

Effet de divers stimuli cognitifs sur la performance d'un acte moteur complexe : le cas des verbes d'action.

Tahar RABAHI*, Patrick FARGIER*, Fahima LAMMARI**, Hakim HARITI** et Raphael MASSARELLI*

** Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport (CRIS – EA 647), 69622 Villeurbanne cedex, France ;*

*** Université Alger 3, Laboratoire de Sciences et Pratiques des Activités Physiques, Sportives et Artistiques (SPAPSA), Bp/A19, 16832, Zéralda, Algérie.*

Résumé : La relation entre le langage et l'action motrice est matière à débat depuis plusieurs années. Le développement des techniques d'imagerie cérébrale a permis aujourd'hui de cerner avec beaucoup plus de précision la nature de cette relation, ce qui a donné lieu à une abondante littérature traitant de ce sujet. La quasi-totalité de ces études ont examiné l'effet éventuel de la parole, notamment la lecture ou l'écoute de verbes d'action, sur la performance d'un mouvement simple de la main comme celui de la préhension. Les résultats ont mis en avant une amélioration de la performance motrice (*e.g.*: diminution du temps de réaction) lorsque la tâche langagière précédait celle-ci. Ceci laisse présager que le mouvement pourrait être facilité par la parole. Ses résultats sont corroborés par les études d'imagerie cérébrale (IRMf, TMS, etc) qui ont montré des activations au niveau des aires motrices et prémotrices, habituellement impliquées dans la planification et l'exécution du mouvement volontaire, lorsqu'on a demandé aux sujets d'effectuer une simple tâche de lecture ou d'écoute de verbes d'action.

L'ensemble de ces recherches, nous a permis de focaliser l'attention sur la possibilité d'améliorer la performance motrice par le biais de la parole, spécifiquement les verbes d'action, mais aussi par d'autres stimuli cognitifs. Le choix du mouvement a été porté sur le Squat Vertical Jump (SVJ ou le saut vertical accroupi), qui revêt un caractère complexe, rarement exploité par les

neuroscientifiques, d'où l'intérêt de l'étudier, d'autant plus qu'il bénéficie d'un large intérêt dans le domaine de la biomécanique humaine. On a ainsi étudié l'effet de la prononciation et la lecture à haute voix ou silencieuse ainsi que l'écoute de verbes d'action (conjugués à la première personne de l'impératif) spécifique (saute) et non spécifiques (lèche, pince, bouge) à l'action motrice mesurée, le SVJ. L'utilisation d'autres verbes était nécessaire pour contrôler l'effet spécifique de "saute", à l'instar des verbes d'état (rêve) ou incompréhensible par les sujets (tiào) ou encore ceux décrivant un état émotionnel (gagne, perds), sans relation avec l'action. L'effet des verbes qui contredisent et/ou qui s'opposent au déroulement de l'action de sauter (tombe, stoppe) a été vérifié. Ce design expérimental a été renforcé par l'utilisation de deux stimuli non langagier, l'imagerie kinesthésique (en lien avec l'action) et le calcul (de type soustraction) mental (sans aucune relation avec l'action).

Les résultats ont montré que la hauteur du SVJ a été augmentée non seulement par le verbe d'action spécifique "saute" mais aussi par le verbe d'action non spécifique "pince" ainsi que les verbes chargés émotionnellement. L'imagerie kinesthésique et la soustraction mentale ont également amélioré la performance en SVJ. Ceci confirme l'interaction entre parole et action et implique par ailleurs que la notion de spécificité entre les tâches cognitive et motrice n'a pas empêché la mise en place du processus d'amélioration de performance motrice.

