriée à l'apparition soudaine d'un obstacle). Il est alors envisageable que les aires perceptivo-motrices du boxeur seront à même de faire réagir le corps sans assistance de la pensée et peut-être même de la conscience, à tout le moins au début de l'action.
Aucun des boxeurs participant à l'étude n'a en tout état de cause suggéré qu'il pense lors d'un combat. Tous ont en revanche, clairement signifié en cette circonstance un total « éveil » de leurs sens, de leur capacité de perception.

CONCLUSION

Les évidences expérimentales recueillies au cours de la dernière vingtaine d'années signifient l'unicité du corps et du mental dans la construction de ce qu'en langue anglaise on définit comme *consciousness*, pour distinguer la conscience perceptivo-motrice de la conscience morale. Ces découvertes suggèrent au thérapeute, de considérer que le soin du corps ne peut se faire en l'absence d'un soin du mental. Cela est du reste déjà souvent reconnu en thérapie [26].
Les résultats qui ont été ici présentés sur les effets du « ne pas penser » conduisent à suggérer cet état mental de « simple » éveil comme possible adjuvant thérapeutique, certains apprentissages moteurs, relevant d'une gestuelle quotidienne ou professionnelle n'étant en rien l'apanage exclusif des champions sportifs.

Déclaration d'intérêts
Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Points à retenir

1. Revue d'axiomes résultant de données expérimentales en neurosciences qui précisent l'unicité de l'entité corps et mental.
2. Développement d'une approche théorique sur la possible primauté de l'action (le mouvement) sur l'idée et la pensée.
3. Les résultats montrent lors du son du gong l'anxiété disparaît laissant un état qu'ils définissent de « ne pas penser ».
4. L'interprétation laisse penser que cet état stimule la capacité perceptive des boxeurs.

Author's personal copy

RÉFÉRENCES

[1] Dawkins R. The viruses of the mind. In: Dalhbom B, editor. Dennett and his critics: demystifying mind. Cambridge: MA: Blackwell; 1993.
[2] Dennett D. Consciousness explained. London: Penguin; 1993.
[3] Sperber D. La contagion des idées. Paris: Odile Jacob; 1996.
[4] Sperber D. An objection to the memetic approach to culture. In: Aunger R, editor. Darwinizing culture: the status of memetics as a science. Cambridge Oxford: University Press; 2000p. 163–73.
[5] Libet B. Reflections on the interaction of the mind and brain. Prog Neurobiol 2006;78:322–6.
[6] Libet B. Do we have free will? J Conscious Stud 1999;6:47–57.
[7] Cleeremans A. L'unité de la conscience. In: Cazenave M, editor. De la science à la philosophie. Paris: Albin Michel; 2005147–71.
[8] Chalmers DJ. The conscious mind. Oxford: Oxford University Press; 2004.
[9] Baars BJ. The conscious access hypothesis: origins and recent evidence. Trends Cogn Sci 2002;6:47–52.
[10] Dehaene S. The cognitive neuroscience of consciousness. Amsterdam: Elsevier; 2001.
[11] Edelman GM, Tononi G. A universe of consciousness. New York: Basic Books; 1999.
[12] Clark A, Chambers D. The extended mind. Analysis 1999;58:7–19.
[13] Clark A. Supersizing the mind. New York: Oxford University Press; 2008.
[14] Stevens JA, Phillips Stoykov ME. Using motor imagery in the rehabilitation of hemiparesis. Arch Phys Med Rehabil 2003;84: 1090–2.
[15] Baldwin JM. Dictionary of philosophy and psychology. Retrieved October 20, 2008 from York University, Toronto, Ontario;1977. Web site: http://psychclassics.yorku.ca/Baldwin/Dictionary/.
[16] Ferrarini L, Veer IM, Baerends E, van Tol MJ, Renken RJ, van der Wee NJA, et al. Hierarchical functional modularity in the resting-state human brain. Hum Brain Mapp 2008;30:2220–31.
[17] Barnes CA, Jung MW, McNaughton BL, Korol DL, Andreasson K, Worley PF. LTP saturation and spatial learning disruption: effect of task variables and saturation levels. J Neurosci 1994;14: 5793–806.
[18] Hebb DO. The organisation of behavior-A neurophysiological theory. New York: Wiley; 1949.
[19] Fodor JA, Miller GA, Langendoen DT. The language of thought. Harvard: Harvard University Press; 1979.
[20] McNaughton N, Wickens J. Hebb, pandemonium and catastrophic hypermnesia: the hippocampus as a suppressor of inappropriate associations. Cortex 2003;39:1139–63.
[21] Solomon RL. The opponent process theory of acquired motivation. American Psychologist 1980;35:691–712.
[22] Freud S. Pulsions et destin des pulsions. Paris: Presses Universitaires de France; 1915.
[23] Rizzolatti G, Sinigaglia C. The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. Nature Rev 2010;11:264–74.
[24] Braun SM, Beurskens AJ, Borm PJ, Schack T, Wade DT. The effects of mental practice in stroke rehabilitation: a systematic review. Arch Phys Med Rehabil 2006;87:842–52.
[25] Moseley GL. Graded motor imagery for pathologic pain. A randomized controlled trial. Neurology 2006;67:2129–34.
[26] Stenekes MW, Geertzen JH, Nicolai JP, De Jong BM, Mulder T. Effects of motor imagery on hand function during immobilization after flexor tendon repair. Arch Phys Med Rehabil 2009;90:553–9.
[27] Chateaureynaud F. Prospéro. Une technologie littéraire pour les sciences humaines. Paris: Éditions CNRS; 2003.
[28] Lévêque M. Au cœur de la compétition sportive. Approches psychologique et sociale. Wavre: Ed. Mardaga; 2010.
[29] Philonenko A. Histoire de la boxe. Paris: C de Bartillat; 2002.
[30] Rauch B. Boxe, violence du XXe siècle. Paris: Aubier Montaigne; 1992.
[31] Ripoll H. Le mental des champions. Paris: Payot; 2008.

PUBLICATION 6

A. Rifai-Sarraj, F. Khaled, **T. Rabahi**, P. Fargier & R. Massarelli. *La visualisation d'un saut vertical améliore la performance d'un geste similaire chez un observateur*. *Kinésithérapie La Revue* 2012; 12: 47-51

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

http://www.elsevier.com/copyright

Author's personal copy

Kinesither Rev 2012;12:47–51

La visualisation d'un saut vertical améliore la performance d'un geste similaire chez un observateur

[a]*Département de physiothérapie, faculté de santé publique-I, campus Rafic-Hariri, Hadath cedex, Beyrouth, Liban*
[b]*Centre de recherche et d'innovation sur le sport (CRIS, EA 647), université Claude-Bernard–Lyon-1, campus de la Doua, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne cedex, France*

Ahmad Rifai Sarraj [a,b,1]
Fatima Khaled [a,1]
Tahar Rabahi [b]
Patrick Fargier [a,b]
Raphael Massarelli [a,b]

Reçu le 10 décembre 2011 ; reçu sous la forme révisée le 5 janvier 2012 ; accepté le 17 janvier 2012

RÉSUMÉ

Au cours de ces dernières années, nombre d'études ont montré la capacité de différents types de stimulations perceptuelles à moduler l'action motrice. En particulier, la découverte des neurones miroirs a suggéré que la visualisation d'un objet en mouvement et/ou d'un individu en action, puisse influer sur la motricité d'un observateur attentif. Les études ici présentées montrent en cohérence que la hauteur d'un *squat vertical jump* peut être améliorée lorsque le sauteur visualise au préalable une vidéo du même type de saut. Elles indiquent en outre que le visionnage simultané de deux vidéos accroît significativement davantage la performance que celui d'une seule.

Niveau de preuve. – Non adapté.

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

SUMMARY

Various perceptual stimuli are capable to modulate motor actions as several studies have shown in the recent years. In particular, the discovery of mirror neurons has shown the possibility that the visualization of moving objects or individuals may have an effect in improving the locomotion of an attentive observer. The present results show that the height, of a vertical jump may be improved by the visualization of a jumper, who will execute the same jump to be realized by an observer. Such improvement remains constant during the experimental period and is further increased when two videos are shown simultaneously.

Level of evidence. – *Non-adapted.*

© 2012 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Mots clés
Action motrice
Imagerie mentale
Neurones miroirs
Visualisation d'une action

Keywords
Motor action
Mental imagery
Mirror neurons
Action visualization

INTRODUCTION

La plupart des stimuli perceptuels sont de nature à solliciter la fonction motrice cérébrale et à améliorer conséquemment la motricité de l'individu. Ce type d'influence a été particulièrement étudié en recherche, voire utilisé en thérapie [1,2] dans le cas des stimuli cognitifs procédant de l'imagerie kinesthésique (IK) ou de l'imagerie visuelle (IV).

La première (IK), qui consiste à percevoir mentalement les sensations procurées par un mouvement donné, sans l'exécuter, a été étudiée et utilisée dès les années 1930 [3,4]. Le recours à l'IK s'est par la suite relativement généralisé dans le champ sportif, voire au-delà. En effet, cette simulation du mouvement, selon les termes de Jeannerod [5], active les aires cérébrales pré-motrice et motrice primaire [6,7] et est utilisable par quiconque ayant

[1] ARS et FK ont contribué également au travail présenté ici.

Auteur correspondant :
Ahmad Rifai Sarraj,
Centre de recherche et d'innovation sur le sport (CRIS, EA 647), université Claude-Bernard–Lyon-1, campus de la Doua, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne cedex, France.
Adresse e-mail :
ahmadrifai@optl.org

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.
http://dx.doi.org/10.1016/j.kine.2012.04.004

Author's personal copy

une réelle expérience d'un geste donné. Par exemple dans le cas de la conduite automobile où l'expertise acquise depuis des années permet à quiconque de rentrer à la maison le soir sans vraiment réfléchir à la conduite.

L'IV est quant à elle usuellement entendue comme l'image mentale que chacun peut se faire d'un objet ou d'une action.

Elle peut au demeurant être suscitée par la perception visuelle effective de cet objet ou de cette action. Dans l'étude ici présentée, il s'agit de l'image mentale qu'un individu peut se former à la suite d'une présentation vidéo de cette action. Si l'on accepte de se reporter aux concepts de la psychologie cognitiviste, l'individu se fait une représentation mentale de l'action considérée après visualisation. Il sera, par la suite, capable de répéter cette action par IV, en l'absence de stimulus visuel préalable.
L'effet de la visualisation d'une action motrice sur l'activation des aires motrices cérébrales [8], comme celui de la prononciation ou de la lecture de mots signifiant une action [9] sur la réponse motrice correspondante, peut s'expliquer par l'activation de neurones miroirs, dont l'existence et la fonction ont été avérées chez les primates et sont fortement probables chez l'homme (pour une revue sur le sujet, voir [10]).
La présente étude intéresse de fait l'influence de la visualisation de vidéos d'un *squat vertical jump* (saut vertical) sur la performance réalisée dans le même saut par l'observateur après arrêt de la visualisation, et donc via l'IV. Cela, dans le cas de sujets n'ayant pas eu d'expérience préalable volontaire et systématisée de cette technique cognitive au regard de l'exécution d'un acte moteur. Les effets de la visualisation d'un saut sont comparés à ceux de la visualisation de deux sauts présentés simultanément à l'observateur.

MÉTHODE

Sujets

Vingt et un sujets mâles (âgés de 20,9 ± 2 ans, avec un poids de 76,0 ± 5,2 kg et une taille de 175,9 ± 2,4 cm), élèves de la faculté de santé publique de l'université libanaise, ont participé à l'étude. Ils ont été répartis en trois groupes de sept sujets :

- les sujets du groupe 1, considérés comme sujets de référence, n'ont pas bénéficié de la visualisation d'un saut ;
- les sujets du groupe 2 ont visualisé la vidéo d'un *squat vertical jump*, présentée sur un écran d'ordinateur ;
- les sujets du groupe 3 ont bénéficié de deux vidéos diffusées simultanément « en parallèle » à l'écran de l'ordinateur, chacune présentant la réalisation d'un *squat vertical jump* (même type de vidéo que pour le groupe 2), par un sauteur distinct.

Aucun de ces 21 sujets n'avait d'expérience dans la réalisation effective d'un tel saut et ne pratiquait aucune activité physique requérant la réalisation de sauts. Aucun d'eux, en outre, n'avait connu par le passé un quelconque entraînement systématisé en matière d'imagerie mentale. Ces sujets ont, par ailleurs, donné leur consentement écrit à participer à l'étude après avoir été informés du déroulement du protocole expérimental et sans que les attendus scientifiques correspondants aient été portés à leur connaissance.

Mesure de la performance du saut

Le saut ici considéré est le squat vertical jump, exécuté à partir d'une position initiale statique, jambes semi-fléchies (angle du genou à 90°), mains sur les hanches durant la totalité du saut.

Un léger contre-mouvement a cependant été toléré pour faciliter le mouvement, les sujets étant novices. La mesure de la hauteur de saut a été obtenue par un Myotest® Pro (Myotest France SAS, 84210 Pernes-les-Fontaines), un accéléromètre portatif qui mesure le temps d'envol.

Protocole expérimental

Le protocole expérimental a été approuvé par le comité d'éthique de l'université libanaise. Après un court échauffement d'environ cinq minutes, et en amont de la visualisation, trois sauts de contrôle ont été exécutés par chaque sujet, avec une vingtaine de secondes de repos entre deux sauts consécutifs.
Après avoir récupéré pendant une trentaine de secondes, les sujets du groupe 2 ont visualisé à quatre reprises la vidéo, présentée sur un écran de 17 pouces, d'un sujet réalisant un *squat vertical jump*, les visualisations étant entrecoupées de 30 secondes de pause. La durée de chaque visualisation était de 90 secondes. Les sujets du groupe 3 ont visualisé, comme le groupe 2 et selon la même procédure, deux vidéos diffusées simultanément sur le même écran, chacune présentant un saut réalisé par un sauteur qui lui est distinctif. Les sujets du groupe 1, qui est le groupe de référence, n'ont procédé à aucune visualisation.
Au terme de cette période de visualisation et après 45 secondes de repos, les sujets ont exécuté trois nouveaux sauts. Ce schéma a été répété 12 fois au rythme de deux entraînements par semaine, sur une période totale de six semaines.

Author's personal copy

Analyse statistique

Dans un premier un temps, une Anova à mesures répétées a été nécessaire pour déterminer l'effet des conditions, suivi d'un test post-hoc (Tukey) pour spécifier les relations inter-conditions.

RÉSULTATS

Les résultats, normalisés en pourcentage des sauts contrôles, montrent que la visualisation réitérée sur un écran vidéo d'un athlète exécutant un *squat vertical jump* (groupe 2) tend à une amélioration de la hauteur de saut *(Fig. 1)*, même si celle-là n'apparaît pas statistiquement significative. La visualisation simultanée de deux sauts sur un même écran (groupe 3) apparaît susciter quant à elle une amélioration accrue de la hauteur de saut, laquelle apparaît statistiquement significative ($p < 0{,}001$).

Au regard des valeurs brutes *(Tableau I)*, les hauteurs de saut des sujets de référence n'augmentent pas au cours des séances, ce qui signifie que la pratique des sauts en elle-même ne suscite pas d'effet d'entraînement.

En revanche, les hauteurs des sauts de contrôle des sujets des groupes 2 et 3 augmentent au cours de l'expérience *(Tableau I)*.

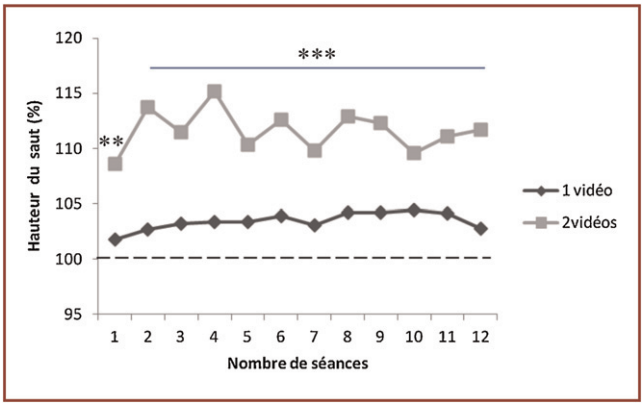


Figure 1. Évolution de la hauteur du saut vertical (*squat vertical jump*) au cours de 12 séances de visualisation. La visualisation de sauts verticaux par le biais d'une seule vidéo (tracé noir en losanges) ou de deux vidéos (tracé gris clair en carreaux) a été réalisée par les groupes expérimentaux 2 et 3 (sept sujets chacun). Les valeurs de la hauteur ont été normalisées par rapport aux sauts des mêmes sujets avant visualisation (section Méthodes) et ici représentées en 100 % pour chaque séance (ligne en petit traits). $^{**}p < 0{,}01$ et $^{***}p < 0{,}001$ par rapport au 100 %.

DISCUSSION

Des études électro-physiologiques ont montré la présence de neurones particuliers dans le cortex précentral du macaque, qui ont été dénommés neurones miroir (pour une revue, voir [11]). Ces neurones-là ont la caractéristique essentielle de reconnaître un mouvement exécuté par un tiers et, surtout, de comprendre sa finalité. Fait extrêmement rare, dans le cortex cérébral, ces neurones (localisés dans l'aire F5 du cortex prémoteur chez le macaque) ont la capacité de montrer, en même temps, des propriétés sensori-motrices. Plusieurs résultats expérimentaux, obtenus par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle [8], stimulation magnétique transcranienne [12], magnéto-encéphalographie [13] et tomographie par émission de positons [14] suggèrent la forte probabilité de l'existence des neurones miroir chez l'homme.

La localisation et la fonction visiomotrice de ces neurones dans le cortex frontal inféropostérieur, en proche voisinage avec le cortex moteur primaire (M1), renforce leur possible intervention dans l'exécution d'actes moteurs.

Dans ce contexte et sur la base de l'étude d'Aziz-Zadeh et al. [15] qui avaient utilisé la visualisation des mouvements de la bouche, de la main et du pied, par vidéo

Tableau I. Effet de la visualisation de sauts verticaux sur écran, sur l'exécution d'un *squat vertical jump*.

Groupe 1 (références)			Groupe 2 (une vidéo)		Groupe 3 (deux vidéos)	
Séance 1	**Séance 12**		**Séance 1**	**Séance 12**	**Séance 1**	**Séance 12**
Hauteur (cm)						
30,4 ± 1,4	30,9 ± 0,6	Avant visualisation	28,7 ± 1,8	30,9 ± 2,1	27,5 ± 2,3	30,3 ± 2,1
30,5 ± 0,8	31 ± 0,6	Après visualisation	29,2 ± 1,9	31,7 ± 2,2	29,8 ± 2,1**	33,9 ± 2,2***

Les résultats représentent les données brutes de la hauteur, exprimée en centimètre, lors de l'exécution des sauts verticaux (*squat vertical jumps*) chez les trois groupes de sujets. À noter que les sujets « références » n'ont pas visionné de sauts verticaux. $^{**}p < 0{,}01$ et $^{***}p < 0{,}001$ indiquent la différence des sauts avant et après la visualisation. La comparaison des sauts après la visualisation de deux vidéos par rapport à une seule vidéo, après 12 séances, révèle un $p < 0{,}04$.

Author's personal copy

pour étudier les activations des régions précentrales, il a paru intéressant d'examiner l'effet de la visualisation d'un mouvement complexe tel un *squat vertical jump* sur la hauteur d'un saut similaire exécuté subséquemment à la visualisation. L'idée que des stimuli perceptuels puissent susciter une amélioration de la motricité conduit par ailleurs à s'intéresser à l'impact de la quantité de stimuli par unité de temps, ce qui renvoie ici au nombre de sauts visualisés simultanément.

Les résultats obtenus indiquent que la visualisation d'un *squat vertical jump*, et l'imagerie visuelle qui en découle, opérée préalablement à la réalisation effective d'un saut de ce type, permet d'augmenter la hauteur du saut. Cette augmentation, une fois normalisée par rapport aux sauts contrôles, reste toutefois constante en fonction du temps (après deux séances d'entraînement par semaine et cela pendant six semaines). Mais, en valeurs brutes, les résultats montrent un effet d'entraînement significatif, notamment après visualisation de deux vidéos (*Tableau I*, groupe 3), alors que les sauts de référence (groupe 1 en absence de visualisation tout au cours des six semaines) restent remarquablement stables *(Tableau I)*. L'augmentation est aussi observée dans les sauts contrôles (avant visualisation) renforçant ainsi la possibilité d'un effet d'entraînement de la visualisation.

De plus, cet effet d'entraînement, observé dans les sauts contrôles et après stimulation visuelle, semble être spécifiquement liée au stimulus perceptuel car les sujets de référence ne modifient pas les paramètres du saut. L'augmentation des valeurs normalisées après visualisation de deux vidéos (Fig. 1) reste la même en fonction du nombre de séances. Cela peut indiquer la présence d'une éventuelle limitation du geste, un blocage qui ne semble pas pouvoir être dépassé. Elle peut être de nature biomécanique, peut être, un blocage mental semblant à exclure puisqu'en valeur brute, il y a un effet d'entraînement.

Cela semble au demeurant confirmé par l'amélioration du saut obtenue en augmentant le nombre des vidéos simultanément visualisées. La différence entre une et deux vidéos dans la hauteur du saut après 12 séances est toutefois significative (la hauteur du saut passe de 31,7 ± 2,2 à 33,9 ± 2,2 cm, $p < 0{,}04$) indiquant ainsi la capacité du mental à stimuler l'effort musculaire en augmentant le nombre de stimuli.

CONCLUSION

Les résultats indiquent que l'IV consécutive à la visualisation d'une action motrice peut participer à l'amélioration de la performance dans l'exécution effective de cette action, ce qui est en cohérence avec les études conduites par Rizzolatti et al. Ils signifient en outre que cet effet sur la performance est en prise avec la quantité de stimuli perceptuels par unité de temps. Ces résultats semblent ainsi de nature à inspirer de manière assez directe la pratique thérapeutique qui peut être facilitée par la simple observation d'actes moteurs.

Points à retenir

1. La visualisation d'un saut vertical permet l'amélioration d'un saut similaire chez un observateur.
2. Cette amélioration peut être efficace due à de l'entraînement car elle augmente après deux séances par semaine sur six semaines.
3. L'observation de deux sauts verticaux au même moment permet une amélioration plus importante.
4. L'effet de la visualisation d'un mouvement sur sa réalisation par un tiers laisse présager d'importantes applications thérapeutiques.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

RÉFÉRENCES

[1] Miller KJ, Schalkc G, Fetz EE, Nijsb MD, Ojemanne JG, Rao RPN. Cortical activity during motor execution, motor imagery, and imagery-based online feedback. PNAS 2010;107:4430–5.

[2] Heremans E, Feys P, Nieuwboer A, Vercruysse S, Vandenberghe W, Sharma N, et al. Motor imagery ability in patients with early- and mid-stage Parkinson disease. Neurorehabil Neural Repair 2011;25:168–77.

