



HAL
open science

Vers une meilleure compréhension des liens Action- Perception-Langage

Christel Bidet-Ildei

► **To cite this version:**

Christel Bidet-Ildei. Vers une meilleure compréhension des liens Action- Perception-Langage. Psychologie. Université de Poitiers (France), 2017. tel-01762405

HAL Id: tel-01762405

<https://hal.science/tel-01762405>

Submitted on 10 Apr 2018

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.



Université de Poitiers



Habilitation à Diriger des Recherches

**« Vers une meilleure compréhension des liens Action-
Perception-Langage »**

Présentée et soutenue publiquement par :

Christel Bidet-Ildei

Faculté des Sciences du Sport

Centre de Recherches sur la Cognition et l'apprentissage – UMR 7295

Le 12/06/2017

Membres du jury :

Yannick Blandin, Université de Poitiers, Examineur

Denis Brouillet, Université Paul Valéry-Montpellier 3, Examineur

Yvonne Delevoye-Turrell, Université Lille 3, Rapporteur

Vincent Dru, Université Paris Ouest Nanterre La Défense, Rapporteur

Aymeric Guillot, Université Claude Bernard-Lyon 1, Rapporteur

Marco Tettamanti, San Raffaele University-Milano, Examineur

Etre enseignant-chercheur, c'est d'abord être un enseignant, et parfois, même si cet aspect de notre métier est minimisé, n'oublions pas qu'il nous incombe de transmettre des connaissances aux générations futures mais également de susciter des vocations comme ce fut le cas pour moi. Je crois personnellement que ce dernier point est l'une des plus belles récompenses que l'on peut souhaiter en tant qu'enseignant. Etre enseignant-chercheur, c'est aussi être un chercheur, c'est-à-dire participer à l'accroissement des connaissances dans un domaine particulier. C'est aussi savoir se remettre en question et sous l'aspect très fier que peuvent avoir certains d'entre nous, l'humilité reste pour moi une des principales qualités du chercheur. Curiosité, dépassement de soi et exigence font également partis pour moi des caractéristiques importantes du chercheur. Mais sous ces aspects très nobles, il ne faut pas oublier qu'être un chercheur c'est aussi savoir gérer l'urgence, les déceptions et les remises en question perpétuelles. Enfin, être enseignant-chercheur c'est gérer des tâches administratives que ce soit au niveau de la faculté et/ou du laboratoire, et même si cet aspect est très contraignant, il est nécessaire au bon fonctionnement des différentes instances et à une meilleure compréhension de notre métier dans son ensemble. Dans ces conditions, on pourrait considérer l'habilitation à diriger des recherches (HDR) comme une tâche de plus dans un métier déjà très exigeant. En effet, l'HDR est actuellement une étape obligatoire si l'on veut pouvoir diriger des étudiants en thèse ou devenir Professeur des Universités. Sans minimiser cet aspect obligatoire et évaluatif, j'ai choisi de considérer cette HDR, non pas comme une contrainte mais comme une sorte de parenthèse, une chance de faire le point sur le travail accompli et de songer à l'orientation que je pourrai donner à la suite de mes recherches.

Remerciements

L'écriture de ce document ainsi que les travaux de recherche qui y sont retranscrits ont été menés durant les onze dernières années. Ces travaux sont le fruit de mes études et la suite logique de ma thèse. Ils ont aussi été façonnés par des rencontres, des collaborations, et de nombreuses discussions. Il serait vain d'essayer de remercier toutes les personnes sans qui ce travail n'aurait pas pu aboutir. Cependant, je tiens à remercier plus particulièrement certaines d'entre elles qui font partie intégrante de ces recherches et de ma vie et à ce titre sont l'essence même de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de thèse, Jean-Pierre Orliaguet sans qui toute cette aventure n'aurait pas pu commencer. Merci pour m'avoir donné le goût de la recherche et m'avoir conseillée et soutenue tout au long de ma thèse (et même après).