Mots clés : *stimuli cognitifs, acte moteur complexe, la performance motrice, le langage.*

1. Introduction

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 Pellegrino et al, 1992 ; Rizzolatti et al, 1996 ;

Saur et al, 2008 ; Petrides et Pandya, 2009), ont donné naissance à une riche littérature traitant des connexions neuroanatomiques entre les aires du langage et de l'action (Young et L, 1994 ; Makris et al, 1999 ; Pulvermüller et al, 2005 ; Pulvermüller et Fadiga, 2010). Ainsi, il existe des connexions entre le cortex prémoteur, représenté par ses parties dorsale et ventrale, l'aire de Broca dans le cortex frontal inférieur et l'aire de Wernicke dans le cortex temporal supérieur (Pulvermüller, 2005). Ceci a donné lieu à un autre type de recherche, celui de l'étude de la cinématique du mouvement et de ses propres aires cérébrales, motrice primaire et prémotrice, après présentation de stimuli langagiers, de préférence des mots évoquant une action.

On s'attellera ainsi à exposer ici ce que semble être l'impact de la parole, sous forme de syllabes, phrases ou simple textes ... sur l'activité des aires cortico-motrices, pour s'attarder ensuite sur l'effet spécifique que pourraient avoir les verbes d'action sur ces régions à l'égard d'un mouvement simple, comme celui de la préhension. S'ensuivra le développement de notre approche expérimentale, mis en place dans le but de vérifier l'effet de différents stimuli cognitifs sur la performance d'un acte moteur complexe. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la discussion des résultats obtenus.

2. La relation entre la parole et l'action

L'une des premières études qui a utilisé la technique d'imagerie fonctionnelle afin d'explorer les mécanismes cérébraux sous-tendant la relation entre la parole et l'action fut celle de Petersen et al (1988). Ces auteurs avaient observé, à l'aide de la Tomographie par Emission de positrons (TEP¹), des foyers d'activation dans le cortex prémoteur gauche lorsque les sujets prononçaient des noms communs écrits sur un écran d'ordinateur, avec la participation de l'aire motrice primaire, responsable des mouvements de la bouche,

¹ La TEP étant une technique d'imagerie médicale permettant de visualiser l'activité cérébrale, à partir de la détection de rayonnement d'un électron positif, le *positron* β^+ , produite par un isotope radioactif à demi-vie très courte, administré aux sujets par voie intraveineuse.

située dans la partie ventrale de la bande motrice (aire 4 de Brodmann, appelée aussi aire M1)² et proche de l'aire de Broca, traditionnellement impliquée dans la production de la parole (pour revue voir Gazzaniga et al, 2001) et dans bien d'autres fonctions cérébrales jusqu'alors insoupçonnables (Fadiga et al, 2009 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2011). A travers l'expérience de Petersen et al (1988), on constate la participation des régions cérébrales dédiées à la motricité, l'aire prémotrice et l'aire motrice primaire, à des tâches linguistiques comme la prononciation de mots. Malgré la faible résolution spatiale de la TEP, ces résultats ont pu être corroborés par la suite, notamment après le développement d'autres outils d'investigation cérébrale. Wilson et al (2004) ont par exemple rapporté, dans une étude IRMf (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle), une modulation de la partie ventrale du cortex pré-moteur ainsi que du M1 après la prononciation et l'écoute de syllabes, alors que les conditions contrôles qui consistaient à écouter un son monotone ou celui d'une cloche n'ont pas montré les mêmes résultats. Fadiga et ses collègues (2002) ont observés des résultats similaires qui provenaient, cette fois-ci, d'une étude par Stimulation Magnétique Transcrânienne (SMT ou TMS³ en anglais pour Transcranial Magnetic Stimulation), appliquée sur la région de l'aire M1 correspondante à la langue. L'amplitude du potentiel évoqué moteur (PEM⁴) enregistré à partir du muscle de la

² *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 cytologiques du cortex cérébral ainsi que leur rôle fonctionnel. Ainsi, l'aire de Broca, connue pour son rôle langagier est représentée par les aires de Broca ou Brodmann 44 et 45 alors que les régions motrices se situent au niveau des aires de Brodmann 4 et 6 (pré-motrice ou PMA).