[3] Sackett RS. The relationship between amount of symbolic rehearsal and retention in maze habit. J Gen Psychol 1935; 13:113–28.

[4] Perry HM. The relative efficiency of actual and imaginary practice in 5 selected tasks. Arch Psychol 1939;4:5–75.

[5] Jeannerod M. Mental imagery in the motor context. Neuropsychologia 1995;33:1419–32.

[6] Roth M, Decety J, Raybaudi M, Massarelli R, Delon-Martin C, Segebarth C, et al. Possible involvement of Primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. Neuroreport 1996;7:1280–4.

[7] Gerardin E, Sirigu A, Lehéricy S, Poline JB, Gaymard B, Marsault C, et al. Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. Cereb Cortex 2000;10:1093–10104.

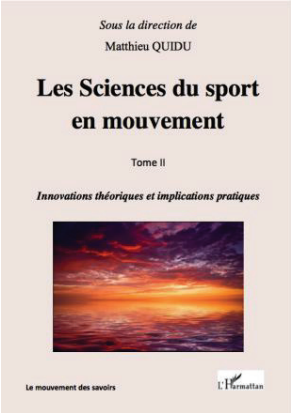
[8] Buccino G, Binkofski F, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, et al. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. Eur J Neurosci 2001; 13:400–4.

Author's personal copy

[9] Sato M, Mengarelli M, Riggio L, Gallese V, Buccino G. Task related modulation of the motor system during language processing. Brain Lang 2008;105:83–90.
[10] Rizzolatti G, Sinigaglia C. Les neurones miroirs. Paris: Odile Jacob; 2011.
[11] Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. Annu Rev Neurosci 2004;27:169–92.
[12] Fadiga L, Fogassi L, Pavesi G, Rizzolatti G. Motor facilitation during observation: a magnetic stimulation study. J Neurophysiol 1995;73:2608–11.
[13] Nishitani N, Hari R. Viewing lip forms: cortical dynamics. Neuron 2002;36:1211–20.
[14] Rizzolatti G, Fadiga L, Matelli M, Bettinardi V, Paulesu E, Perani D, et al. Localization of grasp representations in humans by PET: 1. Observation versus execution. Exp Brain Res 1996;111: 246–52.
[15] Aziz-Zadeh L, Wilson SM, Rizzolatti G, Iacoboni M. Congruent embodied representationsfor visually presented actions and linguistic phrases describing actions. Current Biol 2006;16: 1818–23.

PUBLICATION 7

P. Fargier, E. Fargier, **T. Rabahi** & R. Massarelli. *Pluralité des courants de recherche scientifique relatifs aux apprentissages moteurs et au transfert : implication en EPS*, In : *Les sciences du sport en mouvement*, Ed. M. Quidu. Paris : L'Harmattan. *A paraître en 2014.*



Fargier, P., Fargier, E., **Rabahi, T.**, Massarelli, R. (2013). Pluralité des courants de recherche scientifique relatifs au contrôle ou aux apprentissages moteurs : implications en EPS. In : Quidu, M. (Ed.), Les Sciences du sport en mouvement, Tome II, Innovations théoriques et implications pratiques. Paris : L'Harmattan.

Pluralité des courants de recherche scientifique relatifs au contrôle ou aux apprentissages moteurs : implications en EPS.

Patrick FARGIER[(*)], Emile FARGIER, Tahar RABAHI[(*)], Raphaël MASSARELLI[(*)]
[(*)]Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport (CRIS – EA 647), Université Lyon 1.

1. Science(s) et EPS, un diptyque problématique

L'Éducation Physique et Sportive (EPS), comme toute discipline d'enseignement, est appelée à concourir à une éducation scolaire, visant à accompagner chaque élève sur le chemin qui le conduit de l'enfance à l'âge adulte, de l'École vers la société (Develay, 1992)[1]. L'École est de fait, selon Develay (2006, p. 8), « *l'institution* […] *que les hommes ont créée pour se perpétuer (et se mettre en questions), grâce aux enseignements-apprentissages qu'ils y développent.* » Symboliquement, les contenus scolaires renvoient ainsi à l'héritage qu'une génération souhaite léguer aux suivantes, afin que celles-là le fassent fructifier (Develay, 1992 ; 2000). Aussi peut-on considérer que l'acquisition effective de ces contenus constitue un but éducatif fondamental. Quand l'École ambitionne de faire advenir de l'humanité en l'élève, un pan entier de la Science vise à constituer un corps de savoir sur l'humain, voire l'humain apprenant (Develay, 2006 ; Rey, 1999). Aussi paraît-il aller de soi que la mission de l'enseignant ne puisse s'accomplir au mieux qu'à la lumière de la Science. La littérature scientifique sur l'apprentissage devrait en tout état de cause idéalement pouvoir concourir à une clarification des stratégies autorisant cet accomplissement. Et l'on pourrait attendre tout autant, dans le cas de l'EPS, des travaux quant au contrôle ou aux apprentissages moteurs.

Des efforts répétés visent en cohérence à favoriser cette relation entre recherche scientifique et enseignement : c'est par exemple le cas de l'ouvrage de Tardif (1997), intéressant l'enseignement au regard de la psychologie cognitive, ou de celui, spécifique du domaine moteur, de Schmidt (1993)[2]… L'essai apparaît toutefois bien délicat à transformer. Rey (1999, p. 134), soulignant l'intérêt, pour le pédagogue, de la recherche en psychologie, observe de fait un « *écart entre les connaissances psychologiques que l'on a aujourd'hui et la pratique pédagogique* ». Ce point de vue qui émane d'un auteur

[1] Develay (1992, p. 95) souligne qu'« *Eduquer, c'est au premier sens ex-ducere, conduire hors d'un lieu donné* […] *c'est, par extension, mettre au monde, élever au sens de faire grandir… en taille et en humanité.* »

[2] Cette volonté synergique a du reste suscité plusieurs écrits dans deux numéros des Dossiers EP.S quant aux relations « *chercheurs / praticiens* » opérés sous la houlette du Comité d'Études et d'Informations Pédagogiques de l'Éducation Physique et du Sport (1996 ; 1997)…

relevant des Sciences de l'Éducation, francophones, entre au demeurant en résonance avec celui de spécialistes anglo-saxons en psychologie tels que Bransford et al. (2006)[3]. S'il en va d'une règle, l'EPS paraît ne point y faire exception : dans le cas d'écrits professionnels sur l'apprentissage d'une motricité athlétique ou aquatique en EPS, Fargier et Terret (1999) font ainsi état d'une impossibilité à produire un classement par boîtes[4] fonction de référents scientifiques classiques quant à l'apprentissage moteur. Si la littérature professionnelle atteste toutefois d'emprunts en la matière, plusieurs chercheurs en STAPS ont signalé, à l'instar de Laurent et Temprado (1996), que nombre des concepts dominants dans la sphère de l'EPS procèdent de théorisations devenues controversées dans le champ scientifique. Encore Ripoll (1996 ; 1997), élargissant la réflexion au cas des neurosciences, défend-il que de tels emprunts s'opèrent le plus souvent à un niveau métaphorique et superficiel, pour rationaliser *a posteriori* une conception tenant à un vécu d'enseignant…

De telles constatations peuvent tenir pour partie à une carence dans les relais nécessaires à une diffusion des savoirs scientifiques (e.g. dans le cas de l'EPS, Laurent et Temprado, 1996 ; Ripoll, 1996). Une entreprise transpositive est par ailleurs sans doute compliquée en ce que la recherche scientifique relative à l'apprentissage s'enracine dans un débat originel non définitivement clos et singulièrement ravivé de nos jours (Fargier, 2006). Develay (1992) signale ainsi l'existence de deux voies explicatives de l'apprentissage dans la philosophie de la Grèce du siècle de Périclès, distinguant les traditions empiristes et réalistes, qui correspondent aux filiations d'Aristote au béhaviorisme et de Platon à la Gestalt[5]. Cette opposition n'a sans doute pu être dépassée définitivement, ce qui a ainsi conduit Perrenoud (2002, p. 48) à observer que « *les modèles de l'esprit et de l'apprentissage humains sont encore bien fragiles* ». Analyses cohérentes avec celles de chercheurs dans le champ de la motricité, à l'instar de Ripoll (2004)[6]. La recherche en prise avec les Sciences et Technologies de la Cognition (STC, au sens de Varela, 1989) se trouve de fait animée en l'état d'un différend de fond : le cognitivisme qui était devenu l'orthodoxie de la communauté se voit, sinon mis à mal, questionné et challengé notamment par le connexionnisme et

[3] Bransford et al. (2006, p. 210) notent ainsi qu'aucun des champs de recherche relatif à l'apprentissage implicite, informel ou bien formel n'a pu susciter d'implication prometteuse dans le champ éducatif : « *Reserachers in each of these areas have attempted to apply their thinking and findings directly to education, and often the links between theory and "well-grounded practice" have been tenuous at best.* » Ce, même si cela n'hypothèque pas à leurs yeux de possibles évolutions vers une synergie entre théories de l'apprentissage et pratiques éducatives.

[4] En analyse de contenu, on distingue en matière de catégorisation, selon Bardin (1998, p. 152), une « *procédure par "boîtes"* », en laquelle les catégories sont données *a priori*, d'une « *procédure par "tas"* », opérée par analogie(s) en l'absence d'un tel système de classification.

[5] Develay (1992, p. 102-106) précise qu'aux yeux des tenants de la première, « *la connaissance nous vient du monde extérieur par l'inter-médiaire des sens* » : l'expérience est ici première ; il en va d'une « *théorie de l'exogène* », d'une « *pédagogie de l'objet* » et d'un « *maître organisateur* ». Pour les promoteurs de la seconde, en revanche, « *la connaissance nous vient d'idées et de principes innés qui constituent la structure même de l'esprit* » et que l'expérience ne fait qu'éveiller : le sujet est ici « *le premier déterminant de son apprentissage* » ; il est question d'une « *théorie de l'endogène* », d'une « *pédagogie du sujet* » et d'un « *maître accoucheur* ».

[6] Ripoll (2004, p. 15) observe que les modèle actuels du contrôle ou des apprentissages moteurs fluctuent entre deux approches, héritées des philosophes anciens et « *souvent posées en opposition* » : l'approche empiriste, tenant au présupposé que « *les processus mentaux reflètent les impressions sensorielles externes* » et l'approche rationaliste postulant que « *l'esprit présente un pouvoir de raisonnement qu'il impose dans le domaine de l'expérience sensorielle.* »

le dynamicisme (e.g. Eliasmith, 1996 ; Varela, 1989). L'enseignant est ainsi en présence d'une pluralité de courants de pensée réfractant une controverse dont l'issue est incertaine, ce qui n'aide sans doute guère à une transposition…

La pertinence, comme l'opérationnalité, de l'entreprise est cependant en elle-même questionnée. Dans le cas des apprentissages scolaires, Develay (1992, p. 111) invite ainsi à « *douter du pouvoir explicatif et prédictif d'une théorie, quelle qu'elle soit, tant elle apparaîtra toujours réductrice de la complexité du réel* ». Point de vue cohérent avec celui émis par nombre d'auteurs, pour ce qui est des apprentissages moteurs en EPS (e.g. Delignières et Nourrit, 1997 ; Laurent et Temprado, 1996 ; Ripoll, Ramantsoa, Pavis, 1995). La diffusion d'un modèle émanant de la recherche scientifique est en tout état de cause susceptible de se heurter à une réceptivité toute relative et sélective de la sphère scolaire, *a fortiori* dans le cas de l'EPS. Les contenus et méthodes d'une discipline scolaire tiennent au premier chef à un choix de valeurs, en prise avec des buts éducatifs (Develay, 1992 ; 2006). La recevabilité d'un référent scientifique est ainsi conditionnée, en EPS et à tout le moins en France (Ripoll, 1996)[7], par une conception de l'homme à former. Plus radicalement, d'aucuns défendent que de tels référents ont jusqu'ici principalement valu au plan discursif et à hauteur de ce qu'ils autorisent à fonder l'EPS comme une discipline conforme aux canons de l'École, celle-ci étant, plus que d'autres, en situation de devoir y justifier ou y préserver sa place (e.g. Delignières et Garsault, 2001 ; Laurent et Temprado, 1996).

Il en va en tout état de cause, d'une manière plus générale, de la fameuse question des rapports « théorie / pratique » dont Léziart (1996) a montré le caractère sempiternellement problématique, dans le cas de l'EPS. Celui-ci (1996, p. 51) étaye l'idée selon laquelle cette discipline « *se confronte, depuis son origine* […], *à la maîtrise d'un rapport équilibré* […] *entre les connaissances scientifiques indispensables* à *son développement et les connaissances pratiques qui lui assurent* sa *reconnaissance sociale et* sa *spécificité.* » Confrontation historiquement opérée sur fond d'une opposition récurrente entre deux types de points de vue, les uns, formalistes, envisageant l'EPS comme objet ou domaine d'application scientifique, les autres, réalistes, visant à une théorisation des pratiques qui emprunte à une diversité d'éclairages scientifiques[8]. Ce qui correspond à une difficulté d'intégration harmonieuse des éclairages

[7] Selon Ripoll (1996, p. 58), l'impact d'un savoir scientifique sur l'enseignement de l'EPS tient d'abord à une congruence « *avec les conceptions humanistes des praticiens, c'est-à-dire leur conception de l'épanouissement de l'être humain en relation avec les valeurs éthiques et le système de production.* » Il en va, aux yeux de Ripoll (1996, p. 58-59), de « *cheminements théorico-pratiques* […] *typiquement français* » que l'on ne retrouve notamment pas « *dans les modèles anglo-saxons* […] *moins systémiques et plus déterminés par des connaissances scientifiques ponctuelles concernant des mécanismes isolés* ».

[8] Léziart (1996, p. 52) se reporte ici à Durkheim (1966) pour distinguer une option formaliste et une option réaliste. Celui-ci (1996, p. 62) précise que les « formalistes » valorisent une démarche déductive, lesquels « *cherchent à constituer un cadre théorique qui doit aboutir à la déduction d'hypothèses à partir d'une théorie* », censées orienter une pratique d'intervention, quand les « réalistes » privilégient une démarche inductive, en prise avec un « *cadre conceptuel qui autorise à poser des questions* » auxquelles il s'agit d'apporter des hypothèses de réponse par induction.

scientifiques au plan de théorisations de l'EPS évolutives et forgées au fil d'un processus d'inclusion scolaire. Difficulté dont le dépassement suscite la spécification d'un positionnement quant aux apports de la recherche scientifique entre les deux pôles extrêmes, et peut-être virtuels, de l'applicationnisme et du rejet de principe (Fargier, 2006).

Aussi est-on appelé ici à concourir à cette clarification. De fait, la réflexion aux apprentissages en EPS, quand bien même on se centrerait sur les seules acquisitions en APSA, apparaît tout à la fois en prise avec la recherche développée dans le champ des STC ou dans des domaines connexes, avec celle qui a cours en matière de didactique(s)[9] ainsi qu'avec un ensemble de pratiques théorisées[10] (Fargier, 2006). Et les travaux en didactique(s), s'ils empruntent certes à la recherche relevant des STC, ont leurs propres canons et sont animés de débats spécifiques, quand les pratiques théorisées vont parfois sans relation limpide avec une quelconque théorie scientifique, visant parfois à pallier un vide à ce niveau. En regard de ce panorama, un essai de contribution sous l'angle des produits de la recherche en prise avec les STC, intéressant le contrôle ou les apprentissages moteurs, apparaît légitime. Il est dès lors logique de s'enquérir de leur suggestivité au regard de l'intervention en APSA, pour réfléchir à une perspective transpositive en la matière ainsi qu'à sa portée en EPS, au regard du projet ultime de construction de l'humain à laquelle cette discipline doit participer.

2. Recherche sur le contrôle et/ou les apprentissages moteurs et suggestivité quant aux APSA

Le contrôle moteur intéresse « *la manière dont sont produits les mouvements nécessaires à la résolution d'un problème moteur actuel* » quand l'apprentissage moteur renvoie à « *une problématique d'acquisition* » (Delignières et Duret, 1995, p. 72). Et il peut sembler logique qu'une bonne connaissance des processus qui sous-tendent la production d'un mouvement aide à en envisager l'apprentissage, même s'il en va de deux domaines ayant chacun leurs singularités (e.g. Adams, 1987 ; 1992 ; La Rue, 2004)[11]. Selon Adams (1992) c'est, en tout état de cause, avec les années 1970 que sont apparues les premières théories en prise avec l'apprentissage issues de l'étude du comportement moteur. Et l'on

[9] Delignières et Duret (1995, p. 71) notent ainsi, dans le cas de l'EPS, que la primauté des théories intéressant le contrôle ou les apprentissages moteurs émanant de la sphère des STC tend « *à être relativisée par la constitution d'un discours didactique spécifique* ». A la différence de la recherche qui a cours dans le strict champ des STC, la recherche en matière de didactique(s), quand bien même elle présente un panorama relativement foisonnant, s'intéresse prioritairement à l'apprentissage au regard de ce qui fonde la spécificité d'un domaine d'enseignement ou de formation donné.

[10] Develay (1992, p. 111) indique : « […] *apparaissent dans le champ scolaire des pratiques théorisées qui deviennent très vite des écoles, avec parfois des mouvements d'exclusion vis-à-vis de domaines voisins. En vingt ans, on a ainsi pu parler de pédagogie du projet, de pédagogie du contrat,* […]*, de l'éducation cognitive, de l'évaluation formatrice* […]. *On ne perçoit du reste pas toujours les relations entre ces écoles, ce qu'elles proposent comme pratiques d'action et leurs rapports avec les théories* [de l'apprentissage]. »

[11] Ainsi, si Adams (1992) s'attache à montrer que la recherche sur le contrôle moteur s'est historiquement peu intéressée à l'apprentissage, La Rue (2004, p. 29) défend qu'« *il est difficile de dissocier l'apprentissage du contrôle moteur puisqu'on ne peut apprendre un geste sans en affiner le contrôle* ».

dispose depuis d'un ensemble de formalisations spécifiques des apprentissages moteurs, comme le montrent divers essais de synthèse (e.g. Temprado et Laurent, 1995 ; La Rue, 2004). Cette spécificité n'est cependant pas garante en elle-même d'un intérêt accru quant à l'intervention en APSA. Il existe de fait un mouvement de défiance quant aux travaux correspondants, notamment signalé par Delignières (2004), tenant à l'idée que ceux-ci ne peuvent rendre compte de la manière dont un élève apprend en cours d'EPS. Il en irait notamment de ce que l'essentiel de ces travaux s'opère en laboratoire et/ou selon des canons suscitant des apports en décalage avec les besoins professionnels des intervenants en APSA. Les apports de la recherche manqueraient-ils dès lors ici de suggestivité ?

Si la recherche scientifique quant à l'apprentissage s'ancre en un débat non encore tranché, tout débat connaît des phases de stabilisation. Les STC se sont mises en place avec le cognitivisme (Varela, 1989) et la recherche spécifique du contrôle ou des apprentissages moteurs s'est initialisée alors que prévalait ce paradigme (au sens de Kuhn, 1983). Il en a ainsi résulté deux théories de l'apprentissage moteur bien connues dans le champ des STAPS, émanant respectivement d'Adams (1971) et de Schmidt (1975) : si l'on peut, notamment avec Sherwood et Lee (2003), voir en celles-ci quelque rémanence béhavioriste, plusieurs (e.g. Adams, 1992) soulignent qu'elles ont fait l'objet d'une influence prégnante de la psychologie cognitiviste. Des auteurs tels que Varela (1989), Eliasmith (1996) ou encore Quéré (1997) concourent à signifier que le cognitivisme tient aux présupposés néo-cartésiens du mentalisme, du représentationnalisme et du symbolicisme : l'esprit, étant isolé de l'environnement, aurait dès lors à restaurer la richesse des informations émanant du milieu, à produire une représentation pertinente de celui-là, via un système de codage idoine, pour pouvoir décider d'une action, ainsi que la prescrire à des effecteurs et en piloter la réalisation efficace. Il est ainsi postulé qu'entre un stimulus et la réponse associée s'intercale un organisme, lequel intègre un ensemble d'instances supportant les opérations correspondantes. Cette schématisation semble d'emblée esquisser une piste quant à l'apprentissage : si une réponse effective est fonction d'une représentation, il paraît cohérent de chercher à structurer au mieux celle-là, pour pouvoir élaborer celle-ci… Cela invite à s'enquérir de la suggestivité des théories d'inspiration cognitiviste spécifiques du contrôle ou des apprentissages moteurs.

Au regard de ce questionnement, la théorie du schéma (Schmidt, 1975) constitue un cas de figure assez emblématique. Celle-ci a connu un réel écho dans la sphère scientifique[12] et a été bien diffusé en langue française, notamment via la traduction de l'ouvrage de Schmidt (1991), à l'intitulé évocateur de

[12] Un écrit du Current Contents (1983) signale ainsi l'accès au rang de *Citation Classic* de l'article de Schmidt (1975), sorti dans *Psychological Review*, l'une des revues phares quant à la recherche en psychologie : « *The Science Citation Index® (SCI®) and the Social Sciences Citation Index® (SSCI®) indicate that this paper has been cited in over 155 publications since 1975)* ». Cette théorie a encore et notamment suscité quelque trente années plus tard plusieurs articles dans la revue Research Quarterly for Exercise and Sport (e.g. Newell, 2003 ; Schmidt, 2003 ; Sherwood et Lee, 2003).

« *Motor Learning and performance, from principles to practice* »[13]. Or, selon Delignières et Garsault (2001), cette théorie n'a guère eu d'impact sur les pratiques qui ont cours en EPS. On ne saurait en quelques lignes opérer une présentation détaillé de la théorie de Schmidt. Mais on peut en pointer les idées-clés, à partir de diverses synthèse (e.g. Adams, 1992 ; Delignières et Nourrit, 1997 ; Fargier, 2006 ; Temprado, 1995). Le mouvement est ici censé procéder de programmes moteurs généralisés (un PMG pouvant s'assimiler à un canevas d'action valant pour une classe de mouvement). La sélection d'un PMG et son paramétrage sont opérés via un schéma de rappel. La régulation du mouvement (en cours de réalisation ou *a posteriori*) renvoie notamment à un schéma de reconnaissance qui permet de comparer les feedback intrinsèques au mouvement (FBI) à une référence[14]. C'est précisément assez directement en appui sur ces concepts que Schmidt (1993) propose une démarche d'acquisition.