Merci également à l'Université de Poitiers, à la Faculté des Sciences du Sport et au Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage qui m'ont fait confiance et m'ont permis d'exercer ce métier que j'aime tant. Merci également à mes collègues pour leur amitié et nos nombreux échanges. Je voudrais en particulier remercier Yves, assistant ingénieur au Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage pour sa disponibilité et son aide précieuse sur la construction du matériel expérimental et la modification d'images et de vidéos.

Un grand merci à tous les membres de l'équipe ATCO, qui m'ont accueillie et accompagnée durant toutes ces années. Merci particulièrement à Lucette pour tous ces échanges passionnants qu'ils soient scientifiques ou non et qui occupent bien souvent nos déjeuners !

Merci également à Arnaud, ancien membre de l'équipe ATCO, qui m'a épaulée dans mes nouvelles thématiques de recherche. Même si aujourd'hui tu as un nouveau laboratoire et de nouveaux projets, tu resteras toujours un collaborateur privilégié et un véritable ami.

Je remercie également mes parents qui m'ont toujours soutenue depuis mon entrée en fac de Psychologie. Merci maman et papa d'avoir toujours été là et de m'avoir encouragée à poursuivre même dans les moments de doute.

Je remercie tout particulièrement mes deux petites princesses Nami et Nola qui illuminent mes journées (et parfois mes nuits !) et qui m'ont laissée un peu de temps pour finaliser ce travail.

Merci également à Yohann qui me donne l'inspiration et le courage de chaque instant et qui a su m'épauler dans cette aventure comme dans toutes les autres que nous avons vécues ensemble.

Enfin, merci à tous mes collaborateurs, aux personnes qui ont bien voulu passer mes expérimentations, aux étudiants qui m'ont aidée dans le recueil des données et aux membres du jury qui ont acceptés d'évaluer ce travail.

“Le doute est à la base même du savoir, puisqu'il est la condition essentielle de la recherche de la vérité. On ne court jamais après ce qu'on croit posséder avec certitude.” (Jean-Charles Harvey, *Les demi-civilisés*, 1934)

Table des matières

Préambule	8
Introduction	14
Partie 1 : Définitions, spécificités et modèles théoriques de la perception visuelle des mouvements humains	17
I. L'observation d'action : Définitions et spécificités	18
1) La technique du « point-light display »	18
2) L'influence de la cinématique et de l'orientation	20
II. Les circuits neuronaux impliqués dans la perception visuelle des mouvements humains	23
III. Les modèles de la perception visuelle des mouvements humains	28
1) Un exemple de modèle computationnel : le modèle « hiérarchique » de Giese & Poggio (2003)	28
2) Les théories motrices de la perception	30
Partie 2 : Rôle de l'expérience motrice dans la perception visuelle des mouvements humains	33
I. Expérience motrice et perception visuelle des mouvements humains	34
II. Les limites de l'implication motrice lors de la perception visuelle des mouvements humains	37
III. Une intervention motrice lors de la perception visuelle des mouvements biologiques ?	42
1) L'Effet de la tâche	42
2) Intervention motrice vs simulation motrice	44
3) Des différences entre hommes et femmes	45
4) Conclusion et perspectives : vers un nouveau modèle de la perception visuelle des mouvements biologiques	48
Partie 3 : Lien perception visuelle des mouvements humains-Langage	52
I. Le lien action-langage	54
II. Le lien observation d'action-langage	60

1)	Pourquoi s'intéresser au lien observation d'action-traitement de verbes d'action ?	61
2)	Les preuves neurophysiologiques du lien observation d'action-traitement des verbes d'action	61
3)	Les preuves neuropsychologiques du lien observation d'action-traitement des verbes d'action	65
4)	Les preuves comportementales du lien observation d'action-traitement des verbes d'action	66
III. Comment expliquer le lien action-langage : débats théoriques		71
1)	Les mécanismes sous-tendant le lien action langage	71
2)	L'implication du système moteur est elle nécessaire à la compréhension des verbes d'action ?	74
3)	Comment le lien action-langage se développe-t-il ?	77
IV. Conclusion		80
Partie 4 : Perspectives		83
I. Les caractéristiques des actions déterminant l'activation du lien action-langage		84
II. Les origines du lien action-langage		86
III. Lien action-langage et cognition sociale		88
IV. Quelles utilisations du lien action-langage dans la rééducation ?		90
Partie 5: Références		94