³ Le principe de cette technique est d'appliquer une stimulation magnétique sur l'aire cérébrale à évaluer, ici l'aire M1 gauche dédiée aux mouvements de la langue, afin de créer une lésion virtuelle à travers le changement du champ magnétique local. Le mouvement se verrait alors altérer si l'aire en question à un quelconque rôle à jouer dans la réalisation de la tâche motrice ou cognitive.

⁴ Il s'agit d'une technique utilisée en physiologie afin de mesurer la modulation de l'activité électrique du système nerveux en réponse à un stimulus externe. En pratique, se sont des électrodes qu'on pose sur un muscle donnée, celui de la main par exemple. On procède ensuite à une série de stimulation magnétique (TMS) sur la région cérébrale responsable des mouvements de la main. Le tracé du potentiel évoqué moteur (PEM), notamment son amplitude, représentera

langue a été significativement augmenté suite à l'écoute de mots concrets (*e.g.*: *terre*) au regard des pseudo-mots. Ainsi, les mouvements de la langue seraient facilités par la simple écoute des mots (Fadiga et al, 2002). De même, l'implication du cortex moteur a été rapportée lorsque des sujets écoutaient (Watkins et al, 2003) ou prononçaient à haute voix un texte écrit (Tokimura et al, 1996) ou des mots isolés ou triplés (Meister et al, 2003).

L'ensemble de ces expérimentations démontre que les substrats neuronaux qui régissent la planification et l'exécution de l'action motrice pourraient également être impliqués dans le traitement cortical de la parole.

3. Verbes d'action et cortex moteur

Les verbes d'action sont l'un des stimuli cognitifs les plus exploités par la littérature dans le domaine neuroscientifique. Ils offrent un champ d'investigation très large, en passant par l'étude du langage dans sa plus large définition (production et perception des mots, voir § 2), pour en arriver à l'étude de la relation directe et, pour certains spécifique, entre le langage et l'action motrice. Une des études pionnières, a été celle de Hauk et al (2004), qui ont demandé à des sujets de lire silencieusement trois verbes d'action, affichés sur un écran d'ordinateur, représentant la face (*Lick* ou lécher), les mains (*Pick* ou pincer) et les pieds (*kick* ou donner un coup de pied). Les images d'activation fonctionnelle corticale obtenues par IRMf ont révélé la présence de ces activations (des pixels) dans le cortex moteur et cela de manière apparemment somatotopique, pour la simple raison que cette dernière est traditionnellement observée au sein du cortex moteur primaire, le M1. Hauk et ses collègues ont principalement enregistré des activations dans le cortex prémoteur.

Des résultats similaires ont été rapporté peu après par Tettamanti et al (2005) en faisant écouter aux sujets des phrases d'action mettant en scène des mouvements réalisés avec les trois effecteurs du corps (la face, *e.g.*: *Je mords dans une pomme* ; la main, *e.g.*: *Je saisis un*

alors un indice d'évaluation de l'activité électrique de la région cérébrale en question.

couteau et le pied, *e.g.*: *Je tape dans un ballon*). L'analyse hémodynamique par IRMf⁵ a révélé une augmentation du flux sanguin le long du cortex prémoteur incluant l'aire de Broca.

D'autres preuves de ces liens éventuels entre les processus corticaux sous-tendant les verbes d'action et le mouvement ont été rapporté par des études utilisant la TMS. Ces dernières se sont particulièrement intéressées à la modulation des aires cortico-motrices induite par le traitement cérébral de verbes d'action. Buccino et al (2005) ont par exemple observé une diminution de l'amplitude des PEMs, enregistré à partir de la main ou du pied, à l'écoute de phrases d'action impliquant le même effecteur. La lecture silencieuse des verbes d'action a également suscité une modulation de l'aire M1 de la main, dans le cas des verbes décrivant une action de la main comparé aux verbes de non action (Papeo et al, 2009). Ce résultat a été relié par une récente étude où la lecture passive des verbes d'action de la main induisait une sensible augmentation de l'amplitude des PEMs, au regard des mots sans relation avec l'action (Labruna et al, 2011).