Du propos de celui-ci se dégage une trame quant à l'intervention en APSA (Fargier, 2006). Schmidt (1993) définit trois objets d'apprentissage : 1. PMG, 2. sélection et paramétrage d'un PMG, 3. détection et correction des erreurs. Ce, pour déboucher sur des modalités de travail voulues cohérentes avec les attributs de ces objets. Comme plusieurs l'ont noté (e.g. Adams, 1992 ; Sherwood et Lee, 2003), la théorie du schéma autorise peu de supputations quant à la manière dont s'acquiert un PMG : Schmidt (1993) se replie ici sur le précepte classique de la répétition, suggérant que l'efficacité de celle-là est accrue, en début d'acquisition, par une pratique constante en bloc[15]. En outre, le recours pertinent à un PMG et son paramétrage fonction d'un contexte d'exécution appellent respectivement au premier chef, selon Schmidt (1993), une pratique aléatoire et une pratique variable[16]. Schmidt (1993) considère par ailleurs que la possibilité de réguler un mouvement via les FBI tient à l'accès progressif à une capacité de se passer des feedback extrinsèques (FBE), notamment apportés par un tiers. La teneur des FBE tient ici à l'objet d'acquisition : centration sur la structure du mouvement lors d'un travail du PMG, ciblage des effets de l'action lors d'un travail du paramétrage… Afin de permettre une régulation du mouvement grâce aux seuls FBI, Schmidt (1993) propose une stratégie de diminution de la fréquence relative

[13] Ce, depuis 1993, dans la collection « Sport + Enseignement » de l'éditeur Vigot, ciblant un lectorat intéressé par l'intervention en APSA.

[14] L'accueil scientifique qu'a connu la théorie du schéma tient de fait en partie, comme le note Schmidt (1980, p. 122) à ce qu'elle a autorisé à concilier deux conceptions opposées du contrôle moteur (« *the centralists* » vs « *the peripheralists* »).

[15] Selon Schmidt (1993, p. 318), une pratique constante consiste en une « *séquence de pratique dans laquelle une variation unique d'une classe donnée de la tâche est travaillée* » : il s'agit ainsi, au badminton, de répéter un type de coup, par exemple un coup de dégagement en coup droit au-dessus de l'épaule, en réitérant une frappe donnée (trajectoire, vitesse, cible…). Schmidt (1993, p. 319) précise de surcroît qu'une pratique en bloc consiste en la répétition d'un geste déterminé et de lui seul « *sur de nombreux essais successifs* ».

[16] Selon Schmidt (1993, p. 318), une pratique aléatoire vise à la répétition de plusieurs classes de mouvement, « *en ordre aléatoire lors des essais successifs* » : au badminton, il peut ainsi s'agir d'enchaîner des coups de dégagement en coup droit au-dessus de l'épaule ou bien en revers en-dessous de l'épaule, sans que l'enchaînement des coups à produire ne soit connu *a priori*… Schmidt (1993, p. 319) ajoute qu'une pratique variable correspond à la répétition d'une classe donnée de mouvement selon « *de nombreuses variations* » du paramétrage : au badminton, il peut ainsi s'agir d'enchaîner des revers en-dessous de l'épaule en visant alternativement les quatre coins du terrain adverse…

d'apport des FBE[17] et/ou de sollicitation, avant l'apport de tout FBE, d'un jugement du sujet sur la qualité du geste qu'il vient de produire.

La théorie du schéma débouche ainsi, plus que sur des évocations pratiques, sur une démarche d'enseignement. Il n'y a en rien là un cas de figure isolé. D'autres abords se montrent suggestifs. Il en est ainsi du courant des bases de connaissances, dont Laurent et Temprado (1996) ou Temprado et Laurent (1995) offrent un aperçu, montrant ainsi qu'est suggérée une démarche visant : 1. à augmenter et structurer des connaissances en mémoire quant à un problème, 2. à procéduraliser des connaissances déclaratives, 3. à élaborer les règles conditionnelles de recours aux procédures, et, 4. à automatiser le recours aux conditions de production. On peut encore et notamment évoquer le travail impulsé sous la houlette de Famose, qui a suscité une logique d'acquisition fonction d'un dosage de la difficulté selon les dimensions informationnelles de la tâche[18]. Des outils d'analyse sont proposés pour aider à mettre en place une pratique progressive (e.g. Famose, 1983 ; Famose, 1990). La suggestion est également faite d'une décomposition et recomposition de la tâche (Famose, 1990) et donc, d'une pratique partielle progressive. Plusieurs modèles d'inspiration cognitiviste ont ainsi des implications explicites quant à l'intervention en APSA, ce relatif foisonnement étant toutefois de nature à laisser perplexe le praticien qui en prendrait connaissance[19].

Encore ce panorama s'est-il trouvé compliqué par un débat de fond animant les STC dans leur ensemble autour, selon Varela (1989, p. 55), de « *deux failles bien connues du cognitivisme* »[20], qui peuvent s'envisager au regard de Kuhn (1983) en termes d'anomalies susceptibles de susciter une crise. Ce qui a, en tout état de cause, favorisé une mise en question touchant jusqu'aux présupposés du cognitivisme, via la montée en puissance de courants concurrents. Avec le connexionnisme, note Varela (1989, p. 76) « *exeunt les symboles* » : si l'idée de représentation perdure, c'est ici en termes d'états globaux tenant à l'interconnexion des éléments d'un système. On pourrait ajouter qu'au regard du dynamicisme, *exeunt* les présupposés mentaliste et représentationnaliste. Selon Eliasmith (1996), pour

[17] Selon Schmidt (1993, p. 316-317) une logique de feedback atténué correspond à une réduction de la fréquence relative d'apport, celle-là étant « *élevée au début, pour diminuer ensuite* ». Ce qui peut susciter en outre des stratégies particulières, par exemple, un apport de feedback en résumé en lequel on opère un point sur une série de répétitions d'un geste « *une fois que l'ensemble a été exécuté* ». Une autre possibilité correspond à un apport de feedback moyens, dégageant une tendance suite à plusieurs essais. Un feedback hors limites n'intervient quant à lui que s'il y a erreur « *en dehors d'une certaine marge d'exactitude* ».

[18] Famose (1990, p. 124) souligne ainsi que les descripteurs de la tâche ici retenus renvoient à « *la plupart des types d'incertitude qui* […] *ont été manipulés dans différentes expériences inspirées par la théorie du traitement de l'information* ».

[19] Cet ensemble de propositions réfracte au demeurant des oppositions de vue. Selon Famose (1988, 1990), l'apprentissage est un processus vertical tenant à des suites de restructurations qualitatives, vers un geste de plus en plus efficace et efficient. Famose (1988, p. 84) note qu'il se distancie ainsi des conceptions envisageant l'apprentissage comme un processus horizontal, continu et quantitatif, soulignant qu'aux yeux de Schmidt (1975, 1988), l'apprentissage est un processus horizontal « *dans lequel* […] *la force d'une règle* […] *augmente de manière continue* ».

[20] Varela (1989, p. 55) précise que le premier écueil tient à ce que « *le traitement symbolique de l'information est fondé sur des règles appliquées séquentiellement* » ; ce qui renvoie à une difficulté récurrente à rendre compte, via les modèles cognitivistes, de l'accomplissement de tâches requérant un grand nombre d'opérations séquentielles. Le second écueil est lié à ce que « *le traitement symbolique soit localisé* », ce qui suggère un système, éventuellement contre-nature, peu à même de résister ou de s'adapter à une détérioration.

les dynamicistes, le système nerveux, le corps et l'environnement sont des systèmes dynamiques étroitement couplés, la formalisation de leurs couplages étant plus adéquate pour rendre compte de la cognition que toute acception du terme de représentation[21]. Une telle disputation n'a pas manqué d'avoir son pendant au regard du contrôle ou des apprentissages moteurs.

Cela a favorisé, en ce champ, l'essor d'approches dont les tenants postulent un couplage entre perception et action, avec une influence originelle de Gibson (1950 ; 1966 ; 1979) ou Bernstein (1967 ; 1996). Les travaux correspondants relèvent de deux grandes catégories, selon la focale privilégiée quant au diptyque « perception-action ». L'approche, parfois qualifiée d'écologique, la plus directement issue de la pensée gibsonienne se centre sur les principes de la perception au regard du cycle unissant celle-là à l'action (Laurent et Temprado, 1996). Approche se prêtant bien à l'analyse ici développée. Son impact dans le champ scientifique comme dans la sphère technique est patent[22]. Elle a fait l'objet de plusieurs présentations synthétiques en français (e.g. Temprado et Montagne, 2001 ; Montagne et Laurent, 2004 ; Fargier, 2006), voire suscité des productions dans des revues professionnelles telles que la Revue EP.S (e.g. Cornus et Marsault, 2003). Et ses promoteurs mêmes reconnaissent que l'apprentissage demeure pour eux quasiment *terra incognita* (e.g. Montagne et Laurent, 2004). Pour ceux-ci, et à la différence des tenants du représentationnalisme, l'information vaut à l'interface de l'acteur et de son environnement : la perception est censée émerger de l'interaction de celui-ci avec celui-là pour donner directement accès à l'information utile à la décision ou au contrôle de l'action (e.g. Temprado et Montagne, 2001). Aussi peut-on considérer avec Warren (1988) qu'il y a là deux thèmes majeurs quant à cette approche. Sans entrer dans le détail des courants de pensée constitutifs[23], on peut offrir un aperçu des idées-clés.

Le choix d'un mode d'action est ici censé s'opérer par affordance[24]. Il s'agit d'une capacité du sujet à saisir, compte tenu d'un but, une congruence entre ses propriétés intrinsèques et celles du milieu. Un sujet ayant à franchir le pas d'une porte est ainsi à même de déterminer par affordance s'il

---

[21] Selon Eliasmith (1996, p. 445-446), « *Dynamicist systems also have a special relation with their environment in that they are not easily distinguishable from their surroundings: "In this vision, the cognitive system is not just the encapsulated brain; rather, since the nervous system, body, and environment are all constantly changing and simultaneously influencing each other, the true cognitive system is a single unified system embracing all three" (van Gelder, 1995, p. 373)* ». Et Eliasmith (1996, p. 452) souligne qu'« *An important distinction between dynamicism and either symbolicism or connectionnism is the dynamicists' unique view of representation: to be a truly dynamicist model, there should be* no representation […] *dynamicists decry the use of representation in cognitive models.* »

[22] Au regard de l'impact de cette approche dans le champ scientifique, il suffit de consulter les écrits de ses promoteurs majeurs, tels Lee (e.g. Craig, Delay, Grealy, Lee, 2000) ou Warren (e.g. Warren, Kay, Duchon, Zosh, Zahuc, 2001)… Certains concepts suscitent en outre en l'état des applications techniques, notamment dans le cas de la production d'images virtuelles (e.g. Geuss, Stefanucci, Creem-Regher, Thomson, 2010).

[23] Selon Montagne et M. Laurent (2004), à partir de Michaels et Beek (1995), il est question de deux courants : celui de la perception directe, en laquelle « *l'accent est mis sur les processus perceptifs sans que les modalités de prise en compte de l'information en vue du contrôle du mouvement soient nécessairement envisagées* » et celui de la théorie cinétique, centré « *sur les relations de causalité circulaire entre perception et action à travers la formalisation de lois de contrôle liant le flux perceptif aux forces exercées.* »

[24] Selon Reed (1988), le terme d'affordance est un néologisme émanant de Gibson (1966). Il est plus précisément question ici d'affordances physiques (e.g. La Rue, 2004), le concept d'affordance ayant connu un devenir protéiforme avec la spécification d'affordances sensorielles, physiques, cognitives, spatiales ou fonctionnelles (e.g. Hartson, 2003). Du point de vue gibsonien, il s'agit des propriétés (physiques) des objets du milieu avec lesquelles peuvent être mises en rapport les possibilités d'action d'un sujet, compte tenu d'un but.

doit passer de face ou de profil, en fonction de la taille de l'ouverture et de sa largeur d'épaules. Idée dont Warren (1984) a concouru à montrer la pertinence dans le cas de la locomotion dans un escalier. Le contrôle de l'action impulsée renvoie quant à lui en premier lieu au flux optique[25]. Ce que le sujet perçoit d'un objet en son environnement est censé tenir à leurs positions respectives, donc à une configuration optique. Le flux optique, résultant d'un changement de configuration optique lié à un déplacement, recèle des types de transformations, d'invariants[26], exploitables potentiellement pour contrôler l'action. C'est notamment le cas de l'invariant Tau (τ), tel qu'il a été initialement formalisé par Lee (1976). Scott (2002) rappelle ainsi que selon celui-ci, le temps précédant le contact avec un objet dont le déplacement relatif à l'œil s'opère en translation et à vitesse constante peut être spécifié par l'inverse du taux d'expansion d'un binôme de points de la surface de l'objet[27]. Si la photométrie permet de formaliser un invariant, elle ne peut préjuger de ce que l'humain est sensible à celui-là ou l'utilise pour contrôler une action. Des travaux expérimentaux ont attesté de cette sensibilité et de cette utilisation dans le cas de τ (e.g. Babler et Dannemiller, 1993 ; Savelsbergh, Whiting, Bootsma, 1991) : dans certaines conditions, τ « *spécifie le temps de pré-contact de premier ordre* […] *qui sépare le sujet de la surface si la vitesse relative entre l'individu et la surface reste constante* » (Temprado et Montagne, 2001, p. 24-25). Et plusieurs ont signalé (e.g. Laurent, 1985) un travail de Lee, Lishman et Thomson (1982) suggérant qu'un sauteur en longueur régule ses foulées au gré de sa course via un tel invariant[28].

La question se pose en tout état de cause de l'apprentissage des modes de choix et de contrôle de l'action ainsi décrits. Les travaux quant à cette thématique apparaissent relativement rares. Pour autant, Gibson (e.g. 1966) a invité à envisager l'apprentissage au regard d'une éducation de l'attention. Il s'agit

[25] Dans un milieu donné, une source de lumière produit une lumière rayonnante que reçoivent divers objets émettant en retour une lumière ambiante. L'œil qui observe un objet de ce type reçoit de la lumière transmise pour partie directement et provenant pour partie des divers objets du milieu. D'autres informations que celles concernant l'objet observé lui parviennent en sus. Ce que le sujet est à même de percevoir dépend du point d'observation : l'ensemble des rayons lumineux qui se croisent en un point constitue une configuration optique singulière. Le flux optique correspond à un changement de configuration optique, dû à un déplacement du sujet ou d'un objet du milieu. Le flux optique constitue ici le matériau de base de la perception, ce qui fonde un distinguo majeur avec un abord cognitiviste. Selon Valette (2001, p. 97-98), « *Dans la théorie indirecte de la perception, l'image rétinienne est ambigüe et l'observateur devra reconstruire l'image de son environnement à partir* [des] *informations lumineuses perçues* […] *mais surtout à partir de son apprentissage visuel, de sa mémoire et de sa culture.* » Alors que « *Pour Gibson, l'information étant saisie et non traitée* », elle procède des caractéristiques du flux lumineux.

[26] Un invariant structurel est lié à l'organisation géométrique de l'environnement. C'est par exemple le cas de la classique parallaxe, qui est de nature à informer directement « *sur les distances relatives séparant les différentes surfaces de l'environnement* » (Temprado et Montagne, 2001, p. 23). Un invariant transformationnel, quant à lui, informe l'acteur « *sur la nature de ses déplacements dans l'environnement* » ainsi que sur celle « *des déplacements d'éléments de l'environnement par rapport à lui* » (Temprado et Montagne, 2001, p. 24). C'est ainsi le cas du focus d'expansion, de l'accélération verticale optique ou encore du fameux Tau (τ) (voir notamment à ce sujet Temprado et Montagne, 2001).

[27] Selon Scott (2002, p. 328): « *Lee (1976) showed that, in principle, the remaining time-to-contact of an object traveling directly towards the eye with a constant velocity can be specified by the inverse of the relative rate of dilatation of any two points on the surface texture on the objet.* »

[28] Selon Lee, Lishman et Thomson (1982, p. 456), dans le cas de l'élan au saut en longueur, le « *time to contact is specified directly by a single optical parameter, the inverse of the rate of dilatation of the image of the board* ». Cela invite à envisager le contrôle de l'action au regard d'une cycloïde « information-mouvement » dont les caractéristiques autorisent, à « *formuler des prédictions sur les comportements qui devraient être observés lorsqu'un mécanisme de contrôle reposant sur la mise en œuvre de ce cycle est utilisé* » (Temprado et Montagne, 2001, p. 45) : il en va de formalisations mathématiques mettant en relation information et mouvement, dénommées lois de contrôle. Ceux-ci indiquent que la première loi de contrôle proposée émane de Warren, Young et Lee (1986), laquelle « *faisait suite au travail de Lee et al. (1982)* » relatif à la prise d'élan en saut en longueur. D'une manière générale, il est considéré ici, notent Temprado et Montagne (2001, p. 41), que le contrôle de l'action « *s'appuie* […] *sur la mise en relation d'une information et d'une force qui elle-même donne lieu à la production d'un mouvement* ».

en somme de devenir sensible (*attuned*) à l'information pertinente autorisant la décision ou le contrôle de l'action. Ce qui revient, si on se reporte à Gibson et Gibson (1955a, 1955b), à apprendre à discriminer les stimuli[29]. C'est en ce sens que dans le cas du saut en longueur, Cornus et Marsault (2003) ont proposé, plutôt que le travail d'un élan le plus stéréotypé possible, une pratique selon des conditions d'approche variables (vitesse, distance d'élan…) : on peut escompter que, sur fond de telles variations, l'élève parvienne d'autant plus aisément à discriminer l'invariant en prise avec la planche d'appel. On pourrait imaginer une stratégie du même type quant à la décision d'action, par exemple au badminton, via des volants variables envoyés quasiment sur l'apprenant, qui aideraient à accéder aux informations autorisant à opter pour un revers ou bien un coup droit… Le tableau 1 ci-après vise en tout état de cause à montrer que le formalisme de l'approche écologique autorise une réflexion sur l'intervention en APSA.

Tableau 1 – Réflexion à un travail de l'ajustement des foulées d'élan au saut en longueur

Repères

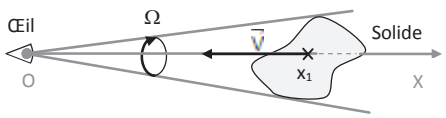
Soit un solide se déplaçant en translation vers l'œil à la vitesse $\vec{V}$ (cf. Schéma 1).
La vitesse du solide par rapport à l'œil, pendant un temps très court dt, est :

$$V = (-dx) / dt = (-dOx_1) / dt$$

L'angle solide Ω sous lequel l'œil voit le solide dépend en outre de la distance Ox_1 ainsi que de l'aire S de la surface apparente du solide sur une sphère de centre x_1 et de rayon Ox_1 ; on a alors :

$$\Omega = S / (Ox_1)^2$$

Schéma 1



Relations entre TPC1, Ω et τ

Dans le cas présenté ci-dessus, le temps de pré-contact de premier ordre, TPC1, est le suivant :

$$TPC1 = \{OX_1 / [(-dOx_1) / dt]\} = Ox_1 / V$$

L'inverse de la vitesse relative de variation de l'angle solide (qu'on notera T) est quant à elle la suivante :

$$T = [\Omega / (d\Omega / dt)]$$

On a, en application des règles du calcul différentiel :

$$(d\Omega / dt) = \{d[S.(Ox_1)^{-2}]\} / dt =[- 2S.(Ox_1)^{-3}. d(Ox_1)] / dt = 2S.(Ox_1)^{-3}.[(-dOx_1) / dt] = 2S.(Ox_1)^{-3}.V$$

Par voie de conséquence :

$$T = [\Omega / (d\Omega / dt)] = [S.(Ox_1)^{-2}] / [2S.(Ox_1)^{-3}.V] = 1 / [2(Ox_1)^{-1}.V] = (Ox_1) / 2V$$

D'où :

$$T = TPC1 / 2$$

Ω est ainsi ici de nature à renseigner à chaque instant sur TPC1 : la surface apparente du solide étant constante (translation), l'expansion perçue de « l'aire » de cette surface est strictement liée à la vitesse relative de déplacement. Aussi a-t-on également une relation formelle entre TPC1 et τ, donc entre T et τ. Temprado et Montagne (2001) montrent ainsi que dans le cas où le solide est une sphère, et sous certaines conditions, τ = TPC1. Compte tenu de la démonstration précédente, on a en ce cas-là τ = 2T.

Au regard de la précision de l'élan au saut en longueur

Qu'en est-il de cette logique, pour ce qui est de l'élan au saut en longueur ? Comme l'indique le schéma 2 ci-après, en ce cas, « l'aire » perçue (par le sauteur) de la surface apparente varie avec l'angle α que fait l'axe du cône de vision avec l'horizontale.
$\Omega = S / (Ox_1)^2$ est de fait fonction de deux variables dans le cas général. Si S est variable, alors :

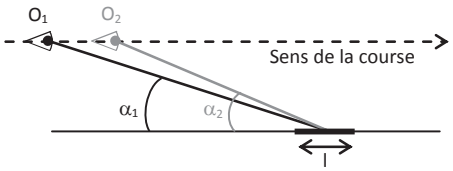
$$d\Omega = d[S.(Ox_1)^{-2}] = [(Ox_1)^{-2}.S'dS] + [-2S.(Ox_1)^{-3}.d(Ox_1)],$$

avec S', dérivée de S(t) et S(t) rendant compte de la variation de S avec le temps. En ce cas, donc, $T = [\Omega / (d\Omega / dt)] \neq TPC1$.

[29] Gibson et Gibson (1955a, 1955b), comme le note Greeno (1994, p. 336), « *argued that perceptual learning should not be subsumed by the general stimulus-response theory that was then at the center of scientific research and thinking about action and learning. They proposed that the psychology of perceptual learning should be about learning to perceive more of the differentiating qualities of stimuli in the environment rather than acquiring associated responses that cause greater differentiation by enrichment of stimuli as a result of past experience.* »

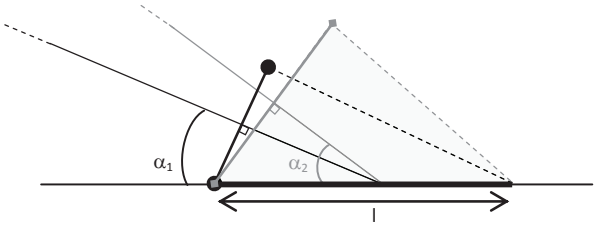
Schéma 2

Schéma 2a



Avec α, l'angle que fait l'axe du cône de vision avec l'horizontale, et l la largueur de la planche. On suppose que l'œil fixe un point situé au centre de la planche d'appel.

Schéma 2b



●——●	l_1, largeur apparente de la planche vue depuis O_1
◆——◆	l_2, largeur apparente de la planche vue depuis O_2

Il est clair qu'il n'y a pas ici d'influence de la position de l'œil pour ce qui est de la longueur de la planche, L (non représentée). En revanche, cette position influe sur la perception de la largeur (on a ici à l'évidence $l_2 > l_1$) donc sur la surface apparente (ici, $S_i = L.l_i$).