Préambule

PREAMBULE

Ce document vous est présenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches (HDR). Il reprend ainsi une partie du travail effectué au cours des dix dernières années. Seulement une partie me direz-vous ? En effet j'ai choisi dans ce document de ne pas évoquer les travaux ne portant pas spécifiquement sur la perception visuelle des mouvements humains. Par ailleurs, je ne détaillerai pas non plus les travaux effectués au cours de ma thèse même si je pourrai y faire référence par moment au cours du document.

Avant de vous présenter mes motivations et l'organisation de mon document j'aimerais revenir brièvement sur mon parcours.

Quand j'ai commencé mes études en psychologie, c'était pour pouvoir rattraper un 2^{ème} cycle en éthologie sans passer par un « DEUG de biologie » ou devrais-je dire pour être plus honnête sans faire de sciences » c'est dire comme j'avais une bonne idée de ce que sont les études en psychologie ! Mon bac scientifique en poche mais dégoutée des sciences, me voilà ainsi plongée dans la « fosse aux lions » où déjà à l'époque le directeur de l'UFR nous demandait de regarder nos voisins de droite et de gauche et nous assurait que l'un d'entre nous ne serait plus là au mois de Janvier. Après deux années relativement généralistes, où je côtoyais allégrement les théories de Freud et de Piaget et où j'apprenais à mieux interpréter les tactiques de manipulation et le fonctionnement de sectes en tout genre, je découvris aussi la psychologie cognitive et différentielle. Au fur et à mesure, je trouvai finalement que mon choix d'étude n'était pas si mal et qu'en attendant de pouvoir mieux analyser et comprendre le comportement des animaux, j'apprenais beaucoup sur le fonctionnement des humains, bref je ne perdais pas mon temps ! Je me retrouvai ainsi en 3^{ème} année avec quelques nouvelles connaissances et encore énormément d'incertitudes et puis c'est là que j'ai fait la connaissance de Jean-Pierre Orliaguet. Il enseignait les liens perception-action, ce qui peut ne pas paraître passionnant de prime abord, surtout quand on est encore étudiant et qu'on ne sait pas vraiment ce que cela veut dire ! Cependant son approche et son enthousiasme ont fait de ce cours mon plus beau souvenir en tant qu'étudiante. Ce fut une révélation, j'oubliai alors tous mes projets passés et je m'engageais dans une poursuite d'études en psychologie cognitive. Après une maîtrise en psychologie et un DEA en sciences cognitives durant lesquels j'ai continué à travailler avec Jean-Pierre, me voilà en 2003, engagée dans une thèse portant sur le rôle de l'expérience motrice dans la perception visuelle des mouvements humains. Cette thèse a été une aventure scientifique et humaine que j'ai pu mener à bien en grande partie grâce à la bienveillance et aux conseils de mon directeur qui a su me guider et petit à petit me rendre autonome tout au long de ces trois années, et les choses, n'étaient pas gagnées d'avance loin de là ! Partant de l'idée