L'ensemble de ces données ont été complétées par des études cinématiques, explorant des paramètres physiques propres à l'action (vitesse, temps de réaction, etc.) et leur modulation face à un stimulus langagier (verbe d'action). Un groupe de chercheurs s'est récemment penché sur cette question, celui de l'institut des Sciences Cognitives de Lyon. Une de leur étude s'est focalisée sur l'éventuel effet de la lecture silencieuse de verbes d'action sur le geste de préhension (Boulenger et al, 2006). Le paradigme expérimental consistait à évaluer plusieurs paramètres cinématiques du mouvement du poignet (vitesse et temps du mouvement...) pendant une tâche de décision lexicale entre, d'un côté, des verbes d'action de la face (*e.g.*: *pleurer*), de la main (*e.g.*: *dessiner*) et du pied (*e.g.*: *sauter*) et, d'un autre côté, des noms concrets (*e.g.*: *étoile*). Lorsque la tâche motrice (préhension d'un objet cylindrique) est exécutée, simultanément à celle du langage, elle

⁵ Une analyse hémodynamique sous-entend l'étude des propriétés mécaniques de la circulation sanguine (pression, vitesse, etc.) dans les régions cérébrales visées. Une augmentation de flux est remarquée chaque fois que le tissu cérébral est activé.

devient perturbée (mouvement plus lent) dans le cas des verbes d'action comparés aux noms. Le mouvement de préhension retrouve toute son aisance et enregistre un temps d'exécution plus court lorsque les verbes d'action sont présentés en amont de celui-là. Ces résultats confirment les conclusions des études d'imagerie cérébrale concernant les liens étroits entre les verbes d'action et l'acte moteur et établissent un effet de temporalité entre ces deux tâches, langagière et motrice. Cette tendance a été réitérée quelques années plus tard, lorsque Frak et ses collègues (2010) ont rapporté un effet de facilitation du mouvement, en l'occurrence la force de préhension, suite à l'écoute de verbes d'action décrivant des mouvements de la main. Enfin, Fargier et al, 2012 ont récemment décrit le même effet de facilitation de l'action de préhension et de déplacement d'un cylindre, après prononciation à haute voix de verbes d'action impliquant le même effecteur que celui dans la tâche motrice, *i.e.*: la main.

4. Effet de verbes sur la performance d'un acte moteur complexe

Pour répondre à la problématique développée en introduction, nous avons conçu un paradigme expérimental constitué de sept expériences réalisées séparément, au sein de notre laboratoire. On a ainsi testé l'effet de prononciation, lecture ou encore l'écoute de plusieurs mots sur la performance d'un geste moteur complexe, le Squat Vertical Jump (SVJ). L'ensemble des mots étaient soit des verbes d'action (*saute, pince, lèche et bouge*), soit des verbes émotionnels (*gagne, perds*), soit des verbes sans relation avec l'action (*rêve*) ou encore contredisant l'action de sauter (*stoppe, tombe*). Un verbe incompréhensible par les sujets (*tiào*) a été également utilisé. Enfin, deux stimuli sans relation avec la parole faisaient parti de notre design expérimental, l'Imagerie Kinesthésique (IK) et la Soustraction Mentale (SM).

Les résultats ont mis en avant une augmentation d'environ 2 cm de la hauteur du SVJ après le stimulus langagier *spécifique* au saut, en l'occurrence *saute*, alors que le stimulus non langagier, l'IK a eu pratiquement le même effet sur le SVJ. Le résultat le plus surprenant provenait de la SM qui a affecté le processus d'exécution motrice en améliorant la performance du saut. Un

verbe *non spécifique* au saut, *lèche*, n'a pas révélé d'augmentation significative à l'égard de la hauteur du SVJ, contrairement à *pince* qui a impacté sensiblement celle-ci d'environ 4,4%. Ni *rêve* ni *tiào* n'ont manifesté un effet sur la performance motrice. Les mots chargés émotionnellement, *gagne* et *perds*, ont amélioré la hauteur, tandis que *bouge* n'a pas montré un écart significatif avec le saut de base, améliorant tout de même la performance de 0,8 cm. Même résultat observé après la prononciation du verbe d'état *rêve* (+0,6 cm). L'effet des verbes sémantiquement opposés à l'action de sauter, *stoppe* et *tombe*, n'a révélé aucune différence significative, comparé au saut de base.