Perspectives

Dans le cas ci-dessus, l'évolution au fil du temps de « l'aire » perçue de la surface apparente dépend certes de la vitesse relative de déplacement mais aussi de la position de l'œil par rapport à la planche. Aussi peut-on s'interroger, dans ce cas, sur l'existence d'une relation stricte entre TPC1 et τ. Mais on peut aussi envisager un aménagement matériel autorisant une relation d'égalité quant à T et TPC1, donc concernant TPC1 et τ. Si le sauteur a comme cible un faisceau cylindrique lumineux (rectiligne) parallèle à la longueur de la planche et d'incidence rasante à la surface de celle-là (rayon laser…), la surface apparente n'est pas influencée par la position de l'œil par rapport à la planche et « l'aire » perçue de celle-ci dépend uniquement de la vitesse relative de déplacement. Ce qui autorise au demeurant une pratique variable telle que proposée par Cornus et Marsault (2003).

Le formalisme de l'approche écologique permet ainsi de réfléchir à une intervention en APSA. Conclusion qui vaut pour l'approche, souvent dite dynamique, correspondant à une seconde catégorie de travaux s'intéressant aux propriétés d'auto-organisation du système neuro-musculo-squelettique (Temprado et Montagne, 2001)[30]. Il suffit, pour s'en persuader, de consulter la présentation de cette approche opérée à destination des intervenants en APSA par Delignières (1998), dans la Revue EP.S. Les théories relatives au contrôle ou aux apprentissages moteurs se montrent ainsi relativement suggestives quant à l'intervention en APSA. Si l'on peut se questionner sur leur intérêt en la matière, c'est donc plutôt en ce qu'elles offrent un panorama évolutif et tourmenté que réfracte une diversité de pistes pour le praticien. Ce qui interroge quant à une éventuelle transposition.

3. Perspective transpositive intégrative et épistémologie des contenus scolaires

Un tour d'horizon esquissé à grands traits montre que la recherche relative au contrôle ou aux apprentissages moteurs débouche somme toute assez généralement sur des perspectives, sinon des préceptes ou des prescriptions, intéressant l'intervention en APSA. Prolificité va certes ici de pair avec diversité voire hétérogénéité, ce qui reflète l'existence de points de vue distinctifs quant au contrôle

[30] Plusieurs auteurs, à l'instar de Temprado et Montagne (2001) distinguent ici la perspective physique naturelle, en prise avec les travaux originels de Bernstein (e.g. 1967), et impulsée par Turvey et Kugler (e.g. Turvey, Shaw, Mace, 1978 ; Kugler et Turvey, 1987), et la synergétique, initialisée par Haken (e.g. 1977 ; 1983) et largement développée quant aux coordinations motrices sous la houlette de Kelso (e.g. Haken, Kelso, Bunz, 1985 ; Kelso, 1981 ; 1984).

moteur, aux processus et aux stades de l'apprentissage (Fargier, 2006). Le chemin conduisant de l'axe de recherche à la piste d'intervention s'avère, en sus, relativement sinueux. Cela est patent dans le cas de l'approche écologique. Ses tenants soulignent notamment qu'elle n'a pas élucidé en l'état comment s'initialiserait et s'optimiserait une mise en résonance entre information potentielle que recèle le champ optique ambiant et processus perceptif (Montagne et Laurent, 2004)[31]. Les réflexions qu'elle autorise néanmoins sont par ailleurs susceptibles d'être questionnées au regard des particularités d'une APSA donnée. Dans le cas du saut en longueur, on peut ainsi se demander dans quelle mesure la prise d'avance d'appuis opérée en fin d'élan (e.g. Piasenta, 1987)[32] impacte la stratégie informative envisagée précédemment… Un cas tel que celui de la théorie du schéma peut sembler susciter une application plus directe. Pour autant, il a été noté en amont que cette théorie ne rend pas compte de l'acquisition d'un PMG. Sherwood et Lee (2003), notamment en cohérence avec Adams (1992), soulignent en outre que la pratique aléatoire a des implications en termes d'ordonnancement de la pratique qui ne se déduisent pas de la théorie du schéma[33]. S'il en va autrement de la pratique variable, celle-là a suscité des résultats mitigés conduisant à s'interroger sur les conditions de sa validité (van Rossum, 1987 ; 1990). Encore certains travaux opérés au regard de la théorie du schéma ont-ils relativisé le propos de Schmidt quant à la fréquence relative d'apport des FBE[34]. D'autres ont mis en avant l'intérêt de focus externes plutôt qu'internes notamment quant à la teneur des FBE, ce que ne prédit pas la théorie du schéma[35].

Il demeure que la recherche scientifique quant au contrôle ou aux apprentissages moteurs suscite les formalisations de possibles en matière d'intervention en APSA. Sauf à nier l'existence de celles-là, il convient d'en examiner l'intérêt. Si cela semble invalider l'option d'un rejet de principe, force est de constater que celle d'un quelconque applicationnisme ne paraît guère plus tenable. En premier lieu, les perspectives dégagées quant à l'intervention en APSA apparaissent en elles-mêmes ne pas être de pures

---

[31] Encore sied-il de noter que cette approche est susceptible de connaître des évolutions conséquentes. Temprado et Montagne (2001) ont pointé à ce propos plusieurs perspectives. Certains travaux interrogent l'idée selon laquelle l'invariant constituerait l'alpha et l'oméga d'un contrôle moteur opéré en appui sur le flux optique. D'autres stratégies informatives que celles reposant sur le flux optique ont en outre été envisagées, celles-ci étant donc en prise avec des informations autres que celles provenant des stricts mouvements relatifs de translation entre le sujet et un objet. Par exemple, des travaux prenant en compte les mouvements du corps, de la tête et des yeux, donc une combinaison de mouvements relatifs de translation et de rotation, ont conduit à s'intéresser à des stratégies d'exploitation directe (sans décomposition) du flux rétinien correspondant. D'aucuns interrogent en outre la pertinence d'un abord uni-modal (vision) de l'information sensorielle…

[32] Selon Piasenta (1987, p. 81), l'approche terminale de la planche s'effectue, dans le but de placer le centre de masse sur une trajectoire optimale lors de l'appel via « *une prise d'avance des appuis et du bassin par rapport à la ligne d'épaules* ».

[33] Les effets de la pratique aléatoire, suggérés par Battig (1966), ont été initialement repérés expérimentalement par Shea et Morgan (1979) et plusieurs les ont confirmés dans le cas de gestes sportifs comme le service au badminton (e.g. Goode et Magill, 1986). Des résultats consistants indiquent ainsi que les performances des sujets pratiquant en bloc sont supérieures à celle des sujets bénéficiant d'une pratique aléatoire durant l'entraînement mais que le rapport s'inverse lors des tests de rétention, révélateurs des effets d'apprentissage.

[34] Sherwood et Lee (2003, p. 378) indiquent ainsi : « *Recent research has shown that reducing KR frequency has little effects on parametrization errors but instead influences the acquisition of the motor program* ». Travaux auxquels Schmidt a du reste lui-même concouru (e.g. Wulf, Schmidt et Deubel, 1993 ; Wulf, Lee, Schmidt, 1994).

[35] Un ensemble de travaux produits sous la houlette de Wulf ont ainsi montré l'intérêt, dans l'acquisition d'un mouvement y compris sportif, de valoriser des focus attentionnels externes (liés au rapport du corps à l'environnement, par exemple à l'avancée du corps vers la cible lors d'un service au volley-ball) plutôt qu'internes (liés au corps propre, par exemple, au transfert du poids du corps lors de la réalisation de ce même service). Ce dont Wulf et Prinz (2001) ou Wulf (2007) rendent compte de façon synthétique.

inférences des théories à la lumière desquelles elles ont été pensées. Par ailleurs, Wulf et Shea (2002) ont produit une revue de question à l'intitulé fort explicite, sachant qu'une part notable de la recherche ici considérée porte sur des gestes relativement simples : « *Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning* ». Cela invite à nouveau à faire montre de circonspection au regard des pratiques en APSA, étant cependant entendu que le tour d'horizon opéré par ces auteurs les autorise aussi à cibler des perspectives plus spécifiques des habiletés complexes[36]. En tout état de cause, la diversité des pistes offertes par la recherche sur le contrôle ou les apprentissages moteurs invite à se garder de toute adhésion aveugle. D'autant que les divers courants de pensée en présence expliquent parfois de façon distinctive un même état de fait, par exemple, l'évolution de la locomotion bipédique en fonction de la vitesse de déplacement (passage de la marche à la course). Shapiro, Zernicke, Gregor et Diestel (1981) ainsi que Diedrich et Warren (1995) fournissent chacun des résultats expérimentaux à ce sujet, ceux des premiers validant à leurs yeux l'existence de PMG distincts, ceux des seconds étant interprétés en termes de transition de phase en une motricité auto-organisée.

Un tel cas de figure, qui n'est en rien une exception, peut s'envisager sous l'angle d'une crise dans laquelle les tenants de divers points de vue s'arc-boutent sur leurs positions respectives, tenant à des présupposés difficilement conciliables, sinon inconciliables, en une logique comparative où prévaut le « *raisonnement circulaire* » (Kuhn, 1983, p. 135). Mais il peut aussi en aller d'essais de dépassement, certes opérés sur fond de disputation, peut-être favorisés par un relatif relâchement des règles de l'activité scientifique opérée à l'aune du paradigme en place (Kuhn, 1983). On voit en tout état de cause se développer des esquisses, sinon de conciliation, à tout le moins d'un processus qu'on pourrait dire d'inclusion minorante. Ainsi, si Ripoll (2004, p. 20-21) concède que « *l'ambition cognitiviste à expliquer l'ensemble des comportements humains était tout à fait exagérée* », il avance que ce n'est pas parce que cet abord est « *inadéquat pour expliquer certaines formes de couplages sensorimoteurs tels ceux impliqués dans l'interception d'un projectile (ce qu'explique parfaitement le modèle de la perception directe) ou dans le contrôle d'une coordination (ce qu'explique parfaitement le modèle de l'approche dynamique), que l'ensemble du modèle cognitif doit être remis en cause.* » Point de vue notamment cohérent avec celui de Paillard (1994), lequel reconnaît l'intérêt des approches connexionnistes et dynamicistes, tout en émettant des doutes sur la portée des dernières[37]. Celui-ci avance en cohérence

[36] Ces auteurs se centrent plus particulièrement sur les cas de l'interférence contextuelle, de la fréquence relative d'apport des FBE, de la variation de l'aspect de la tâche ciblé par les FBE et le guidage physique, des focus attentionnels externes et internes, ainsi que de l'observation.

[37] Selon Paillard (1994, p. 948), « *Si chacun reconnaît aujourd'hui l'originalité et l'intérêt de ces nouvelles perspectives théoriques ouvertes à l'approche des phénomènes biologiques, on s'accorde aussi généralement à reconnaître la relative modestie de leur portée heuristique au plan expérimental, en dépit de certains succès spectaculaires (par exemple, dans le domaine des contrôles moteurs* […]*). Ces nouveaux outils, dont la puissance révolutionnaire tarde encore à s'affirmer, ne semblent pas en état de fournir, pour l'instant tout au moins, une réelle alternative aux modèles existants.* »

que les divers abords en présence peuvent concourir à éclairer un même objet phénoménal à des niveaux d'organisation différents, sans fatalement remettre en question, donc, le point de vue en l'état dominant[38]. Encore Eliasmith (1996) développe-t-il un argumentaire voisin pour ce qui est des STC en leur globalité[39]. Ce type d'analyses paraît au demeurant déborder le champ de la recherche sur l'humain, comme on le perçoit avec Holmes (1990) au regard de la physique[40].

De tels raisonnements ne conduisent en rien à envisager une quelconque complémentarité entre des courants de pensée dont les prémisses sont difficilement conciliables. Ils suggèrent plutôt, d'une part, une éventuelle valeur ajoutée émanant de la pluralité des éclairages correspondants, d'autre part, un essai de hiérarchisation ou d'intégration renvoyant à l'élucidation de leurs champs de pertinence respectifs. Ce qui vaut au plan des débats scientifiques a par ailleurs son pendant quant aux suggestions d'intervention en APSA. Le propos de Schmidt (1993) est de ce point de vue particulièrement éclairant. Celui-ci, initiateur de la théorie du schéma, est de fait peu enclin à jeter les armes face aux dynamicistes, ce qu'il a clairement signifié (Schmidt, 2003)[41]. Pour autant, il s'attache à montrer que son modèle est de nature à s'accommoder de certains travaux opérés par l'approche écologique. Se reportant de façon explicite à la pensée de Gibson ainsi qu'à un travail de Lee et Aronson (1974), Schmidt (1993) reconnaît l'intérêt, quant au maintien de l'équilibre, de l'information visuelle ambiante que recèle le flux optique, quand bien même le mouvement est à ses yeux fondamentalement programmé. Schmidt (1993, p. 79) propose ainsi un modèle intégrant « *deux boucles de feedback visuel* ». L'une, « *consciente, lente* », intéresse la vision focale et renvoie aux « *étapes du traitement de l'information* » ; l'autre, « *non consciente, relativement rapide* », a rapport à la vision ambiante et renvoie à « *des niveaux relativement bas du système nerveux central* ». Et l'auteur avance que la seconde permet d'« *accomplir des ajustements mineurs dans les actions déjà programmées* ». Ce qui le conduit à proposer, dans le cas de l'appui tendu renversé aux anneaux, qu'on demande à l'apprenti gymnaste de fixer son regard sur un

[38] Paillard (1994, p. 952), ayant imagé en amont son propos à partir des différents niveaux d'étude possibles du fonctionnement d'un four à micro-ondes, indique : « *Autrement dit, le même objet phénoménal peut être étudié de divers points de vue, à des niveaux d'organisation différents, avec des instruments d'observation qui diffèrent, avec des questionnements variés et, par suite, conduire à des descriptions différentes. En aucun cas, cependant, ces descriptions ne sauraient être exclusives et elles sont parfaitement recevables dans leur complémentarité et en toute légitimité scientifique.* »

[39] L'analyse d'Eliasmith (1996, p. 460) le conduit ainsi à avancer : « *Thus, the dynamicist hypothesis has not provided a foundation on which to build a new paradigm. What it has provided, however, are reasons to intensify a particular type of connectionist modeling; one which uses the tools of dynamical systems theory to understand the functioning of connectionist networks.* »

[40] Holmes (1990, p. 162) conclut son analyse en prise avec les travaux de Poincaré sur la mécanique céleste, et de ceux portant sur la théorie des systèmes à dynamique non linéaire ou encore la théorie du chaos, en ces termes : « *I do not realy see a "new science" here, in particular, I do not see that "chaos theory" even exist as a coherent object for example like the quantum and relativity theories.* […] *However, we do have a loose collection of ideas and methods* […] *which can add to the scientist's toolbox.* »

[41] Schmidt (2003, p. 368), s'exprimant ici quant au débat relatif à l'idée de programme moteur, dont il signifie la forte résurgence depuis les années 1980, indique : « *For a time, and probably even continuing today, scientists in these areas, have developed "camps" whose members (myself included) refused to be swayed by the arguments of the "enemy"* ». Et celui-ci considère que le combat a fait rage jusqu'à susciter certaines manifestations d'ostracisme : « *I have seen a great deal of contention based on these issues over the years and even some blatant discrimination in areas related to grant support and manuscript evaluation.* »

point du tapis en-dessous de lui, pour l'aider à détecter en vision ambiante les changements de valeur de l'invariant en jeu…

Si l'on saisit le fondement, au plan scientifique, du processus qu'on a dit ici d'inclusion minorante, on peut s'interroger sur le bien-fondé de son pendant quant aux perspectives d'intervention en APSA. En définitive, un modèle tel que celui présenté par Schmidt (1993), quand bien même il est de nature composite, correspond à un point de vue tranché en une disputation. L'adopter unilatéralement peut revenir à opter pour une position applicationniste, dont les limites ont été précédemment explicitées. Le processus d'inclusion minorante repéré vaut certes en regard d'un ensemble de courants de pensée en tension et vise en cohérence à spécifier le champ de pertinence de chacun quant à un objet donné. On peut cependant considérer qu'il renvoie à un cas de figure plus général, tenant à l'idée selon laquelle les objets qu'étudie une science sont construits par sa méthode (e.g. Astolfi et Develay, 1989 ; Rey, 1996), laquelle donne sens au fait, voire le constitue comme tel, les données expérimentales concourant en retour à spécifier le champ d'application de celle-là. Cela peut sembler frappé au coin du bon sens : indépendamment des débats pointés, tout abord scientifique a par nature un domaine de pertinence limité. Le problème essentiel est ainsi, au regard de l'intervention en APSA, pour tout aspect donné de la pratique d'une APSA ou tout objet d'apprentissage correspondant, celui de la pertinence d'un référent quant au contrôle ou aux apprentissages moteurs (Fargier, 2006). Point de vue semblant cohérent avec celui de plusieurs spécialistes de ce champ-là, dont le propos concourt à la spécification requise. Delignières et Nourrit (1997) avancent ainsi que la pertinence de l'approche des bases de connaissances, à tout le moins si on se centre sur le cas des connaissances déclaratives, est sensiblement plus grande dans le cas des habiletés stratégiques que dans celui des habiletés techniques. Temprado et Montagne (2001) notent que Gibson (1958) a lui-même circonscrit le domaine de validité de son approche à cinq cas de figure[42]…

Cette perspective, appelant à analyser finement le domaine de validité d'un éclairage scientifique donné au regard d'un aspect déterminé de la pratique d'une APSA, peut susciter un travail de méta-analyse des productions scientifiques, ci et là esquissé[43]. Elle semble en sus en appeler à l'analyse de la pratique d'une APSA. Le distinguo opéré par Delignières et Nourrit (1997) entre habiletés technique et stratégique invite par exemple à s'intéresser aux dimensions stratégiques éventuelles d'une habileté

[42] Il s'agit, selon ces auteurs, de l'initiation et l'arrêt d'un déplacement, du guidage d'un déplacement vers un but, de l'évitement d'un obstacle en cours de déplacement, du freinage à l'approche d'un obstacle et de l'interception ou l'évitement d'un objet en cours de déplacement.

[43] Delignières et Nourrit (1997) proposent ainsi des distinctions entre tâches de coordination ou de contrôle, entre habiletés techniques ou stratégiques et convient à envisager les effets de tel mode de pratique en prise avec une théorie donnée en fonction d'une telle classification.

technique[44]… Cela peut au demeurant susciter une confrontation avec les formes de pratiques qu'ont développées les intervenants en APSA au fil du temps et de l'expérience, certaines pouvant perdurer par pure habitude ou tenir à un effet de « mode », d'autres être stabilisées en raison d'une efficacité avérée (Delignières, 1998). Il demeure qu'une pratique en APSA n'est en rien suspendue en un vide abstrait : elle s'opère dans un univers socioculturel particulier, en l'occurrence ici, l'EPS. La portée en ce domaine de la perspective intégrative dont on a dessiné les contours est dès lors à questionner. Ce qui renvoie en premier lieu à la question des contenus à enseigner, lesquels sont ici avant tout scolaires. Develay (1992) a montré qu'ils procèdent, au sein de la culture d'une époque donnée, d'une sélection et d'une structuration tenant au premier chef à un choix de valeurs. Ces contenus ne constituent ainsi en rien un décalque appauvri de leur référence et ont une épistémologie qui leur est propre. Une clarification du « *principe d'intelligibilité* » (Develay, 1992, p. 43) correspondant apparaît ainsi de nature à spécifier un cadre à l'aune duquel seraient à envisager les possibles offerts par la recherche sur le contrôle ou les apprentissages moteurs, compte tenu de leurs champs de pertinence respectifs.

Develay (1992) a en tout état de cause illustré l'intérêt d'une épistémologie des savoirs scolaires à partir d'études relatives à diverses disciplines d'enseignement (biologie, histoire, français…) montrant que les valeurs de référence impactent les contenus, lesquels concourent en retour à la transmission de celles-ci, non sans incidence sur les modes de travail[45]. L'EPS ne paraît pas faire exception. Les textes officiels successifs qui lui sont relatifs attestent en tout état de cause de changements dans les contenus à enseigner. Et Fargier (2002) a par exemple repéré, dans le cas de l'athlétisme en EPS, une évolution des discours sur les objets d'acquisition cohérente avec de grandes mutations du système éducatif, tels qu'en rend compte Prost (1992)[46]. On peut ainsi évoquer le cas des écrits de la Revue EP.S sortis dans les années 1980 et 1990, alors qu'était mise en avant, à l'échelle de l'École, la réussite de tous via une

[44] Si l'on prend l'exemple du triple-saut, on peut considérer que la spécification d'une distance et/ou vitesse d'élan autorisant à sauter dans les meilleures conditions (maîtrise du geste…) renvoie à une dimension stratégique, de même que la recherche d'une répartition optimale des sauts, notamment compte tenu des qualités physiques que l'on possède. En revanche, l'ajustement des foulées en vue de produire un élan des plus précis peut apparaître relever d'une autre logique…

[45] Develay (1992) souligne ainsi que la théorie de l'évolution a fondé un temps le principe organisateur de la biologie en 6e et 5e. Il en allait notamment de l'étude de monographies d'espèces dans une logique d'anatomie comparée, censée étayer peu à peu l'idée selon laquelle les êtres vivants sont le fait d'une série de transformations. Ce qui prolongeait le positivisme du début du XXe et renvoyait à une culture longtemps en opposition aux valeurs religieuses. Develay (1992) montre aussi que dans les années 1990 les programmes de 6e et 5e mettaient l'accent sur l'étude de grandes fonctions (alimentation, respiration…), liant étroitement éthologie, anatomie et physiologie et suscitant une approche du vivant en termes structurels et systémiques. L'étude de systèmes autonomes révélait un principe d'interdépendance des espèces et de leur milieu, mettant l'accent sur la valeur du libre-arbitre de l'homme en ce système.