PREAMBULE

de montrer l'importance de la motricité dans la perception visuelle des mouvements humains, nous nous retrouvions en fin de deuxième année avec plusieurs résultats intéressants mais qui allaient complètement à l'encontre de ce postulat. Cependant, malgré les doutes que ces résultats suscitaient pour mon directeur et la panique qui me gagna personnellement, nous trouvâmes finalement une autre approche qui se révéla encore plus stimulante même si elle était très peu considérée à cette époque. Ma thèse aurait ainsi pour but de montrer les limites des « théories motrices de la perception ». Durant ces trois années, j'eus aussi l'opportunité de réaliser un stage in-doc qui me permit de faire une autre rencontre déterminante, celle du Professeur Marina Pavlova. Marina, qui avait des convictions un peu différentes de celles de mon directeur me permit de m'ouvrir sur une autre manière de travailler et sur de nouvelles perspectives de recherche mêlant approche comportementale et neuroscience. Cette première rencontre a engagé au fil du temps une collaboration encore présente aujourd'hui. Me voilà donc en 2006, mon doctorat en poche et après une année d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche en psychologie, je faisais une troisième rencontre importante dans ma carrière, celle du Professeur Yann Coello. Yann m'embaucha en tant que post-doctorante au laboratoire URECA de l'Université de Lille 3, sur un projet ANR, qui, il faut bien le dire aujourd'hui, n'était pas vraiment ma spécialité. Il s'agissait en effet de développer un programme permettant l'analyse automatique de mouvements humains, ce que je pensais davantage être dans les compétences d'un informaticien que dans celles d'une ex-doctorante en psychologie ! Cependant, j'appris beaucoup durant cette première année de post-doc et finalement mes compétences sur les mécanismes de la compréhension des mouvements humains se sont avérées plus utiles que je ne le pensais. Cette première année de post-doc fut aussi l'occasion de rencontrer beaucoup de chercheurs et de développer mes compétences dans de nombreux domaines et je fus ravie lorsque l'équipe m'annonça qu'il pouvait me garder neuf mois de plus sur un autre contrat ANR s'intéressant à l'étude des fixations oculaires dans l'analyse des images publicitaires. Cette deuxième année de post-doc me permit de poursuivre mes recherches sur les mécanismes intervenant dans la perception des mouvements humains et de me former à l'analyse des mouvements oculaires avec Laurent Sparrow qui par sa bonne humeur a permis de rendre des analyses très compliquées tout à fait abordables et même attractives. Ayant eu quelques expériences malheureuses en comité de sélection, et commençant à douter sérieusement de la possibilité d'être recrutée un jour en tant qu'enseignant-chercheur, j'effectuais en parallèle de ma deuxième année de post-doctorat un Master 2 professionnel (et oui cela existait encore à l'époque !) de Psychologie spécialité Neuropsychologie à Chambéry.

PREAMBULE

Cette formation fut très enrichissante et me permit de parfaire mes connaissances sur la pathologie et sur le métier de psychologue. Je postulai en même temps sur un financement de la « Japanese Society for the Promotion of Science » (JSPS) qui me permit d'effectuer un séjour post-doctoral de deux mois et demi à l'Université de Tokyo au Japon où je pus travailler avec le Professeur Kazuo Hiraki sur l'étude des corrélats électrophysiologiques lors de l'anticipation d'action. Même si malheureusement, ces analyses n'ont pas pu aboutir à la publication d'un article, ce travail m'a permis de me familiariser avec l'utilisation des potentiels évoqués et fut donc une expérience très enrichissante. A la suite de ce post-doctorat, je fus recrutée à la Faculté des Sciences du Sport de l'Université de Poitiers où j'exerce encore actuellement.

Depuis ma maîtrise de psychologie, le fil conducteur de mes recherches a été l'étude de la perception visuelle des mouvements humains, sujet passionnant pour une grande partie de la communauté scientifique comme en témoignent les presque trois millions de travaux référencés sur *Google Scholar* (« human action observation », recherche effectuée le 11/07/2016). En particulier, au cours de ces années, je me suis intéressée à spécifier les mécanismes intervenant lors de la perception visuelle des mouvements humains et en particulier à déterminer le rôle et les limites du système de production d'action dans les capacités de jugement et d'interprétation des actions humaines. Plus récemment, suivant le cadre théorique de la cognition incarnée, j'ai commencé à étudier le lien pouvant exister entre perception d'action humaines et traitement des verbes d'action ce qui me permet entre autres d'éclairer les débats actuels sur l'implication des représentations sensori-motrices dans le traitement du langage. De manière générale, l'objectif de mes travaux est de replacer la perception visuelle des mouvements humains au centre des investigations afin d'apporter un nouvel éclairage sur cette fonction particulièrement ancrée dans l'évolution et impliquée de manière privilégiée dans les interactions sociales chez l'homme. Au niveau méthodologique, même si la plupart de mes travaux sont de nature comportementale et ont été réalisés chez l'adulte sain, j'ai dès ma thèse eu à cœur d'associer plusieurs méthodologies expérimentales comme les études développementales (bébé, enfants) et neuropsychologiques (maladie de Parkinson, dyslexie) ainsi que des études portant spécifiquement sur les réseaux cérébraux.