5. Effet des stimuli non-langagier sur la performance du mouvement

Parmi les stimuli cognitifs utilisés dans notre expérimentation et qui ne présentaient aucun lien avec la fonction du langage, l'IK. Le fait que des sujets, naïfs en matière d'imagerie, ont ressenti les sensations sensorimotrices que pourrait leur procurer une réelle exécution motrice, a suffi à améliorer la performance du geste moteur réellement accompli, le SVJ. L'effet de l'IK est jadis connu dans le milieu sportif (voir Morris et al, 2005), et les travaux expérimentaux, notamment l'appui des études d'imagerie cérébrale, ont permis d'esquisser une explication scientifique quant à l'efficacité de l'IK à l'égard du geste sportif. Il a ainsi été montré une augmentation de l'activité hémodynamique à l'intérieur du cortex M1, suite à une série de simulations mentales de type kinesthésique, des mouvements d'opposition des doigts au pouce (Roth et al, 1996 ; Porro et al, 1996). Les résultats traduisaient de la sorte une pré-activation corticale en vue de préparer l'exécution du mouvement (Rabahi et al, 2012). Ces aires corticales, *i.e.*: le M1, en plus des aires prémotrice et inférieure frontale, sont à leur tour impliqués dans l'arithmétique cérébrale (Dehaene, 1999 ; Burbaud et al, 2000 ; Kazui et al, 2000). Celle-ci étant une fonction cognitive qui ne relève pas spécifiquement de ces zones, dédiées respectivement à l'action motrice et au langage, puisque l'état de l'art actuel fait état d'un éveil cérébral, impliquant l'ensemble des circuits cérébraux, qu'ils soient corticaux ou sous-corticaux (voir la discussion de Rabahi et al, 2013). L'IK rend compte de l'effet d'amélioration que pourrait avoir un stimulus non langagier, avec

une forte présence de la notion d'*action*, sur la performance motrice, alors que la SM met en avant le même effet malgré sa non-spécificité à la tâche motrice. Voici donc deux manières différentes d'impacter le processus d'amélioration de la performance motrice : à travers des stimuli cognitifs sans avoir recours au langage (IK et SM) ou sans rapport avec l'action motrice (SM).

6. Hypothèses concernant l'Effet des stimuli langagiers sur la performance du mouvement

La plupart des verbes que nous avons testé ont amélioré la hauteur du SVJ, même si le seuil de confiance statistique, fixé à 95%, a été dépassé par certains d'entre eux. Ce constat rappelle le résultat obtenu avec la soustraction mentale dans la mesure où la notion de spécificité à l'égard de l'action motrice est diluée, et se dissipe peu à peu, avec les résultats qui mettent en exergue un processus de performance motrice facilité par la prononciation de verbes de non action, comme ceux chargés émotionnellement. Cette notion de spécificité est très largement reliée dans la littérature sous un autre concept, la *somatotopie* (Hauk et al, 2004 ; Buccino et al, 2005 ; Aziz-Zadeh et al, 2006 ; Kemmerer et al, 2008 ; pour une revue voir Pulvermüller, 2005), également appelé l'*Homunculus* de Penfield (Penfield et Boldrey, 1937). Il s'agit d'une spécialisation des aires cérébrales du cortex sensorimoteur, pour une fonction motrice bien précise (par exemple les mouvements de la face et de la bouche sont localisés dans la partie ventrale des aires primaires sensorielle (S1) et motrices (M1), les mouvements de la main et des doigts sont régis par la partie médiane et ceux des pieds avec la portion dorsale). Pulvermüller en a développé un modèle de somatotopie sémantique (Pulvermüller, 2005) extrapolant en quelque sorte la somatotopie du mouvement à celle de la compréhension des mots. Dans ce modèle, l'effecteur mis en route par le processus d'exécution motrice recruterait la même aire cérébrale impliquée dans le traitement de mots (verbe ou nom) décrivant cet effecteur en mouvement.