[46] Les valeurs de référence ont évolué, avec le passage d'une École de la sélection, mettant en avant l'effort et le mérite, à une École de la réussite de tous, visant à une orientation active plutôt que subie, via une mise en projet. Encore pourrait-on considérer qu'il en a été d'une nouvelle étape majeure avec l'adoption par l'École actuelle de l'approche par compétences (Fargier, 2005). Et l'EPS a également évolué, notamment au plan de l'évaluation certificative, concourant à donner le ton, en particulier au regard de l'athlétisme. Avec, au fil du temps, le passage d'un statut d'activité phare à l'examen à celui d'une APSA possible dans un menu d'activités sur lequel l'élève a, au moins en théorie, une marge décisionnelle. Avec, également, une relativisation du poids de la seule performance mesurée pour une prise en compte accrue des acquis, assortie *a fortiori* de nos jours, d'une volonté de mise en place de dispositifs voulus rendre compte de l'intégration d'un ensemble de ressources requises par la pratique efficace et bien gérée d'une APSA.

orientation active tenant à une mise en projet d'apprendre, et que l'on réfléchissait, dans le cas de l'EPS, au moyen de concerner effectivement tous les élèves. L'examen de ces productions permet de pointer une centration des propositions de pratique, d'une part, sur les techniques spécifiques d'une course de sprint, d'un saut ou bien d'un lancer donné, d'autre part, sur la gestion ou le développement des ressources bioénergétiques en demi-fond. Deux formules qui ciblent les attributs clés de la pratique sociale de référence (technique et qualités physiques) et autorisent des projets individuels d'acquisition, favorisés par une logique d'évaluation relativisant le poids de l'inné. La littérature professionnelle laisse aussi transparaître, à la même époque, des propositions associant, en une démarche de projet, les deux aspects de l'athlétisme ici considérés, notamment sous l'angle d'une personnalisation de la technique en fonction des qualités physiques individuelles. Ce qui peut être mis en perspective avec un processus, alors en cours, d'adoption par l'École de l'approche par compétences…

Il convient de noter, avec Terret (e.g. 1999), qu'une évolution des valeurs de référence ne saurait constituer l'explication exclusive de la mise en place d'une APSA en EPS et des modalités de son enseignement. Quoi qu'il en soit, les conceptions relatives aux découpages des contenus ne semblent guère pouvoir s'envisager sous l'angle de pures déductions d'une quelconque théorie quant au contrôle ou aux apprentissages moteurs, même si ce type de référents n'apparaît pas banni *a priori* des réflexions à ceux-ci. Ces contenus renvoient à un processus intégrant une sélection, d'éventuelles transformations et une hiérarchisation. Ce qui appelle à une élucidation de leur épistémologie, de nature à éclairer la matière à partir de laquelle pourrait s'envisager la perspective transpositive intégrative pointée.

4. Au regard d'une anthropologie des contenus scolaires, pour une prospective

À ce stade de la réflexion, la perspective transpositive intégrative envisagée apparaît tenir au croisement de trois analyses. La première renvoie à une spécification des propositions ou pistes relatives à l'intervention en APSA offertes par tout courant de pensée quant au contrôle ou aux apprentissages moteurs. La deuxième intéresse une élucidation du champ de pertinence de chacune des options en présence. La troisième vise à une mise en lumière de l'épistémologie des contenus à faire apprendre. Il peut sembler en aller d'une voie prometteuse, que n'invalide pas en soi l'idée selon laquelle les choix de contenus ont leur influence sur les démarches correspondantes. Pour autant, le regard épistémologique ainsi envisagé s'est focalisé sur les contenus à enseigner ou sur les discours quant à l'enseignement de contenus relatifs à une APSA. Et Develay (1992), s'il a montré l'intérêt de cette approche, n'en opère pas moins un distinguo explicite entre savoirs à enseigner, savoirs enseignés et savoirs appris. Sensevy (e.g.

2009, p. 50) a au demeurant mis en avant, avec d'autres, l'existence d'une « *"épistémologie pratique" des professeurs* », théorie de la connaissance qui est leur, « *produite par la pratique et la produisant en retour* ». Il souligne en cohérence que nombre de travaux dans le champ didactique ont concouru à montrer qu'« *étudier ce qui est spécifique du contenu nécessite d'intégrer des aspects de l'enseignement et de l'apprentissage qui ne sont pas eux-mêmes directement spécifiques du contenu* ». Ce qui semble de nature à limiter la portée d'une perspective transpositive intégrative qui s'appuierait exclusivement sur une analyse des contenus à enseigner voire sur des discours en prise avec l'enseignement de contenus.

Des chercheurs en didactique comparée mettent de fait l'accent, à l'instar de Schubauer-Leoni et Leutnegger (2005, p. 498), sur « *l'intérêt qu'il peut y avoir à situer le lieu d'investigation des phénomènes de transposition didactique ni (que) dans les savoirs ni (que) dans les sujets -enseignants et apprenants- mais dans leur action conjointe* » pour « *considérer ce travail de coproduction de connaissances à la lumière des pratiques culturelles qui le légitiment* ». Il est ainsi suggéré que l'étude du processus de transposition didactique gagne à se doter d'un abord traitant de concert objet(s) de savoir et sujet(s) dont l'activité vaut au sein d'une institution donnée. Ce qui revient, selon une formulation de Mercier et al. (2002, p. 10), à s'intéresser au « *didactique "ordinaire"* »[47]. Ainsi met-on en exergue l'intérêt d'un abord de la transposition didactique sous un angle situé, donc au regard de l'enseignement et de l'apprentissage d'un contenu tels qu'ils s'opèrent au quotidien d'un établissement scolaire ou en formation. Encore pourrait-on évoquer le point de vue de tenants d'une anthropologie cognitive, mettant l'accent sur le processus de construction expérientiel de l'acteur *in situ*. Par exemple en se reportant à l'approche de Theureau (2005, p. 281), qui en avance explicitement l'intérêt au regard d'une « *didactique des activités physiques et sportives* »[48]. De tels travaux invalident-il la perspective transpositive intégrative ici considérée ou peuvent-ils offrir des repères aidant à sa pertinence ?

---

[47] Mercier et al. (2002, p. 10) précisent que par ordinaire, ils entendent ce qui renvoie au « *monde de l'enseignement et de l'étude considérés relativement à des organisations culturelles d'objets* ». Schubauer-Leoni et Leutnegger (2005, p. 424) indiquent quant à elles qu'il est question des situations scolaires d'enseignement-apprentissage s'opérant en dehors de tout travail de recherche piloté par une ingénierie didactique.

[48] Theureau (2005, p. 282) positionne clairement son approche des cours d'action en rupture avec tout abord cognitiviste. Se reportant à Varela (1979 ; 1989) et Varela et al. (1993), il défend que l'activité d'un acteur en un milieu donné est au premier chef autonome, au sens où un système autonome (aussi dit opérationnellement clos) « *interagit, non pas avec son environnement tel qu'il peut être vu par un observateur, mais avec son environnement (ou domaine) propre, c'est-à-dire avec ce qui dans cet environnement est pertinent pour sa structure interne à l'instant considéré* ». Ce qui est censé valoir pour tout ou partie de l'acteur et ses éventuels prolongements prothétiques ainsi que pour ce qui concerne un groupe d'acteurs. Theureau (2005) s'appuie sur cette caractéristique d'autonomie pour distinguer trois domaines phénoménaux, qu'il qualifie respectivement de structurel, de cognitif et d'expérience. Le domaine structurel renvoie aux processus qui conduisent au domaine cognitif, lequel rétroagit sur celui-ci à chaque instant. Le domaine d'expérience, rétroagissant sur les processus qui y conduisent, tient au caractère vécu de l'activité humaine, c'est-à-dire à un processus de construction de l'expérience à chaque instant. La connaissance du cours d'expérience, via une méthodologie spécifique, est ainsi censée autoriser à rendre compte, de manière certes partielle mais recevable, du domaine cognitif. Il en va d'une approche, voulue fondée en regard de la portée intrinsèque et des avancées actuelles des « *neurosciences* » et des « *sciences humaines et sociales* », notamment de la « *psychologie* » (Theureau, 2005, p. 281-282), et visant à rendre compte de « *ce qui, dans l'activité d'un acteur déterminé, engagé activement dans un environnement physique et social déterminé et appartenant à une culture déterminée, est préréflexif, ou encore significatif pour cet acteur, c'est-à-dire montrable, racontable et commentable par lui à tout instant de son déroulement à un observateur-interlocuteur moyennant des conditions favorables* » (Theureau, 2005, p. 283-284).

L'essentiel des chercheurs relevant de cet abord anthropologique et qui se sont intéressés plus spécifiquement au cas de l'EPS suggèrent, à l'instar de Durand (e.g. 1999, p. 78-79), que les approches occultant le caractère situé de l'expérience scolaire font par nature les frais d'une « *absence de vision unitaire ou intégrative de l'activité des élèves* ». Cela peut suggérer qu'un éclairage de l'apprentissage au regard d'une anthropologie cognitive saurait éviter un tel travers. Des travaux tels ceux de Theureau (2005, p. 284) visent certes fondamentalement à éclairer le « *domaine cognitif* ». Mais ils s'initialisent via le cours d'action abordant de fait comme un tout, outre ce qui renvoie à ce domaine, « *la dynamique des contraintes dans l'état de l'acteur, sa situation et sa culture* » et « *celle des effets sur l'état de l'acteur, sa situation et sa culture* ». Ce qui peut susciter une théorisation de l'apprentissage en contexte scolaire. Il en va aussi, et peut-être plus explicitement, du projet de didactique comparée, tel que l'envisagent par exemple Mercier et al. (2002, p. 13), voulu éclairer « *la dimension anthropologique du didactique* ». Ces auteurs (2002, p. 9) précisent de fait que le projet comparatiste vise à distinguer le « *générique* », relevant d'un processus d'enseignement ou d'acquisition, du « *spécifique* », se rapportant à un savoir donné[49]. Partant, si de telles approches sont à même d'éclairer ce qui s'enseigne ou s'apprend effectivement en EPS, il peut en aller de théorisations s'accommodant mal de tout autre abord.

L'advenue éventuelle de telles théorisations renvoie cependant, comme dans le cas des théories relatives au contrôle ou aux apprentissages moteurs, à la question du champ de pertinence. Et celles-là pourraient dès lors s'envisager en regard de celles-ci... Ce qui conduit à nouveau aux procès d'inclusion minorante. Ainsi, Durand (1999, p. 79), promouvant un abord situationniste, suggère que les théories relatives au contrôle ou aux apprentissages moteurs peuvent au plus fournir des « *éléments susceptibles de nourrir le répertoire de connaissances de l'enseignant* »… Aussi retrouve-t-on *in fine*, au regard de l'intervention en APSA et fusse lors des cours d'EPS, la perspective transpositive intégrative envisagée, ce sextant de fortune pouvant s'en trouver affiné[50]. À ce stade de la réflexion, on voit se dessiner, quant aux théories relatives au contrôle ou aux apprentissages moteurs au regard de l'EPS, un positionnement évitant les travers du rejet de principe ou de l'applicationnisme. Ce positionnement, s'il tient en somme à la reconnaissance d'une utilité potentielle effective de celles-ci, procède toutefois aussi de ce que leur utilisation est *a priori* indéterminée. Indétermination qui renvoie aux débats scientifiques ici envisagés

[49] Les auteurs ajoutent que « *Ces caractéristiques de spécificité et de généricité sont encore à sonder au plan des institutions, des groupes et des acteurs, des conditions dans et par lesquelles les objets constitutifs des œuvres culturelles, sont proposés aux sujets censés les étudier et les apprendre.* »

[50] Ce qui peut suggérer, comme le propose par exemple Ripoll (1996, p. 64), la mise en place d'espaces de collaboration entre chercheurs et praticiens autorisant à spécifier des objets d'étude d'une pertinence accrue, à les formaliser en confrontant les deux regards en présence pour émettre des « *hypothèses explicatives opérationnelles* » ainsi que spécifier les modalités de leur validation.

mais encore à l'idée selon laquelle ces théories, si elles peuvent concourir aux réflexions visant à spécifier le cap à tenir en EPS, ne sont pas à même de présider aux débats correspondants. Cette Indétermination peut certes se trouver réduite par une congruence entre cap à tenir et modèle du sujet apprenant, comme le suggèrent Delignières et Garsault (2001)[51]. Les modalités de cette congruence sont cependant elles-mêmes évolutives, puisque les orientations d'une discipline, comme les possibles en termes de modélisation de l'élève, le sont. Ce qui renvoie à l'indétermination initialement pointée.

En cette incertitude, il est cependant *a minima* une constante dans l'existence même de contenus à enseigner[52]. Ces derniers sont en eux-mêmes évolutifs au fil du temps, constituant un héritage en prise avec les contingences socioéconomiques et politiques d'une époque déterminée. Héritage dont Develay (1992) défend cependant qu'il renvoie aussi à une culture plus universelle, notamment au regard des valeurs. En cohérence, Forquin (1996, p. 10) défend, qu'en matière d'éducation, la culture s'entend en tant que patrimoine tenant à une sélection opérée dans un bien collectif et objectivable collectivement, dont la transmission « *transcende* […] *les frontières entre les groupes humains et les particularismes mentaux* »[53]. Aussi est-on appelé à réfléchir aux modes d'enseignement favorisant le dessein d'accès à la culture ainsi signifié. Il s'agit en somme de viser à donner accès à un patrimoine tout en faisant advenir de l'humanité. Ce qui revient, selon les mots de Lévine et Develay (2003, p. 11), à faire apprendre « *en se gardant de séparer le faire grandir de l'enfant du faire grandir de l'espèce* » et appelle à s'enquérir des conditions de développement de l'élève « *susceptibles de l'instituer en humain capable à son tour de créer de l'humain* » : il en va à leurs yeux de la « *valeur anthropologique* » de l'École. Ce qui les conduit à

[51] Selon Delignières et Garsault (2001), la question des orientations de l'EPS est fortement en prise avec le souci de donner à celle-là le statut de discipline scolaire à part entière ou à tout le moins d'asseoir sa place dans l'École. La légitimation d'une représentation donnée de l'élève tient ainsi avant tout à sa congruence avec cet objectif fort depuis les années 1960. Ces auteurs défendent ainsi qu'à cette époque, dans un contexte scolaire français fort intellectualiste, il s'est agi de mettre en avant l'idée que l'EPS sollicite voire développe l'intelligence. Ce qui aurait favorisé une conception de l'élève en tant qu'individu rationnel, pouvant développer son intelligence grâce à sa motricité ou recourir à son intelligence pour mettre à l'œuvre sa motricité. Ce qui a notamment pu favoriser la mise en avant, à tout le moins dans les discours sur l'EPS, de références au constructivisme piagétien, au cognitivisme… Delignières et Garsault (2001) défendent en outre que depuis les années 1990, une conception nouvelle, de l'élève futur citoyen, s'est mise en place, en cohérence avec l'évolution de l'École et des attentes de la société quant à celle-ci. Et ces auteurs font l'hypothèse que cela va susciter une EPS en prise accrue avec des situations complexes et aux contours moins définis *a priori* que ce n'était le cas auparavant, suggérant de ce fait un recours accru aux théories de la complexité, telles que la théorie des système dynamiques et donc, à l'approche dynamique précédemment évoquée ici…

[52] Contenus non pris en compte spécifiquement par les théories relatives au contrôle ou aux apprentissages moteur, ce qui a suscité l'idée d'une perspective transpositive intégrative en prise avec un abord épistémologique. Contenus qui de surcroît ne semblent en eux-mêmes pas (avoir été) spécifiquement investis par les approches relevant d'une anthropologie cognitive. Contenus, enfin, qui peuvent renvoyer à un point de faiblesse relative du programme de recherche de la didactique comparatiste : Schubauer-Leoni et Leutnegger (2005, p. 421) soulignent que celui-ci court le risque « *d'une perte de vue de l'organisation des objets de savoir et* [de] *se trouver ainsi démuni pour saisir l'espace culturel et institutionnel dont disposent effectivement les sujets pour agir* », suggérant une articulation avec le programme épistémologique plus classique dans le champ didactique.

[53] Forquin (1996, p. 9) a explicité que dans le large spectre sémantique du terme de culture, il existe une tension entre « *une facette individuelle et une facette collective, un pôle normatif et un pôle descriptif, une accentuation universaliste et une accentuation différentialiste* ». Cet auteur s'attache à montrer qu'en matière d'éducation, on ne peut retenir absolument ni l'un ni l'autre des deux extrêmes de ce champ sémantique. Ces extrêmes correspondent plus précisément, d'une part, à « *la culture considérée comme l'ensemble des dispositions et des caractéristiques de l'esprit cultivé, c'est-à-dire la possession d'un large éventail de connaissances et de compétences cognitives générales, d'une capacité d'évaluation intelligente* […] », d'autre part, à « *la culture considérée comme l'ensemble des traits caractéristiques d'un mode de vie d'une société, d'une communauté ou d'un groupe* ».

prôner une anthropologie des savoirs scolaires voulue spécifier les conditions qui favorisent une telle visée[54]. Develay (1996, p. 106) a initialement associé l'accès par l'élève aux fondations épistémologiques d'une discipline à sa découverte des fondements anthropologiques de celle-là, via une intelligence des questions auxquelles « *cette discipline répond qui permettent à l'homme de se comprendre* ». Celui-ci a en outre signifié qu'il en va de questions fondatrices de l'humain, que l'homme s'est posées depuis qu'il est homme, évoquant notamment dans le cas de l'EPS les questions des rapports entre le corps et l'esprit, entre la pensée et la conscience ou encore celle du corps au regard d'une recherche d'idéalité (Fargier, 1997). Et Develay (2000) a souligné qu'il s'agit *in fine* de questions sans réponse définitivement arrêtée tant elles sont essentielles.

Une anthropologie des savoirs, ainsi envisagée, viserait donc à la spécification de questions fondatrices auxquelles il s'agirait de confronter l'élève via son acquisition des contenus d'une discipline donnée. Questions suscitant des réponses provisoires que l'on peut interroger quant à leur impact sur le vivre ensemble. Questions autorisant au premier chef à reconnaître l'autre dans son questionnement et à se reconnaître en ce questionnement. Questions dont Develay (2000) note qu'elles émergent de la sphère de la recherche scientifique en ce qu'elles sont questions de toujours. Or, les théories quant au contrôle ou aux apprentissages moteurs réfractent, comme cela a été explicité en amont, des débats dont le panorama, à l'image de celui embrassant les STC en leur ensemble, présente une ligne de front fondamentale quant au représentationnalisme, qui tient à des prémisses inconciliables. Inconciliabilité que l'on peut renvoyer à la question des rapports entre le corps, l'esprit *et* l'environnement (Fargier, 2006). Question qu'un regard méta-analytique sur les avancées de la recherche développée dans ce domaine-ci autorise à préciser. Ainsi, les propos de Bernstein (1967 ; 1996) ou de Wulf et Prinz (2001), relevant pourtant d'abord distinctifs, concourent à suggérer qu'il s'agit ici de s'enquérir de ce qui, dans la sphère du conscient et du partageable en conscience, peut autoriser le sujet à avoir prise sur son comportement moteur. Ce qui revient à confronter l'élève à la question de la détermination du niveau

[54] Lévine et Develay (2003, p. 10) rappellent l'idée selon laquelle l'anthropologie a pour projet de « *penser le rapport entre la diversité et l'unité de l'humanité, de vérifier la tension entre des particularismes existants et un problématique universalisme, de sonder la dialectique entre l'un et le multiple, du global et du local ; de "penser l'autre et le même sous leurs aspects les plus divers" (Kilani, 1994, p. 21)* ». Constatant que ce projet a peu à peu suscité un émiettement en de multiples disciplines (anthropologie économique, historique, biologique…) au détriment d'une vision unificatrice, les auteurs s'attachent à spécifier l'anthropologie en un sens fédérateur et valide au regard de l'École. Ce que leur apparaît autoriser l'étymologie, mettant en avant l'idée de fécondation : « anthropo *est formé de* andr *(*andro *désignant l'homme en tant que guerrier) ; de* theros*, sperme – expliquant ainsi le* th*, absent du radical* andr *- ; et de opos, voir* ». Aussi considèrent-ils l'anthropologie comme « *la science s'intéressant aux conditions qui ont permis, qui permettent et qui permettront à l'homme de féconder (de créer) de l'humain* ». Point de vue qu'ils jugent fondé en regard de l'anthropologie kantienne, Kant distinguant une anthropologie théorique, une anthropologie pragmatique et une anthropologie morale, visant à une connaissance de l'homme respectivement au regard de ses facultés, de ce qui peut autoriser ou accroître son habileté et de ce qui suscite la sagesse dans la vie : Lévine et Develay (2003, p. 10-11) citent ainsi Kant (1991, p. 11) selon lequel l'anthropologie renvoie à « *la connaissance pragmatique de ce que l'homme, en tant qu'être de libre activité, fait ou peut et doit faire de lui-même* ». On pourrait ajouter que Lévi-Strauss (1974) envisage l'anthropologie en tant que science visant à une connaissance applicable à l'ensemble du développement humain. C'est ainsi en cohérence avec ces deux auteurs phares que Lévine et Develay (2003) plaident en faveur d'une anthropologie des savoirs scolaires, voulue spécifier le moyen de faire advenir de l'humanité en l'élève afin que celui-là puisse à son tour concourir à construire de l'humain.

pertinent d'intervention consciente et volontaire sur son propre mouvement[55] et peut par ailleurs alimenter un travail quant à l'activité technique… Le tableau 2 ci-dessous suggère en outre que certains travaux expérimentalistes, pouvant apparaître de prime abord bien éloignés du champ de l'EPS, autorisent une réflexion à la manière d'envisager une question fondatrice telle que celle considérée ici.

Tableau 2 – La question d'une influence en conscience sur le déroulement d'un squat vertical jump (SVJ)
Préambule
Il peut paraître ne guère exister de lien entre l'EPS et une littérature scientifique empruntant au formalisme de la biomécanique voire de la physique, centrée sur le cas d'un SVJ à intensité maximale, *a fortiori* réalisé mains sur les hanches. Par-delà les apparences, certains de ces écrits se révèlent pourtant en prise avec la question fondatrice des rapports entre corps, esprit et environnement, voire concourent à suggérer des possibles quant à la manière d'y confronter l'élève.
Les modalités de contrôle de la phase de poussée du SVJ en débat
Selon van Soest et Bobbert (1993) ou encore et notamment Bobbert et al. (2008), la durée de la phase de poussée d'un saut tel que le SVJ (voir Figure 1 ci-après) est inférieure à 300 ms. Aussi soulignent-ils, compte tenu notamment des latences des boucles de feedback, que ce type de mouvements doit être largement préprogrammé. Ce qui leur apparaît néanmoins à questionner, le système physique correspondant au sauteur s'apparentant à un pendule inversé, lequel tend à répercuter dans la durée les perturbations qu'il connaît. Questionnement que réfracte une diversité de points de vue quant au contrôle du mouvement, dont Bobbert et al. (2008) offrent un aperçu. Il en va pour certains auteurs de modèles internes s'appuyant sur les capacités computationnelles du cerveau (modèles de cinématique inverse du système musculo-squelettique, modèles de dynamique inverse et patterns de stimulation musculaire, e.g. Kawato et al., 1987). À l'autre bout du spectre, Bobbert et al. (2008, p. 1428) placent la conception du « *control that works* » (van Soest et al., 1994) selon laquelle les sujets utilisent un seul pattern de stimulation valant pour une gamme de positions initiales du sauteur : la régulation du mouvement durant la poussée tiendrait aux propriétés du système musculo-squelettique, via des feedback musculaires instantanés en prise avec les relations entre force et longueur ainsi qu'entre force et vitesse. Bobbert et al. (2008) en viennent aussi à envisager un mode de contrôle plus fin que ne l'est le *control that works*, sans pour autant postuler l'existence de modèles internes pilotant le geste en sa globalité : une capacité à interpoler les stimulations musculaires à partir d'une position initiale de référence leur apparaît suffire à l'affaire. Ces travaux visent ainsi à la résolution d'un problème qui met en tension des options purement computationnelles et des options qui tentent d'intégrer les propriétés d'auto-organisation du système neuro-musculo-squelettique. Ils renvoient ainsi en droite ligne aux débats pointés précédemment quant aux STC.
La question de la position initiale
Les travaux ainsi considérés, s'ils ne vont pas sans lien avec un questionnement fondateur au sens anthropologique, ne visent pas au premier chef à spécifier ce sur quoi le sauteur pourrait influer en conscience pour favoriser un saut efficace. Les processus envisagés sont de fait censés s'opérer pour l'essentiel à un niveau infra-conscient. Bobbert et al. (2008), cependant, s'intéressent au contrôle moteur via un design expérimental centré sur l'adaptation à une diversité d'angulations segmentaires dans la posture initiale, variant autour d'une posture que le sauteur estime subjectivement préférentielle. Or, ces auteurs observent des variations de la hauteur de saut selon la posture initiale adoptée, ce qui suggère une possibilité d'attention consciente influant sur la poussée subséquente.

[55] Ainsi, dans le cas d'un enseignement relatif au triple-saut, on peut, lorsque l'apprenant parvient à produire des enchaînements de bonds approximativement équidistants, tenter de l'aider à « alléger » son appui lors de la reprise d'appui. Cela appelle à avoir, à cet instant, le genou de la « jambe libre » qui pointe en avant de la verticale passant par l'appui (e.g. Piasenta, 1987). Chose que l'on peut tenter de réaliser, dans une logique cognitiviste, en programmant en conscience un lancer du genou de la jambe libre vers le sautoir dès la reprise d'appui. Ce qui perturbe du reste souvent la réalisation du saut, au moins dans les premières tentatives. Il est également envisageable de se reporter au propos dynamiciste de Bernstein (1996) quant aux niveaux d'organisation de la motricité, lequel suggère qu'une centration consciente de l'attention sur les effecteurs suscite une interférence avec des processus de contrôle autorisant des ajustements en un fort bref délai et dont le bon déroulement s'opère hors du champ de la conscience. Ainsi, cet auteur en vient-il à suggérer qu'une personne apprenant à faire de la bicyclette gagne à centrer son attention sur la route qui se présente à elle et sur la trajectoire correspondante plutôt que sur le rôle effecteur de ses bras ou de ses jambes. Van Emmerik et al. (2004) soulignent de fait que Bernstein envisage quatre niveaux d'organisation de la motricité, relatifs aux muscles posturaux, aux synergies musculo-articulaires, à l'espace et au temps, ces deux niveaux-là étant en prise avec certains aspects de la perception et de l'intentionnalité. Dans le cas du triple-saut, il est ainsi envisageable de demander au sauteur d'œuvrer en ayant l'intention d'accélérer sur chaque pose d'appui des trois bonds du saut, escomptant que cela favorisera « par contrecoup » (sans interférence du champ de la conscience) un lancer précoce de la « jambe libre » favorisant une reprise d'appui efficiente. De telles tentatives autorisent à constater et comparer des effets, à s'enquérir de ce qu'il en est chez autrui… bref, à repérer au fil de ses expériences en APSA une question sans cesse renouvelée et dont la résolution peut animer perpétuellement. On pourrait encore imaginer des prolongements interdisciplinaires permettant de se mettre à distance de telles expériences pour penser la question fondatrice correspondante, notamment en lien avec la philosophie…

Au regard de la physique

Le formalisme de la physique aide à comprendre l'influence de la position initiale sur la performance du saut.

Repères pour envisager le SVJ

Le SVJ considéré ici s'opère à partir d'une position initiale en demi-squat (angle articulaire du genou ~ 90°), avec mains sur les hanches durant la totalité du saut, lequel s'initialise sans contremouvement. La hauteur de saut (h) est mesurée en tant que différence entre les coordonnées verticales du centre de masse du sauteur (CM) à l'instant de l'envol et au sommet l'envol (respectivement z_1 et z_2) : $h = z_2 - z_1$.

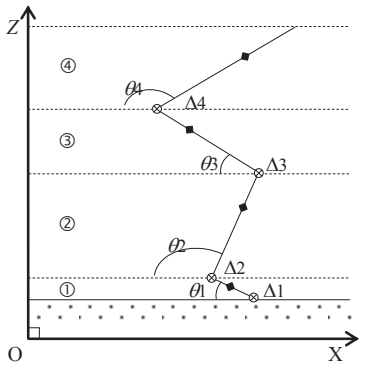
Compte tenu des symétries existantes dans le système que constitue le sauteur, une modélisation (Figure 1) est opérée en 4 segments : pieds (①), jambes (②), cuisses (③), et HAT, tête-bras-tronc (④). Les CM des segments (CM_i, notés ◆) sont positionnés dans un plan vertical défini par un système d'axes (OX, OZ) lié au sol. Le CM du système se trouve dans ce plan. Les axes de rotation Δi (articulations, ⊗) sont orthogonaux à (OX, OZ). On spécifie sur cette base les angles segmentaires θi (indiqués par les arcs de cercle).

Il convient de rappeler que par définition la quantité de mouvement d'un point de masse m et ayant une vitesse $\vec{v}$ est : $\vec{p} = m.\vec{v}$. Pour le système sauteur, $\overrightarrow{p_{CM}} = \sum \overrightarrow{p_{CMi}}$.

On a ainsi, à l'instant d'envol :

$$h = \left(\frac{p_{CMz}}{m}\right)^2 \left(\frac{1}{2g}\right)$$

Figure 1 – Modélisation du sauteur



Position initiale et performance

L'équation ci-dessus indique que h est déterminée, pour un sauteur donné, par la composante verticale de la vitesse du CM (V_{CMZ}) à l'instant d'envol. Durant la phase de poussée le CM se déplace. Si ce déplacement s'opère avec une accélération verticale positive et constante ou croissante, la composante verticale de la vitesse du CM à l'instant d'envol est alors fonction croissante de la durée de la poussée. Compte tenu de la définition du CM, et en posant que m_i est la masse d'un segment i, on a :

$$m\, Z_{CM} = m_1\, Z_{CM1} + m_2\, Z_{CM2} + m_3\, Z_{CM3} + m_4\, Z_{CM4},$$

$$m\, dZ_{CM} = m_1\, dZ_{CM1} + m_2\, dZ_{CM2} + m_3\, dZ_{CM3} + m_4\, dZ_{CM4}.$$

Au regard du modèle adopté, on a (k_1, k_2, k_3 et k_4 étant des constantes) :

$$m\, dZ_{CM} = k_1\, d(\sin\theta 1) + k_2\, d(\sin\theta 2) + k_3\, d(\sin\theta 3) + k_4\, d(\sin\theta 4).$$

Compte tenu des valeurs angulaires, la posture initiale du sauteur est ici déterminante puisque de petites différences quant aux valeurs angulaires renvoient à de grandes différences quant aux sinus correspondants, ce qui n'est notamment pas le cas à l'instant d'envol. Si le cas de figure ici envisagé est fondamentalement théorique, il suggère une influence de la position initiale sur le déroulement du saut ultérieur et l'on saisit intuitivement que cette position peut procéder pour partie de l'attention consciente qui lui est portée. De fait, Bobbert et al. (2008) recourent notamment à des repères visuels, via un miroir en regard duquel les yeux doivent se placer, pour aider le sujet à se positionner selon la condition expérimentale ciblée. Et leurs résultats indiquent que la meilleure performance d'un sauteur n'est pas systématiquement obtenue à partir de la position initiale qu'il préfère.

On voit ainsi se dessiner les contours d'une recherche des éléments sur lesquels on peut agir en conscience sur un geste explosif, bref et intense, de nature à stimuler la réflexion au regard de l'anthropologie des savoirs telle qu'elle a été envisagée en amont.

Ainsi, les travaux scientifiques intéressant le contrôle ou les apprentissages moteurs, sous l'angle des débats théoriques de fond comme au regard des travaux expérimentaux consacrés à un thème particulier, sont-ils de nature à susciter une réflexion fructueuse à une question fondatrice. Encore ce qui a été envisagé ici à titre d'exemple quant au SVJ pourrait-il être complété par un examen de travaux en prise avec les neurosciences (e.g. Rabahi et al., 2012)[56]. En définitive, les travaux de recherche quant

[56] Un ensemble de travaux concourt ainsi à montrer que la production langagière, le calcul mental et la réalisation de mouvements effectifs impliquent les mêmes aires cérébrales ou des aires cérébrales en étroite relation. Rabahi et al. (2012) ont rendu compte d'un travail à ce sujet qui intéresse le SVJ. Ce travail met en évidence, chez des adultes de sexe masculin novices en SVJ, une influence, sur la hauteur de saut (h), de la prononciation, audible ou intériorisée, du mot « saute » (à la différence de celle des mots « pince », « lèche » et « tiao », signifiant saute en chinois, langue inconnue des sujets expérimentaux) et de la soustraction mentale. Influence qui s'est avérée voisine de celle de l'imagerie kinesthésique du SVJ (consistant à ressentir le mouvement sans le réaliser), celle-là étant connue pour influer favorablement sur la performance subséquente du geste imagé. Ces résultats suggèrent une pré-activation des aires motrices, dont le processus demeure à élucider. Et si on peut imaginer que la signification du mot prononcé joue en celui-là, cela ne saurait notamment expliquer l'effet constaté quant au calcul mental exact, dont on peut penser qu'il implique le langage (Dhaene et al., 1999). De tels résultats, s'ils appellent à une clarification des relations ainsi pointées, apparaissent d'emblée susceptibles de révéler des possibilités inédites d'influer en conscience sur la production d'un mouvement. Et l'éventail des possibles peut s'avérer relativement ouvert, comme le suggèrent par exemple des résultats préliminaires de Riffai-Sarraj et al. (2012) sur l'observation visuelle…

au contrôle ou aux apprentissages moteurs suggèrent une diversité de possibles pour l'intervention en APSA susceptibles, à hauteur de leurs champs de pertinence respectifs, de concourir à une perspective transpositive intégrative fonction de l'épistémologie des contenus de l'EPS. Plus fondamentalement, les avancées de la recherche en ce champ-ci apparaissent de nature à contribuer de manière significative à la clarification de questions fondatrices, au plan d'une anthropologie des savoirs scolaires, voire à offrir des pistes renouvelées quant à la manière de poser ces questions. Ce qui contribue, peut-être, à esquisser les contours d'un enseignement de l'EPS visant tout à la fois à : 1. apporter des réponses à des problèmes intéressant la pratique d'une APSA, 2. donner accès au principe d'intelligibilité des contenus correspondants, et 3. susciter la transmission de questions fondatrices de l'humain.

Idée qui en appelle certes à des prolongements ainsi qu'à des approfondissements dépassant le cadre de cet écrit. Cette idée serait en premier lieu à réexaminer à l'aune de ce que Lévine et Develay (2003, p. 123) entendent par « *pédagogie anthropologique* ». Celle-ci correspond en tout état de cause à un positionnement en regard de deux ensembles de conceptions quant aux rapports entre Science et Éducation. Si d'aucuns estiment venue l'heure d'*une* science de l'éducation (e.g. Anderson, Reder et Simon, 1998)[57], d'autres, défendent un abord résolument pluridisciplinaire des apprentissages scolaires, dans le champ *des* sciences de l'éducation francophones ou en proximité avec ce domaine (e.g. Develay, 1992 ; Perrenoud, 2002). À l'évidence, les idées ici émises, quant à la recherche relative au contrôle ou aux apprentissages moteurs pour ce qui est de l'EPS, signifient une proximité avec cette seconde option. Ce qui renvoie donc aux éclairages classiquement et dument convoqués en sciences de l'éducation. Ce qui suggère cependant aussi un espace de réflexion, qui a également à voir avec le champ des STAPS, en lequel on porterait une attention accrue à des référents scientifiques ou à la mise en place de travaux à caractère expérimentaliste en prise avec des questions fondatrices de l'humain fortement véhiculées par l'EPS[58]. Encore le point de vue ici esquissé gagnerait-il à un réexamen en prise avec des travaux en matière de didactique(s) relatifs aux APSA en EPS, explicitement opérés sous un angle anthropologique ainsi qu'épistémologique (e.g. Léziart, 2010).

[57] Anderson, Reder et Simon (1998, p. 254), s'exprimant en un écrit relatif au constructivisme radical, qu'ils assimilent à une philosophie de l'éducation indiquent : « *The time has come to abandon philosophies of education and turn to a science of education.* » Ces auteurs opèrent un parallèle avec le cas de la médecine, soulignant les progrès thérapeutiques suscités par le développement de la physiologie et de la biochimie, notamment via un corps de savoir développé quant aux processus pathologiques. Aux yeux de ceux-ci (1998, p. 255), les pratiques éducatives sont de nature à bénéficier tout autant des avancées de la psychologie cognitive : « *A theory is needed of the way in which knowledge is represented internally, and the ways in which such internal representations are acquired. Cognitive psychology has now progressed a long way toward such a theory, and much is already known that can be applied, and is beginning to be applied, to improve learning process.* » En l'absence d'un tel éclairage, tout abord de l'apprentissage présente fatalement, selon eux, une pertinence toute relative et perfectible… Encore une telle conception est-elle de nature à valoir par-delà les oppositions de vues quant aux théories de référence (e.g. Anderson et al., 2000) : si Anderson, Reder et Simon, d'une part, Greeno, d'autre part, ont des points de vue relativement distinctifs quant aux pertinences respectives des abords cognitivistes et situationnistes en matière d'apprentissage (e.g. Anderson, Reder, Simon, 1996 ; 1997 ; Greeno, 1997), ils s'accordent à mettre ici en avant un souci commun de concourir à une théorie unifiée, éclairant scientifiquement les pratiques et politiques éducatives.

[58] Il convient ainsi de pointer, avec Rosenbaum (2005), l'essor récent de travaux sur le contrôle moteur à l'interface de la psychologie et des neurosciences cognitives, susceptibles d'apporter des éclairages inédits de nature à alimenter la réflexion à une question fondatrice…

L'intérêt de ce point de vue vaudrait, *in fine*, à hauteur de ce qu'il participe à une théorisation quant à l'apprentissage scolaire renvoyant aux deux acceptions du terme de théorie que met en avant Develay (2006, p. 8) : « *Les théories de l'apprentissage sont au sens du grec* theoria*, des systèmes de concepts abstraits appliqués à un domaine* » quand « *La théorie, en empruntant cette fois-ci au grec* Theo-oros*,* […] *est une méditation sur la pratique pour en déceler les enjeux ultimes* ».

Références

- Adams, J.A. (1971). *A closed-loop theory of motor learning*. Journal of Motor Behavior, 3, 111-150.
- Adams, J. A. (1987). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. Psychological Bulletin, 101(1), 41-74.
- Adams J.A. (1992). Revue historique et critique de la recherche sur l'apprentissage, la rétention et le transfert des habiletés motrices, Dossiers EP.S, 13.
- Anderson, J. R., Greeno, J. G., Reder, L. M., Simon, H. A. (2000). Perspectives on learning, thinking, and activity. *Educational Researcher*, 29, 11-13.
- Anderson, J.R., Reder, L.M., Simon, H.A. (1996). Situated learning and education. *Educational Researcher*, *25*, 5-11.
- Anderson, J.R., Reder, L.M., Simon, H.A. (1997). Situative and cognitive perspectives: Form versus substance. *Educational Researcher*, *26*, 18-21.
- Anderson, J. R., Reder, L. M., Simon, H. (1998). Radical constructivism and cognitive psychology. In: D. Ravitch (ed.), *Brookings papers on education policy 1998*. Washington, DC: Brookings Institute Press, 227-278.
- Astolfi, J.P., Develay, M. (1989). La didactique des sciences. Paris: PUF.
- Babler, T.G., Dannemiller, J.-L. (1993). Role of image acceleration in judging landing location of free-falling projectiles. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 19, p. 15-31.
- Bardin, L. (1998). L'analyse de contenu. Paris : PUF, 9ème édition.
- Battig, W.F. (1966). *Facilitation and interference*. In: E.A. Bilodeau (ed.), Acquisition of skill. New York: Academic Press, 215-244.
- Bernstein, N.A. (1967). The co-ordination and regulation of movement. London : Pergamon.
- Bernstein, N.A. (1996). On dexterity and its development. In: M.L. Latash, M.T. Turvey, Dexterity and its development. Mahwah, NJ : Erlbaum, 3-44.
- Bobbert, M.F., Casius, L.J.R., Sijkpens, I.W.T., Jaspers, R.T. (2008). Humans adjust control to initial squat depth in vertical squat jumping. Journal of Applied Physiology, 105, 1428-1440.
- Bransford, J., Stevens, R., Schwartz, D., Meltzoff, A., Pea, R., Roschelle, J., Vye, N., Kuhl, P., Bell, P., Barron, B., Reeves, B., Sabelli, N. (2006). *Learning Theories and Education: Toward a decade of synergy*. In: P. Alexander, P.H. Winne (eds.), Handbook of educational psychology. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2nd edition, 209-243.

▪ Comité d'Études et d'Informations Pédagogiques de l'Éducation Physique et du Sport (1996). Recherche et pratique des APS. Dossiers EP.S, 28, Paris : éditions Revue EP.S, 58-106.

▪ Comité d'Études et d'Informations Pédagogiques de l'Éducation Physique et du Sport (1997). Rencontres chercheurs / Praticiens. Dossiers EP.S, 35, Paris : éditions Revue EP.S, 167-203.

▪ Cornus, S., Marsault, C. (2003). Repenser l'EPS à partir de l'approche écologique. Revue EP.S, 302, 13-15.

▪ Craig, C.M., Delay, D., Grealy, M.A., Lee, D.N. (2000). Guiding the swing in golf putting, Golfers control the pace of a putt by comparing sensory data with an internal guide. Nature, 405(18), 295-296.

▪ Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. Science, 284, 970–974.

▪ Delignières, D. (1998). Apprentissage moteur, Quelques idées neuves. Revue EP.S, 274, 61-66.

▪ Delignières, D. (2004). Et si l'on enseignait comme nos élèves apprennent ?. In : G. Carlier, Si l'on parlait du plaisir d'enseigner l'éducation physique. Montpellier : AFRAPS, 31-40.

▪ Delignières, D., Duret, P. (1995). Lexique thématique en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives. Paris : Vigot.

▪ Delignières, D., Garsault, C. (2001). Pertinence scientifique et légitimité idéologique : Le recours aux modèles psychologiques en éducation physique et sportive. In : C. Collinet, EPS et sciences. Paris : PUF, 25-42.

▪ Delignières, D., Nourrit, D. (1997). Neuere Entwicklungen und aktuelle Perspektiven der Forschung zum Motorischen Lernen in Frankreich. In: G. Treutlein, C. Pigeassou (eds.), Sportwissenschaft in Deutschland und Frankreich. Hamburg: Czwalina Verlag, 133-146.

▪ Develay, M. (1992). De l'apprentissage à l'enseignement. Paris : ESF éditeur.

▪ Develay, M. (1996). Donner du sens à l'école. Paris : ESF éditeur.

▪ Develay, M. (2000). Comment faire découvrir le sens des études à travers les compétences ? Actes du 20ème Colloque de l'AQPC, Montréal, Québec : AQPC.

▪ Develay, M. (2006). Préface. In : P. Fargier, EPS et apprentissage moteurs. Paris : Vigot, 8-9.

▪ Diedrich, F.J., Warren, W.H. (1995). Why change gaits? Dynamics of the walk run transition. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 21, 183–202.

▪ Durand, M. (1999). Pour une approche anthropologique en EPS. Revue EP.S, 277, 78-79.

▪ Durkheim, E. (1966). Éducation et sociologie. Paris : PUF.

▪ Eliasmith, C. (1996). The third contender: A critical examination of the dynamicist theory of cognition. Philosophical Psychology, 9, 4, 441-463.

▪ Famose, J.P. (1983). *Stratégies pédagogiques, tâches motrices et traitement de l'information*, in : J.P. Famose, J. Bertsch, E. Champion, M. Durand, Tâches motrices et stratégies pédagogiques en éducation physique et sportive. Dossiers EP.S, 1, 9-21.

▪ Famose, J.P. (1988). Aptitudes et acquisition des habiletés motrices. In : J.P. Famose, M. Durand, Aptitudes et performance motrice. Paris : éditions Revue EP.S, 83-100.

▪ Famose, J.P. (1990). Apprentissage moteur et difficulté de la tâche. Paris : INSEP.

▪ Fargier, P. (1997). Pour une éducation du corps par l'EPS. Paris : ESF éditeur.

▪ Fargier, P. (2002). Education athlétique et athlétisme éducatif, en EPS. In : T. Terret, P., Fargier, B., Rias, A., Roger, L'athlétisme et l'école, Histoire et épistémologie d'un sport éducatif. Paris : L'Harmattan, 109-163.

▪ Fargier, P. (2005). Les compétences en question. In : J.L. Ubaldi, Les compétences. Paris : éditions Revue EP.S, 27-44.

▪ Fargier, P. (2006). EPS et apprentissages moteurs. Paris : Vigot.

▪ Fargier, P., Terret, T. (1999). Élaboration et diffusion des connaissances relatives à l'enseignement de l'athlétisme et de la natation. Science & Motricité, 38-39, 25-32.

▪ Forquin, J.C. (1996). Ecole et culture, Le point de vue des sociologues britanniques. 2ème édition. Bruxelles : De Boeck Université.

▪ Geuss, M., Stefanucci, J., Creem-Regher, S. Thomson, W.B. (2010). Can I pass?: using affordances to measure perceived size in virtual environments. In: D. Guttierrez, J. Kearney, M. Banks, K. Mania (eds.), Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, APVG 2010, July 23-24, Los Angeles, CA. New York: ACM, 61-64.

▪ Gibson, J.J. (1950). The Perception of Visual World. Boston : Houghton Mifflin.

▪ Gibson, J.J. (1958). *Visually controlled locomotion and visual orientation in animals*. British Journal of Psychology, 49, 182-194.

▪ Gibson, J.J. (1966). The Senses Considered as Perceptuel System. Bosto: Houghton Mifflin.

▪ Gibson, J.J. (1979). The ecological approach to visual perception. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc..

▪ Gibson, J.J., Gibson, E.J. (1955a). Perceptual learning: Differenciation or enrichment?. Psychological Review, 62, 32-41.

▪ Gibson, J.J., Gibson, E.J. (1955b). What is learned in perceptual learning?. A reply to Professor Postman. Psychological Review, 62, 447-450.

▪ Goode, S., Magill, R.A. (1986). The contextual interference effects in learning three badminton serves. Research Quarterly for Exercise and Sport, 57, 308-314.

▪ Greeno, J.G. (1994). Gibson's affordances. Psychological Review, 101(2), 336-342.

▪ Greeno, J.G. (1997). On claims that answer the wrong questions. Educational Researcher, 26, 5-17.

▪ Haken, H. (1977). Synergetics, an introduction: non-equilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology. Berlin: Springer Verlag.

▪ Haken, H. (1983). Advanced synergetics. Berlin: Springer Verlag.

▪ Haken, H. Kelso, J.A.S., Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transition in human movements. Biological Cybernetics, 51, 347-356.