Or, nos résultats obtenus avec les verbes d'action ne vont pas dans ce sens : le verbe *saute* a certes impacté la performance en SVJ, en l'améliorant et ce dans l'ensemble des expériences, mais le verbe *pince* qui désigne un effecteur (main) autre que celui impliqué

directement dans le SVJ, *i.e.*: le membre inférieur, a également amélioré statistiquement la hauteur. Les autres verbes d'action, *lèche* et *bouge*, ont amélioré la performance même si cela n'apparaît pas statistiquement probant. En somme, nous n'avons pas observé de diminution dans la hauteur du saut (Rabahi et al, 2013). Ceci démontre que le contenu sémantique des verbes n'est pas exclusivement le seul facteur joué en faveur de l'amélioration de la performance motrice. D'autres facteurs sont certainement impliqués, comme l'*intention* des sujets à sauter le plus haut possible et l'*attention* qu'ils portent à l'exécution du saut.

De récentes données émanant des études d'imagerie cérébrale, qui utilisent des machines très performantes, atteignant une résolution magnétique, jusqu'à 7 tesla, avec des techniques d'analyse et d'extraction d'images à la pointe de la technologie, mettant en évidence des cartographies cérébrales inédites, corroborent nos résultats obtenus avec les verbes non spécifiques au SVJ. L'étude de Postle et al (2008) en est la parfaite illustration. Ces chercheurs ont mis au point une technique de repérage des aires corticales à partir de cartes cytoarchitectoniques, issues des études micro-cellulaires sur des cerveaux post-mortem (Geyer, 2003 ; Eickhoff et al, 2006). Cette procédure permet aux chercheurs de localiser avec précisions les activations cérébrales sous IRMf, et d'éviter au passage le repérage à partir des sillons et circonvolutions qui ne représentent pas de fiables marqueurs des frontières inter-corticales (voir Amunts et al, 2007). Postle et ses collègues ont donc observé une distribution corticale *non somatotopique* dans les aires M1 et prémotrices, à la suite de la lecture silencieuse de verbes d'action impliquant la face, la main et le pied. De plus, l'IRMf a mis en évidence des activations extra-motrices, dans la région temporale et insulaire avec la participation du cervelet et du noyau caudé. D'autres études ont participé à la mise en doute de la somatotopie 'systématique' du cortex sensorimoteur (Bedny et al, 2008 ; de Zubicaray et al, 2008 ; Arévalo et al, 2010 ; Tremblay et Small, 2011 ; pour revue, Mahon et Caramazza, 2008 ; Fernandino et Iacoboni, 2010) confortant une partie de nos résultats sur la spécificité entre tâches motrice et langagière.

Les autres données résultant de notre étude se rapportent à l'effet des verbes à fort attribut émotionnel sur l'acte moteur, le SVJ.

C'est vrai que l'impact des émotions est bien connu par les sportifs, qui peut soit les booster soit produire l'effet contraire, mais l'expérimentation peine, à notre connaissance, à produire des preuves scientifiques quant à son effet sur un mouvement complexe avec plusieurs degrés de liberté. Ceci dit, de récentes manipulations IRMf ont rapporté que la lecture de verbes émotionnels ferait intervenir le cortex sensorimoteur (Moseley et al, 2012). Mise à part les facteurs motivationnels que peut procurer un verbe comme *gagne*, l'implication de ces aires corticales pendant le processus du langage pourrait très bien induire leur pré-activation, exactement comme pour les verbes d'action, ce qui faciliterait la mise en mouvement sous forme de SVJ. Il est par ailleurs possible que le traitement cortical de l'antonyme de *gagne*, *i.e.*: *perds*, emprunte ces mêmes circuits cérébraux, *i.e.*: le cortex sensorimoteur, ce qui renvoie à l'hypothèse de pré-activation. Toutefois, il est fort probable que les sujets se soient opposés à la commande de 'perdre' produisant de la sorte un saut maximal à chaque répétition, comme il a été stipulé par la consigne initiale.