▪ Hartson, H.R. (2003). Cognitive, physical, sensory and functional affordances in interaction design. Behavioral Information Technology, 22, 315-338.

▪ Holmes, P. (1990). Poincaré, Celestial mechanics, Dynamical-systems theory, and "chaos". Physics Report, 193(3), 137-163.

▪ Kant, E. (1991). Anthropologie du point de vue pragmatique. Paris : Vrin.

▪ Kawato, M., Furukawa, K., Suzuki, R. (1987). A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. Biological Cybernetics, 57, 169-185.

▪ Kelso, J.A.S. (1981). On the oscillatory basis of movement. Bulletin of the Psychonomic Society, 18, 63.

▪ Kelso, J.A.S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 15, R1000-1004.

▪ Kilani, M. (1994). Introduction à l'anthropologie. Lausanne : Payot.

▪ Kugler, P.N., Turvey, M.T. (1987). Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.

▪ Kuhn, T.S. (1983). La structure des révolutions scientifiques. Paris : Flammarion.

▪ La Rue, J. (2004). L'approche cognitive du comportement moteur : le contrôle et l'apprentissage moteurs. In : J. La Rue, H. Ripoll (dir.), Manuel de psychologie du sport, 1. Les déterminants de la performance sportive. Paris : éditions Revue EP.S, 29-48.

▪ Laurent, M., Temprado, J.J. (1996). Apprentissage et contrôle du mouvement dans les APS, Quelle(s) théorie(s) pour quelle(s) pratique(s) ?. In : Comité d'Etudes et d'Informations Pédagogiques de l'Education Physique et du Sport, Recherche et pratiques des APS. Dossiers EP.S, 28, 17-37.

▪ Laurent, M. (1985) *Aspects cinématiques et dynamiques de la course d'élan en saut en longueur*. In : M. Laurent, P. Therme (dir.), Recherche en activités physiques et sportives 1. Centre de Recherche de l'UEREPS Aix-Marseille II, 235-246.

▪ Laurent, M. Temprado, J.J. (1996). Apprentissage et contrôle du mouvement dans les APS, Quelle(s) théorie(s) pour quelle(s) pratique(s) ?. In : Comité d'Études et d'Informations Pédagogiques de l'Éducation Physique et du Sport, Recherche et pratiques des APS, Dossiers EP.S, 28. Paris : éditions Revue EP.S, p. 67-77.

▪ Lee, D.N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time to collision. Perception, 5, 437-459.

▪ Lee, D.N., Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. Perception and Psychophysics, 15, 527-532.

▪ Lee, D.N., Lishman, J.-R., Thomson, J.A. (1982). Regulation of gait in long jumping. Journal of Experimental Psychology : Human, Perception and Performance, 8, 448-458.

▪ Lévine, J., Develay, M. (2003). Pour une anthropologie des savoirs scolaires, De la désappartenance à la réappartenance. Paris : ESF éditeur.

▪ Lévi-Strauss, C. (1974). Anthropologie structurale. Paris : Plon.

▪ Léziart, Y. (1996). Les rapports théorie / pratique dans les conceptions de l'éducation physique : permanence ou changement ? Étude de trois périodes significatives. Revue Française de Pédagogie, 116, 51-64.

▪ Léziart, Y. (2010). Anthropologie culturelle des APSA et épistémologie des savoirs à transmettre en EPS. In : M. Musard., M., Loquet., G, Carlier (Eds.), Sciences de l'intervention en EPS et en sport, Résultats de recherche et fondements théoriques. Paris : éditions Revue EP.S, 179-200.

▪ Mercier, A., Schubauer-Leoni, M.L., Sensevy, G. (2002). Vers une didactique comparée. Revue Française de Pédagogie, 141, 5-16.

▪ Michaels, C., Beek, P. (1995). The state of ecological psychology. Ecological Psychology, 7, 259-278.

▪ Montagne, G., Laurent, M. (2004). *L'approche écologique de la perception et de l'action*. In : J. La Rue, H. Ripoll, Manuel de psychologie du sport, Tome 1, Les déterminants de la performance sportive. Paris : éditions Revue EP.S, 49-64.

▪ Newell, K.M. (2003). Schema Theory (1975): Retrospectives and Prospectives. Research Quarterly for Exercise and Sport, 74(4), 383-388.

▪ Paillard, J. (1994). L'intégration sensori-motrice et idéo-motrice. In : M. Richelle, J. Requin, M. Robert (dir.), Traité de psychologie expérimentale. Paris : PUF, 925-961.

▪ Perrenoud, P. (2002). D'une métaphore à l'autre : transférer ou mobiliser ses connaissances ?. In : J. Dolz, E. Ollagnier (dir.) : L'énigme de la compétence en éducation. Bruxelles : De Boeck Université, 45-60.

▪ Piasenta, J. (1987). L'éducation athlétique. Paris : INSEP.

▪ Prost, A. (1992), Education, société et politiques, Une histoire de l'enseignement en France de 1945 à nos jours, Paris : Seuil.

▪ Quéré, L. (1997). *La situation toujours négligée ?*. Réseaux, 85, Paris : Hermès Science publications, 163-192.

▪ Rabahi, T., Fargier, P., Riffai-Sarraj, A., Clouzeau, C., Massarelli, R. (2012). Motor performance may be improved by kinesthetic imagery, specific action verb production, and mental calculation. NeuroReport, 23(2), 78-81.

▪ Reed, E. (1988). James J. Gibson and the psychology of perception. London, UK: Yale University Press.

▪ Rey, B. (1996). Les compétences transversales en question. Paris : ESF éditeur.

▪ Rey, B. (1999). La psychologie et les questions du pédagogue. Revue Française de Pédagogie, 126, 133-141.

▪ Rifai-Sarraj, A., Khaled, F., Rabahi, T., Fargier, P., Massarelli, R. (2012). La visualisation d'un saut vertical améliore la performance d'un geste similaire chez un observateur. Kinésithérapie, 125, 47-51.

▪ Ripoll, H. (1996). Les recherches actuelles en neurosciences du sport : Le niveau cognitif, Essai de formalisation des rapports théorie / pratique. In : Comité d'Etudes et d'Informations Pédagogiques de l'Education Physique et du Sport, Recherche et pratiques des APS. Dossiers EP.S, 28, 58-66.

▪ Ripoll, H. (1997). La prise de décision en sport : des modèles théoriques à leur application en EPS. In : Comité d'Etudes et d'Informations Pédagogiques de l'Education Physique et du Sport, Recherche et pratiques des APS, Rencontres Chercheurs / Praticiens. Dossiers EP.S, 35, 169-177.

▪ Ripoll, H. (2004). L'approche cognitive du traitement de l'information. In : J. La Rue H. Ripoll (dir.), Manuel de psychologie du sport, Tome 1, Les déterminants de la performance sportive. Paris : éditions Revue EP.S, 15-27.

▪ Ripoll, H., Ramantsoa, M.M., Pavis, B. (1995). Évolution des modèles théoriques dans l'analyse des habiletés motrices complexes. In : H. Ripoll, J. Bilard, M. Durand, J. Keller, M. Levêque, P. Therme, Psychologie du sport, Questions actuelles. Paris : Éditions Revue EP.S, 209-221.

▪ Rosenbaum, D.A. (2005). The Cinderella of psychology, The neglect of motor control in the science of mental life and behavior. American psychologist, 60(4), 308-317.

▪ Savelsbergh, G.J.P., Whiting, H.T.A., Bootsma, R.J. (1991). "Grasping" tau. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 31, 1655-1663.

▪ Schmidt, R.A. (1975). *A schema theory of discrete motor skill learning*. Psychological Review, 82, 225-260.

▪ Schmidt, R.A. (1980). Past and Future Issues in Motor Programming. Research Quarterly for Exercise and Sport, 51, 1, 122-140

▪ Schmidt, R.A. (1983). This Week's Citation Classic. Current Contents, ISI, 25, 20.

▪ Schmidt, R.A. (1988). Motor control and learning : A behavioral emphasis. Champaign, IL: Human Kinetics, 2nd edition.

▪ Schmidt, R.A. (1991). *Motor Learning and performance, from principles to practice.* Champaign, IL: Human Kinetics Books.

▪ Schmidt, R.A. (1993). Apprentissage moteur et performance. Paris : Vigot.

▪ Schmidt, R.A. (2003). Motor Schema Theory After 27 Years: Reflections and Implications for a New Theory. Research Quarterly for Exercise and Sport, 74(4), 366-375.

▪ Schubauer-Leoni, M.L., Leutnegger, F. (2005). Une relecture des phénomènes transpositifs à la lumière de la didactique comparée. Revue Suisse des Sciences de l'Éducation, 27(3), 4à7-429.

▪ Scott, M.A. (2002). Visual regulation of the long jump approach phase. In: K. Davids, G.J.P. Savelsbergh, S.J. Bennett, J. van Der Kamp (eds.), Interceptive actions in sport: information and movement. London: Routledge, 326-334.

▪ Sensevy, G. (2009). Didactique et sciences de l'éducation : une reconfiguration ? In : A. Vergnioux (dir.), Quarante ans des sciences de l'éducation, L'âge de la maturité ? Questions vives. Caen : PUC, 49-57.

▪ Shapiro, D.C., Zernicke, R.F., Gregor, R.J., Diestel, J.D. (1981). Evidence for generalized motor programs using gaitpattern analysis. Journal of Motor Behavior, 13, 33-47.

▪ Shea, J.B., Morgan, R.L. (1979). Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 5, 179-187.

▪ Sherwood, D.E., Lee, T.D. (2003). Schema Theory: Critical Review and Implications for the Role of Cognition in a New Theory of Motor Learning. Research Quarterly for Exercise and Sport, 74(4), 376-382.

▪ Tardif, J. (1997). Pour un enseignement stratégique, L'apport de la psychologie cognitive. Montréal : Les éditions Logiques.

▪ Temprado, J.J. (1995). La variabilité dans le contrôle des habiletés motrice : fonction des apprentissages ?. In : J. Bertsch, C. Le Scanff (dir.), Apprentissages moteurs et conditions d'apprentissages. Paris : PUF, 67-85.

▪ Temprado, J.J., Laurent, M. (1995). *Approches cognitive et écologique de l'apprentissage des habiletés motrices en sport*. In : H. Ripoll, J. Bilard, M. Durand, J. Keller, M. Levêque, P. Therme, Psychologie du sport, Questions actuelles. Paris : Éditions Revue EP.S, 223-236.

▪ Temprado, J.J., Montagne, G. (2001). *Les coordinations perceptivo-motrices, Introduction aux approches écologique et dynamique du couplage perception action*, Paris : Armand Colin.

▪ Terret, T. (1999). Éducation physique et sports de base. In : J. Gleyse, L'éducation physique au XXe siècle, Aproches historique et culturelle. Paris : Vigot, 127-138.

▪ Theureau, J. (2005). Les méthodes de construction de données du programme de recherche sur les cours d'action et leur articulation collective, et … la didactique des activités physiques & sportives ?. Impulsion, 4, 281-301.

▪ Turvey, M.T., Shaw, R.E., Mace, W. (1978).Issues in a theory of action: Degrees of freedom, coordinative structures and coalitions. In: J. Requin (ed.), Attention and Performance VII. Hillsdale, N.J.: Erlbaum, 557-595.

▪ Valette, E. (2001). La perspective à l'ordre du jour, Fonctionnements symboliques et esthétiques de la perspectiva artificialis, Paris : L'Harmattan.

▪ Van Emmerik, R.E.A., Rosenstein, M.T., McDermott, W.J., Hamill, J. (2004). Nonlinear Dynamical Approaches to Human Movement. Journal of Applied Biomechanics, 20, 396-420.

▪ Van Gelder, T. (1995). What might cognition be if not computation?. Journal of Philosophy, 91, 345-381.

▪ Van Rossum, J.H.A. (1987). Motor development and practice : The variability of practice hypothesis in perspective. Amsterdam : Free University Press.

▪ Van Rossum, J.H.A. (1990). Schmidt's schema theory: The empirical base of the variability of practice hypothesis. Human Movement Science, 9, 387-435.

▪ Van Soest, A.J., Bobbert, M.F. (1993). The contribution of muscle properties in the control of explosive movements. Biological Cybernetics, 69, 195-204.

▪ Van Soest, A.J., Bobbert, M.F., Van Ingen Schenau, G.J. (1994). A control strategy for the execution of explosive movements from varying starting positions. Journal of Neurophysiology, 71, 1390-1402.

▪ Varela, F. (1979). Principles of biological autonomy. New York, North Holland: Elsevier.

▪ Varela, F. (1989). Connaître, Les sciences cognitives, tendances et perspectives. Paris : Seuil.

▪ Varela, F., Thomson, E., Rosch, E. (1993). L'inscription corporelle de l'esprit. Paris: Seuil.

▪ Warren, W.H. (1984). *Perceiving affordances: Visual Guidance of stair climbing*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 10, 683-703.

▪ Warren, W.H., (1988). Action mode and laws of control for the visual guidance of action. In : O.G. Meijer, K. Roth, Complex movement behavior : The motor-action controversy. Amsterdam: North-Holland, 339-380.

▪ Warren, W. H., Kay, B. A., Duchon, A. P, Zosh, W., Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. Nature Neuroscience, 4, 213-216.

▪ Warren, W.H., Young, D.S., Lee, D.N. (1986). Visual control of step length during running aver irregular terrain. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 12, 259-266.

▪ Wulf, G. (2007). Attention and motor skill learning. Champaign, IL: Human Kinetics.

▪ Wulf, G., Lee, T.D., Schmidt, R.A. (1994). Reducing Knowledge of Results About Relative Versus Absolute Timing: Differential Effects on Learning. Journal of Motor Behavior, 26(4), 362-369.

▪ Wulf, G., Prinz, W. (2001). Directing attention to movement effects enhances learning: A review. Psychonomic Bulletin & Review, 8, 4, 648-660.

▪ Wulf, G., Schmidt, R.A., Deubel, H. (1993). Reduced feedback frequency enhances generalized motor program learning but not parametrization learning. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 19, 1134-1150.

▪ Wulf, G., Shea, C.H. (2002). Principles derived from the study of simples skills do not generalize to complex skill learning. Psychonomic Bulletin & Review, 9(2), 185-211.

PUBLICATION 8

R. Massarelli, **T. Rabahi**, B. Rupied, A. Rifai-Sarraj & P. Fargier. *Concepts, percepts, apprentissage et amélioration de la performance motrice*, In : *Développement professionnel des métiers de l'activité physique et sportive,* Ed. H.Hariti. Alger : Laboratoire SPAPSA, Université Alger 3 (2012).

CONCEPTS, PERCEPTS, APPRENTISSAGE ET AMELIORATION DE LA PERFORMANCE MOTRICE

Raphael MASSARELLI*, Tahar RABAHI*, Benjamin RUPIED*,

Ahmad RIFAI SARRAJ et Patrick FARGIER***

Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport (CRIS – EA 647), 69622 Villeurbanne cedex, France

** Département de Physiothérapie, Faculté de Santé Publique-I, Campus Rafic Hariri, Hadath cedex, Beyrouth, Liban*

Tu ne peux pas tout enseigner à un homme ;
tu peux seulement l'aider à le trouver en lui.

Galileo Galilei
(Dialogo tra i di due mondi)

Il est bien connu, dans les milieux sportifs, le rôle que relève le mental dans la performance motrice et, depuis les travaux de Sackett (1935) on connait le rôle particulier de l'imagerie mentale dans l'amélioration de l'exécution de mouvements. Dans ce cadre, toutefois, aujourd'hui on fait des distinctions dans divers types d'imagerie. Par exemple avec imagerie kinesthésique (IK) on entend parler de la sensation haptique que peut provoquer la simulation d'un mouvement sans que pour cela il soit exécuté et avec imagerie visuelle la vision mentale d'une image en mouvement ou pas.

A partir des travaux de Sackett, il s'est développé toute une littérature sur le sujet de l'imagerie mental avec, souvent, le défaut de ne pas préciser correctement les termes de son sens. Or le cerveau est un organe dont la complexité continue à surprendre les neuroscientifiques car *a minima* deux choses le distinguent des autres, d'une part l'intrication complexe de ses circuits, de l'autre la compréhension qu'il s'agit d'un système dynamique non linéaire sensibles aux conditions initiales. En d'autres termes, le cerveau (et donc le mental, la conscience[1]) change à tout instant pour s'adapter aux conditions changeantes de

[1] La référence à la conscience concerne, ici et dans la suite du texte, à ce qu'en langue anglaise on appelle *consciousness*, i.e. la conscience psycho-physiologique en distinction de la conscience morale. L'inexistence d'un tel mot dans la langue française oblige à cette précision.

notre monde, à celles d'un espace/temps continuellement changeant. A cela s'ajoute le fait que le mental, étant une caractéristique du cerveau, il fait partie naturellement d'un corps et que donc il n'y a pas de différence entre corps et mental car les deux appartiennent à la même entité[2] (Edelman et Tononi, 1999 ; Dehaene, 2001 ; Baars, 2002 ; Chalmers, 2004 ; Cleeremans, 2005 ; Libet, 2006). Certains misent même sur la possibilité que la conscience humaine ne soit inutile en absence de l'environnement (du monde qui nous entoure) et justifient ainsi l'existence d'une conscience sociétale et même planétaire (Varela et al, 1993 ; Clark et Chambers, 1999 ; Clark, 2008).

Ces quelques mots illustrent les avancées expérimentales, les hypothèses, les théories qui ont été avancées neuroscientifiques au cours des dernières vingt années et qui peut être sont l'annonce d'un nécessaire changement de paradigme. Il faut ainsi affronter l'étude du mental comme celui d'un tout avec le corps, une entité dont les parties sont en dialogue continuel entre elles, et voir comment l'influence de l'entité corps/mental peut agir dans la transmission de la connaissance.

La présente revue sera organisée selon trois parties. Dans la première on essayera de montrer comment la parole (les verbes d'action) et autres stimuli cognitifs peuvent améliorer la performance motrice d'individus naïfs ; dans la seconde nous parlerons d'un état particulier du mental que certains sportifs de Haut Niveau, très entrainées, appellent *la zone* (Shainberg, 1989 ; voir § 2 pour d'autres appellations) et, enfin, dans la troisième nous verrons comment ces études peuvent s'articuler autour d'une théorie corps/mental qui peut impliquer l'apprentissage.

1. L'effet de stimuli cognitifs sur la performance motrice

Des nombreuses recherches font état, chez l'homme, de l'effet surprenant de certains verbes d'action. Plus précisément il a été mis en évidence que la prononciation ou l'écoute de verbes d'action peut activer des aires cérébrales qui ne sont pas en relation directes avec la parole ou le langage, mais plutôt situées en pleine aire motrice primaire. Ainsi, dans un article désormais classique, le groupe de Pulwermüller à Cambridge (Hauk et al 2004) a démontré que les mots *kick* et *pick* activaient les régions de l'aire M1 correspondantes, respectivement,

[2] Il est bien claire que nous parlons ici de mental et non pas d'esprit. Le premier fait partie de la psycho-physiologie de chaque individu, le second est domaine de la Foi.

à la jambe et à la main. Le mot *lick*, par contre, semblait activer la partie ventro-postérieur de l'aire pré-motrice. Cette étude et d'autres encore (Pulvermuller et al, 2000 ; Oliveri et al, 2004 ; Shytrov et al, 2004 ; Tettamanti et , 2005 ; Buccino et al, 2005 ; Aziz-Zadeh, 2006 ; Sato et al, 2008 ; Papeo et al, 2009 ; Labruna et al, 2011) semblaient suggérer que les verbes d'action avaient la capacité d'activer fonctionnellement les aires motrices correspondantes à l'action qu'ils décrivaient. Mais, comme cela arrive souvent en Biologie, des interprétations différentes se sont fait entendre (Bedny et al 2008 ; Bedny et Caramazza, 2011).

Dans notre laboratoire, nous avons montré (Rabahi et al, 2012) que la prononciation, l'énonciation, la lecture, la visualisation ou l'écoute d'un verbe d'action (*saute*) peut améliorer la hauteur d'un mouvement très complexe, un *squat vertical jump* (SVJ). A première vue cela semblait donner un effet spécifique car un verbe insignifiant pour les sujets (*Tiáo*, « saute » en chinois) n'avait pas d'effet sur la performance motrice. Toutefois, nous nous sommes vite rendu compte que d'autres stimuli pouvaient obtenir le même effet, par exemple l'IK. Or cette imagerie n'a rien à voir avec le système de la parole se limitant exclusivement à un effort mental du sujet qui essaye de *simuler,* en ressentant, un acte moteur qu'il n'exécutera pas. L'amélioration de la performance était du même ordre de grandeur de celle observée avec le mot *saute* (voir Tableau 1). A cela s'ajoute un effet inattendu, celui provoqué par une soustraction mentale (SM ; un nombre à deux chiffres soustrait d'un nombre à trois chiffre). Or il est bien connu par des études en IRMf que l'IK (Miller et al, 2010) et la SM activent, entre autre, le cortex primaire moteur M1 (Dehaene et al, 1999) et la conclusion logique semblerait alors de déduire que verbes d'action spécifiques, IK et SM, tous pour des raisons différentes (et inconnues), en activant le M1 favorisaient l'amélioration de la performance motrice.

Cette déduction, toutefois, fut contredite lorsque des verbes d'action autres que *saute* furent utilisés. Ainsi *pince*, *lèche* et *bouge* ou un verbe non en relation avec l'action (*rêve*) semblaient montrer des améliorations, statistiquement non significatives en général (Tableau 1). Des verbes chargés émotionnellement toutefois, *gagne* et *perds*, augmentèrent la hauteur des sauts à un niveau semblable de *saute*. Cela était compréhensible pour *gagne*, mais pourquoi *perds* avait le même effet ? De plus des résultats sur l'IV qui mesuraient l'effet de voir un ou deux sauteurs sur un écran et ensuite de sauter soi-même indiquaient des améliorations dans la hauteur du SVJ très importantes (Rifai et al, 2012).

Il semblait donc que la spécificité des verbes d'action n'était pas nécessaire dans l'amélioration de la performance. On pouvait ainsi avancer l'hypothèse que les sujets réalisaient, plus ou moins consciemment, que les stimuli auxquels ils étaient soumis devaient avoir un effet sur le SVJ et que leur *intention*, modulée par l'émotivité, allait alors dans le sens qu'ils pensaient être celui voulu par les expérimentateurs[3]. On pouvait aussi penser que, l'action étant un SVJ qu'ils exécutaient au départ, les sujets réalisaient conceptuellement cette action et amélioraient la performance à la suite d'une *attention* accrue, indistinctement du stimulus utilisé.

Nous avions ainsi des concepts, *intention* et *attention,* modulés par l'*émotivité,* qui se réalisaient par le biais d'un raisonnement conscient. Deux articles récents semblent pencher dans ce sens. Dans l'un, les auteurs (Moseley et al, 2012) montrent que les émotions activent les aires corticales motrices, dans l'autre (Bedny et al, 2008) que les verbes d'action reflètent des concepts moteurs préexistants et ne semblent pas stimuler eux même spécifiquement ces aires motrices.

La complexité déjà évoquée de l'organe (le cerveau) et de l'entité corps/mental conduit à la conclusion, certes temporaire, de multiples facettes employées par l'organisme afin d'améliorer une performance, qui, ne l'oublions pas, il y a à peine quelque siècle, voulait signifier la différence entre la vie et la mort.

2. L'effet de la *zone* sur la performance motrice

"It was a type of euphoria; I felt I could run all day without tiring, that I could dribble through any of their team or all of them, that I could almost pass through them physically. I felt I could not be hurt. It was a very strange feeling and one I had not felt before. Perhaps it was merely confidence, but I have felt confident many times without that strange feeling of invincibility." Ainsi Pelé décrit dans son autobiographie (Pelé & Fish 1978) un état que d'autres ont défini la *Zone* (Shainberg, 1989), l'*état de grâce* (Ripoll, 2008), le *Flow* (Csikszentmihalyi, 2008) ou, plus prosaïquement l'état de *ne pas penser*. Cette dernière définition était répétée à l'un des présents auteurs lorsque, à une époque bien lointaine, son maître de karaté lui assenait cette vérité. Des années après cela fut atteint et non seulement

[3] Il est utile de mentionner que les sujets, tous naïfs non spécialistes dans la performance des sauts verticaux, n'étaient pas informé en aucune façon du but de l'expérience à laquelle ils étaient soumis.

l'état décrit par Pelé correspondait à celui observé mais bien plus le même auteur remarquait une augmentation considérable de sa capacité de perception. L'ensemble de l'individu est transporté dans un état où seules existent les perceptions, sans émotions, sans la moindre pensée, sans la plus petite idée et, comme dit Pelé, on est *invincibles*.

Cet état mental n'est pas évidemment l'apanage des sportifs, car quiconque apprends un mouvement ou une série de mouvements (la conduite automobile, par exemple, ou la marche dans des terrains escarpée, etc) est censé pouvoir vivre ces instants. Certes, cela est plus souvent atteignable chez les sportifs et plus particulièrement chez les athlètes qui choisissent les combats face à un ou, en équipe, face à un ou plusieurs adversaires. Pour essayer de caractériser cet état nous avons analysé les dires de boxeurs de haut niveau par l'emploi d'un logiciel, PROSPERO (PROgramme de Sociologie Pragmatique, Expérimentale et Réflexive sur Ordinateur - ©Doxa ; un analyseur de langage largement utilisé ; Chateaureynaud, 2003) qui permet d'explorer, d'analyser et de comparer des corpus de textes numérisés. (Massarelli et al, 2012). Les résultats, reproduits en **Tableau 2**, indiquent que au cours de la période analysée, d'un mois avant le combat au son du gong, l'état émotif et psychologique du boxeur traverse divers niveau d'appréhension de plus en plus graves, jusqu'à frôler la névrose sévère. Dominent la peur de décevoir son entourage, l'obsession du poids et la disparition soudaine et inattendue de tout cela lorsque retentit le son du gong. Par après l'athlète entre dans la *zone,* dans l'état de *ne pas penser*, et plus rien ne compte. Aux dires toujours des huit boxeurs analysés, la peur de l'adversaire ou celle de la douleur n'entrent jamais dans l'ensemble des symptômes. « *On a tellement l'habitude de souffrir »* c'est la rengaine souvent entendue par tous les participants.

Qu'est-ce que cela veut dire en termes de relation entre corps et esprit ? Evidemment plus rien à voir avec les concepts que l'analyse des stimuli cognitifs, décrits dans le § 1, nous avait suggéré, car le principe même de l'état de *ne pas penser* est l'absence de pensées et donc de conscience. Récemment, nous avions décrit une théorie (Massarelli et al, 2012) que nous avons appelée de l'*idéaction*. Basée sur un certain nombre d'axiomes, la théorie indique que, dans la vie de tous les jours, il est possible de relier l'*action* (motrice) directement à l'idée, sans nécessairement passer par la pensée. Ces résultats indiquent que lors du début du combat et cela de manière soudaine, des mouvements appris pendant des longs entrainements[4] (ce que nous avons appelé l'*action* ; Massarelli et al, 2012) peuvent être accomplis en absence non

[4] Bien entendu cela est aussi le cas de la conduite automobile et de tout autre mouvement ou action motrices longuement apprise au cours de notre vie.

seulement de pensée, mais aussi d'émotions. Cela nous conduirait alors dans une situation où l'influence des percepts serait prépondérante. Une interprétation qui démontrerait encore une fois l'extrême complexité de la réponse mentale et qui affirmerait aussi la capacité plastique de la réponse de l'entité corps-mental à des situations qui requerraient des réactions le mieux adaptées aux situations vitales.

Donc une conclusion temporaire porterait à penser que concepts ET percepts peuvent avoir des effets importants sur l'action suivant les nécessités de réponse à l'environnement.

3. **Effet sur l'apprentissage**

La capacité d'apprentissage de l'individu est fonction de plusieurs facteurs dont celui de la transmission[5] d'un savoir de maître à élève, ce qui évidemment revêt une importance capitale. La difficulté réside dans la manière dont la transmission se fait et, en premier lieu, de la manière dont le maitre voit l'élève. Il est normal dans une école française de méthode cartésienne de distinguer nettement le mental du corps et de négliger ce dernier en sa qualité de simple subsistance pour le mental, porteur de ce que l'on appelait les « fonctions supérieures » de l'individu. On s'adressait essentiellement au mental sans faire trop d'attention au corps, si non pour citer l'épigramme du romain Juvénal « *mens sana in corpore sano* »[6]. La nouvelle vision qui nous est donnée par les neurosciences ouvre à présent des nouvelles perspectives. Il est de connaissance commune le sentiment de bien-être, mental et physique, que l'on ressent après une séance d'activité sportive (adaptée à l'âge et aux conditions physiques de l'individu), ce qui réveille en nous la compréhension de ce que peut le corps sur le mental et, vice versa, la littérature mondiale et les résultats qui ont été ici montré indiquent l'importance que l'activité mentale peut avoir sur la performance du corps. Ce dialogue qualitativement différent entre les différentes parties de l'entité corps-esprit, peut améliorer la performance de cette même entité. La rencontre entre une entité enseignante et une entité apprenante doit tenir compte de cette réalité et le dialogue alors s'ouvrira en dehors de l'individu vers les autres.

---

[5] On utilisait plus fréquemment le terme de transfert, mais celui de transmission semble bien mieux adapté et moins équivoque pour indiquer le passage d'information entre un apprenant et une enseignant.

[6] La citation se réfère à une phrase de la 10ème Satyre (v. 346-366) du poète satyrique romain Juvénal mais, en vérité elle est souvent citée à tort, car dans l'original il est dit : *Orandum est, ut mens sit sana in corpore sano* (il faut prier afin que l'esprit soit sain dans un corps sain ; http:// ugo.bratelli.free.fr/Juvenal/Sat10.htm). En d'autres termes, la sagesse veut qu'il faille prier pour avoir la santé de l'esprit comme l'on prie pour celle du corps. Nous utilisons néanmoins dans le texte la citation comme cela est accepté par la tradition courante.

Dans le cadre de nos études, on peut remarquer que les concepts peuvent influencer l'action chez des individus naïfs, alors que les percepts améliorent l'action seulement, *conditio sine qua non*, si l'individu (l'entité corps-mental) a subi un entrainement (un apprentissage) long et intense, comme cela peut être obtenu après avoir conduit des automobiles pendant quelque centaine de milliers de km ou après l'entrainement sportif chez un boxeur de haut niveau.

Cela peut alors conduire à une modification de la théorie de l'*idéaction* qui distingue la réponse consciente (celle qui requière la conception et donc la pensée) (**Figure 1a**) et la réponse perceptuelle (celle qui requière une mémorisation préalable de suites de mouvements) (**Figure 1b**). La première demande l'intervention de la parole et donc du sens de la parole et du raisonnement qui conduit au concept. Peu importe si la parole n'est pas spécifiquement en relation avec l'action ou si elle en est même antithétique (comme *perds*, par exemple), le raisonnement du sujet conduit à la même solution motrice, une amélioration (minime dans certain cas) de la hauteur du SVJ. La réponse perceptuelle par contre, fait intervenir un état qui rappelle les bases mêmes de l'action, celui qui comporte la perception aigue de l'environnement première nécessité pour une réponse rapide à un danger éventuel. Les automatismes, longuement appris, feront le reste.

En quoi l'ensemble de ces résultats et la théorie de l'*idéaction* peuvent-ils aider à répondre à la question, « comment alors transmettre ? » Il est opportun ici de rappeler que l'origine philologique des mots donne des fois des indices utiles à la poursuite de la recherche. Les langues occidentales indoeuropéennes sont fortement influencées par le grec ancien et, dans le sud du continent, le latin. En grec le mot pour école était « *didaskaleion* »[7], un mot tardif car il existait un autre mot, « *skhole* » (*σχολη*), dont le significat originel était celui de 'loisir' (Migeotte, 2007). L'école pour les grec de l'âge de Platon était un loisir car l'occupation principale des habitants mâles des cités-états grecques était la guerre et les affaires de la 'polis' (de la ville, la politique en somme), du reste, commerce, agriculture, artisanat était l'apanage des esclaves ou des hommes libres non citoyens, tandis que les femmes s'occupaient des affaires de la maison et des enfants. La culture, la grammaire, la dialectique, la philosophie ce n'étaient que des sérieux loisirs. A terme les loisirs devinrent les devoirs, en commettant ainsi une faute étymologique, mais l'erreur se multiplia et l'école devint *schola* en latin, *shcola* en langue d'Oc et *école* en langue d'œil[8]. Pourtant des hordes d'enseignants savent pertinemment que c'est dans le plaisir que l'on apprend le mieux et tel sera le cas d'un

[7] De *didaskaleion* dérivent certains mots comme didactique par exemple.
[8] *Schule* en allemand, *school* en anglais, *scuola* en italien, *escuela* en espagnol, etc

conducteur automobile qui n'aime pas conduire, qui se mélange entre pédales d'embrayage, de frein et d'accélérateur et qui force sur l'échangeur de vitesse avec du bruit et de la fureur. Cette personne ne sera jamais capable de comprendre ce qu'est l'état de *ne pas penser*.

Il est ainsi nécessaire, pour que l'apprentissage soit fructueux, que l'apprenant puisse apprendre en s'amusant, avec intérêt et passion car autrement ce sera le crochet inattendu pour le boxeur et l'accident de tôle pour le conducteur.

4. Un résumé explicatif en guise de conclusion

L'ensemble des données résumées dans les paragraphes précédents portent aux conclusions suivantes : 1. Les concepts plus que les mots sont importants pour l'amélioration de la performance motrice. On entend par cela que l'intention de l'individu d'exécuter une représentation mentale (le SVJ) prime lorsque celui-ci utilise des concepts via la parole ou, pourrions-nous dire plus généralement, la conscience. 2. Les perceptions (ou percepts) qui nous sont données par nos sens peuvent, après un apprentissage long et intense, assumer une importance telle d'affaiblir, jusqu'à sa disparition, la volonté de penser et la capacité de s'émouvoir. L'athlète se retrouve dans un état de conscience (*consciousness*) totalement perceptuelle, ce que Francisco Varela, en langue anglaise, a appelé un état de *mindfulness/awareness*[9] (Varela et al, 1993)

Nous ne sommes pas, à présent, capables de comprendre cette différence de réponse due aux concepts et aux percepts sauf à imaginer que les premiers sont propres du mental (*i.e.* du cortex cérébral) et que les percepts, à force, deviendront des automatismes cérébellaires qui peuvent alors intervenir plus ou moins consciemment. A ce propos il est ici utile de rappeler les études de Libet (1999, 2006) montrant, chez des individus normaux, que des gestes naturels, appris depuis l'enfance, peuvent démarrer 150-250 ms *avant* que l'individu soit conscient de son geste. On suppose que la même chose doit arriver chez un boxeur lorsque comprenant l'arrivée d'un coup adverse, est capable de feindre et de réagir en un temps qui défi celui de la transmission physiologique, tout comme Monsieur le Conducteur Automobile est capable de freiner sa voiture afin d'éviter un accident et avant de se rendre compte d'être en train de le faire. Il semblerait en somme que l'apprentissage puisse transférer l'acquis de la mémoire consciente à l'inconscient et que les perceptions, visuelles par exemple, puissent être

[9] Traduisible par : plénitude mental et éveil total.

dirigées vers une réponse cérébellaire sans passer d'abord par les aires cérébrales d'intégration (les aires pariétales postérieures du cortex, par exemple).

En guise de conclusion cette citation de Yasua Yuasa (1987) nous semble apte à apporter une pierre à cet édifice qui comprends l'entité corps-mental et sa capacité à transmettre, "*One starts from the experiential assumption that the mind-body modality changes through the training of the mind and the body by means of cultivation (shugyo) or training (keiko). Only after assuming this experiential ground does one ask what the mind-body relation is. That is, the mind-body issue is not simply a theoretical speculation but it is originally a practical, lived experience (taiken), involving the mustering of one's whole mind and body. The theoretical is only a reflection of this lived experience*".

5. **Bibliographie**

Aziz-Zadeh L, Wilson SM, Rizzolatti G, Iacoboni M (2006). Congruent Embodied Representations for Visually Presented Actions and Linguistic Phrases Describing Actions. *Current biology.* 16: 1-6.

Baars BJ (2002). The conscious access hypothesis: origins and recent evidence. *Trends in Cognitive Sciences*. 6: 47-52.

Bedny M, Caramazza A (2011). Perception, action and word meanings in the human brain: the case from action verbs. *Annals N Y Academy of Sciences*. 1224: 81-95.

Bedny M, Caramazza A, Grossman E, Pascual-Leone A, Saxe R (2008). Concepts Are More than Percepts: The Case of Action Verbs. *The Journal of Neuroscience*. 28:11347–11353.

Buccino, G, Riggio, L, Melli, G, Binkofski, F, Gallese, V and Rizzolatti, G (2005). Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: a combined TMS and behavioral study. Brain res Cogn brain res. 24 : 355-363.

Chalmers DJ (2004). *The Conscious Mind*. Oxford : Oxford University Press.

Chateaureynaud F (2003). *Prospéro. Une technologie littéraire pour les sciences humaines*. Paris: Editions CNRS.

Clark A (2008). *Supersizing the mind*. New York: Oxford University Press.

Clark A, Chambers D (1999). The extended Mind. *Analysis*. 58: 7-19.

Cleeremans A. L'unité de la conscience. In : Cazenave M coordonateur. *De la Science à la philosophie*. Paris: Albin Michel; 2005, p. 147-71.

Csikszentmihalyi M (2008). *Flow. The psychology of optimal experience*. New York: Harper Perennial.

Dehaene S (2001). *The cognitive Neuroscience of Consciousness*. Amsterdam: Elsevier.

Dehaene S, Spelke E, Pinel P, Stanescu R, Tsivkin S (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science.* 284: 970-974.

Edelman GM, Tononi G (1999). *A Universe of Consciousness*. New York: Basic Books; 1999.

Hauk O, Johnsrude I, Pulvermüller F (2004). Somatotopic representation of action words in the motor and premotor cortex. *Neuron*. 41:301-307.

Labruna L, Fernández-del-Olmo M, Landau A, Duqué J, Ivry RB (2011). Modulation of themotor system during visual and auditory language processing. *Exp Brain Res*. 211:243–250.

Oliveri M, Finocchiaro C, Shapiro K, Gangitano M, Caramazza A and Pascual-Leone A (2004). All talk and no action: a transcranial magnetic stimulation study of motor cortex activation during action word production. *J cogn neursci.* 16: 374-381.

Papeo L, Vallesi A, Isaja A, Ida Rumiati R (2009). Effects of TMS on Different Stages of Motor and Non- Motor Verb Processing in the Primary Motor Cortex. *PloS one*. 4: e4508.

Pulvermüller F, Härle M and Hummel F (2000). Neurophysiological distinction of verb categories. *Neuroreport*. 11: 2789-2793.

Received: 2 July 2010 / Accepted: 1 April 2011 / Publishe

Libet B. (1999). Do we have free will? *Journal of Consciousness Studies.* 6: 47-57.

Libet B. (2006). Reflections on the interaction of the mind and brain. *Progress in Neurobiology.* 78: 322-326.

Massarelli R, Rupied B, Rabahi T, Rifai Sarraj A et Fargier P (2012). *Kinésithérapie la Revue.* http://dx.doi.org/10.1016/j.kine.2012.04.001

Migeotte L (2007). *L'économie des cités grecques*. Paris : Ellipses.

Miller KJ, Schalkc G, Fetz EE, den Nijsb M, Ojemanne JG, and Rao RPN (2010). Cortical activity during motor execution, motor imagery, and imagery-based online feedback. *PNAS.* 107: 4430-4435.

Moseley R, Carota, F, Hauk O, Mohr B, Pulwermuller F (2012). A role for the motor system in binding abstract emotional meaning. *Cerebral Cortex*. 22: 1634-1647.

Pelé & R. L. Fish (1978). *Pelé: My life and the beautiful game*. The New English Library.

Rabahi T, Fargier P, Rifai Sarraj A, Clouzeau C et Massarelli R. (2012). Motor performance may be improved by kineasthetic imagery, specific action verb production and mental calculation. *Neuroreport*. 23:78–81.

Rifai Sarraj A, Khaled F, Rabahi T, Fargier P, Massarelli R (2012) La visualisation d'un saut vertical améliore la performance d'un geste similaire chez un observateur. *Kinesitherapie la Revue* 12: 47-51.

Ripoll H (2008). *Le mental des Champions*. Paris : Payot.

Sackett RS (1935). The relationship between amount of symbolic rehearsal and retention in maze habit. *Journal General Psychology*. 13:113-28.

Sato M, Mengarelli M, Riggio L, Gallese V and Buccino G (2008). Task related modulation of the motor system during language processing. *Brain and lang*. 105: 83-90.

Shainberg L (1989). *Finding the 'zone'*. The New York Times, published April 9.

Shtyrov Y, Hauk O and Pulvermuller (2004). Distributed neuronal networks for encoding category-specific semantic information : the mismatch negativity to action words. *Neurosci.* 19: 1083-1092.

Tettamanti M, Buccino G, Saccuman MC, Gallese V, Danna M, Scifo P et al (2005). Listening to action-related sentences activates fronto-parietal motor circuits. J cogn neurosci. 17: 273-281

Varela FJ, Thompson E, Rosch E (1993). *The embodied mind. Cognitive science and the human mind*. Cambridge, MA: MIT Press

Yuasa Y (1987). *Towards an eastern mind-body theory*. State University of New York Press. Cited in Varela et al 1993, p 30

.

Tableau 1. *Effet de divers stimuli cognitifs sur la performance d'un geste moteur complexe.*

condition	Moyenne ± ET	condition	Moyenne ± ET	condition	Moyenne ± ET
Saut de base	29,2 ± 3,8	Saut de base	29,0 ± 3,8	Saut de base	33,4 ± 3,6
Saute	31,0 ± 4,2***	Saute	30,6 ± 5,2**	Saute	34,8 ± 3,5**
IK	30,6 ± 4,4**	Lèche	29,5 ± 4,9	Gagne	35,0 ± 3,6***
SM	30,4 ± 4,1*	Pince	29,9 ± 4,7	Perds	34,7 ± 4,3**
-	-	Tiào	29,2 ± 5,0	Bouge	34,2 ± 3,4
-	-	-	-	Rêve	34,0 ± 3,9

Les sauts de base correspondent aux sauts réalisés avant les stimuli cognitifs. Ces derniers consistaient à prononcer à haute voix différents verbes en plus de l'imagerie kinesthésique (IK) et de la soustraction mentale (SM). Les valeurs des sauts sont en cm. Les astérisques indiques le niveau de significativité à l'égard des sauts de base : * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Tableau 2. *Ressenti émotif des boxeurs avant le combat*

Temps	Ressenti
D'un mois avant le combat à la montée sur le ring	La peur de décevoir (les autres)
D'un mois avant le combat A un jour précédent le combat	La peur de gagner du poids
D'une semaine avant le combat à un jour précédent le combat	L'anxiété (ressentie) de devoir perdre du poids (éventuellement)
Lors de l'entrée dans les vestiaires Avant le combat	La peur de décevoir augmente sensiblement
Au son du *Gong*	Disparition soudaine des symptômes.
Après le son du *Gong*	Etat de *ne-pas-penser*

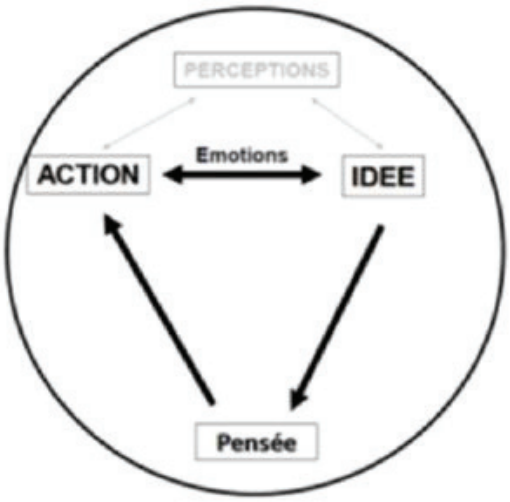


Figure 1 a

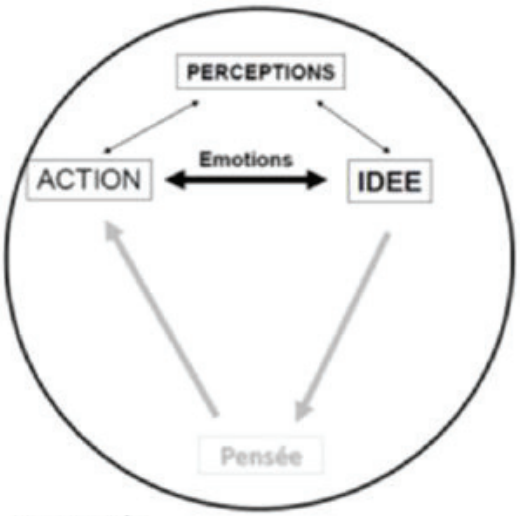


Figure 1 b

Figure 1 : ***La réponse consciente selon la théorie de l'idéaction*** *(Massaarelli et al, 2012)*

(a) Selon cette théorie la réponse motrice est liée à l'idée (entendue comme un flux d'images). Suite à un entrainement intensif et long, on peut répondre à un stimulus extérieur par une action enregistrée en mémoire en un *concept* d'action motrice (on appelait cela une représentation mentale). Dans ce cas les perceptions n'auraient pas une prépondérance sur la pensée. **(b)** dans le cas d'une situation de 'zone' ou de 'ne pas pensée' l'individu n'aurait pas besoin de concepts et pourrait se baser exclusivement sur ces perceptions.