L'efficacité du verbe *saute* envers la hauteur du SVJ ressort notamment à travers la non amélioration de celle-ci après présentation du verbe de nonsense et incompréhensible par les sujets, *tiào* (*saute* en Chinois). La sémantique du verbe aurait donc un rôle important, d'autant plus que les verbes (*stoppe* et *tombe*) qui contredisent le but du mouvement, *i.e.*: sauter, ont eu un effet quasi inhibiteur sur la commande motrice.

7. Conclusion

Notre étude montre que la performance d'un acte moteur complexe est améliorée par la prononciation, la lecture et l'écoute du verbe d'action *saute*. Cet effet est également retrouvé avec le verbe non spécifique au mouvement étudié, *pince*. Les autres verbes qu'ils soient spécifique à un tierce effecteur, *lèche*, ou à l'ensemble du corps, *bouge*, ont influencé positivement le processus d'amélioration de la hauteur du SVJ. Ce résultat constitue une originalité dans la mesure où l'action motrice impactée par les verbes d'action est de nature biomécanique très complexe contrairement à celles rapportées par les études cinématiques ou d'imagerie cérébrale (voir le § 3). Comme nous l'avons développé

auparavant, la spécificité entre stimuli moteur et langagier n'est pas confirmée par notre expérimentation. Ce qui nous amène au second point inédit découlant de nos résultats et qui renseignent l'effet des stimuli sans relation avec l'action : le premier est celui de la soustraction mentale et le second se rapporte au traitement cérébral des verbes ayant une forte consonance émotive.

Il nous reste à mentionner enfin que l'ensemble de ces stimuli cognitifs ont pu améliorer la hauteur d'un mouvement global chez des individus non-sportifs, aussi complexe que le saut vertical accroupi, pour atteindre 2,7 cm en seulement 10 secondes de stimulus, au moment où un sportif de haut niveau aurait besoin de plusieurs semaines d'entraînement pour espérer progresser sa performance.

Bibliographie

- Amunts, K., Schleicher, A. & Zilles, K. (2007). Cytoarchitecture of the cerebral cortex-more than localization. *NeuroImage*, 37(4), 1061–5.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- De Zubizaray, 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.
- Dehaene, S. (1999). Sources of Mathematical Thinking: Behavioral and Brain-Imaging Evidence. *Science*, 284(5416), 970–4.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge: MIT Press.
- 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.
- Fuster, J. M. (2003). *Cortex and mind: Unifying cognition*. Oxford: Oxford University Press.
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B. & Mangun, G. R. (2001). *Neurosciences cognitives, la biologie de l'esprit*. Paris: DeBoeck Université.
- Geyer, S. (2003). *The microstructural border between the motor and the cognitive domain in the human cerebral cortex*. Wien: Springer.
- Hauk, O. & Pulvermüller, F. (2004). Neurophysiological distinction of action words in the fronto-central cortex. *Human brain mapping*, 21(3), 191-201.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- Morris, T., Spittle, M. & Watt, A.P. (2005). Imagery in sport. Champaign : human kinetics.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Pulvermüller, F. & Fadiga, L. (2010). Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nature reviews. Neuroscience*, 11(5), 351–60.
- Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(7), 576–82.
- Pulvermüller, F., Hauk, O., Nikulin, V. V. & Ilmoniemi, R. J. (2005). Functional links between motor and language systems. *The European journal of neuroscience*, 21(3), 793–7.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- Shallice, T. (1988). From neuropsychology to mental structure. New York: Cambridge University Press.
- 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.
- 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.
- Tremblay, P. & Small, S. L. (2011). From language comprehension to action understanding and back again. *Cerebral cortex*, 21(5), 1166–77.
- 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.
- 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.
- 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.