Ce document (Volume 1) débute par la présentation de mon curriculum vitae puis présente une synthèse de la littérature ainsi que de mes travaux de recherche sur la perception visuelle des mouvements humains. Pour illustrer mes propos, je m'appuierai sur un ensemble

PREAMBULE

d'études que j'ai menées au cours des dix dernières années. Les publications associées à ces travaux sont regroupées dans un deuxième document (volume 2).

CURRICULUM VITAE

Introduction

INTRODUCTION

Les recherches présentées dans ce manuscrit s'insèrent dans le champ des neurosciences cognitives et visent plus particulièrement à mieux comprendre les liens existant entre l'action, la perception et le langage. Ce document est divisé en quatre parties.

La première partie est dédiée à la présentation d'une base théorique sur la définition du « mouvement biologique » et les capacités de perception des mouvements humains. Les mécanismes cérébraux et les modèles théoriques permettant de rendre compte de ces capacités perceptives sont également abordés.

La deuxième partie, quant à elle, porte plus spécifiquement sur la question de l'implication du système moteur lors de la perception visuelle de mouvements humains. Après avoir présenté plusieurs expérimentations en faveur de l'utilisation de l'expérience motrice lors de la perception visuelle des mouvements humains, quelques études contradictoires sont relatées. Ces différentes preuves expérimentales sont ensuite discutées à la lumière de plusieurs considérations théoriques aboutissant à la proposition d'un nouveau modèle permettant d'intégrer les différents résultats de la littérature.

Dans la troisième partie, en lien avec l'approche incarnée de la cognition, les capacités de perception visuelle des mouvements humains ne sont plus considérées de manière isolée mais dans le rapport qu'elles entretiennent avec le traitement des verbes d'action. Après avoir résumé, quelques expériences rendant compte du lien existant entre action et langage, cette troisième partie présente une revue des travaux portant spécifiquement sur le lien existant entre observation d'action et traitement des verbes d'action. A la lumière de ces travaux, plusieurs débats théoriques sont abordés concernant notamment les mécanismes sous-tendant le lien action-langage, la systématisme du lien action-langage ou encore le développement du lien action-langage au cours de l'enfance.

Enfin, la quatrième et dernière partie du document présente des perspectives de recherche visant principalement à mieux comprendre les mécanismes à l'origine du lien existant entre perception d'action et langage, à comprendre comment ce lien se développe au cours de l'enfance ou encore le rôle de ce lien sur les capacités de cognition sociale ou dans la rééducation. L'ensemble de ces projets s'inscrivent dans les axes définis par le Centre de Recherche sur la Cognition et l'Apprentissage (CeRCA, UMR 7295; Equipe Attention et Contrôle) et sont en partie au cœur du travail de thèse de Sophie-Anne Beauprez (Co-direction avec Pr L. Toussaint, « Le rôle du système sensori-moteur dans le traitement du langage :

INTRODUCTION

l'importance des caractéristiques spécifiques du mouvement et de l'efficacité motrice chez l'enfant et le jeune adulte », début de la thèse en septembre 2015).

**Partie 1 : Définitions, spécificités et modèles
théoriques de la perception visuelle des
mouvements humains**

Lorsque l'on se réfère à l'étude de la perception visuelle de l'action, on évoque à la fois les expériences testant directement l'observation d'une action réelle qu'elle soit directement perçue ou filmée (voir par exemple Iacoboni et al., 2005), mais aussi les études s'intéressant aux mouvements d'un avatar (voir par exemple Borroni, Gorini, Riva, Bouchard, & Cerri, 2011), à des images statiques représentant le mouvement ("mouvements apparents", voir par exemple Shiffrar & Freyd, 1990) ainsi qu'aux travaux analysant spécifiquement les mouvements dits « biologiques » qui renvoient à une représentation des actions sous forme de séquences animées de points lumineux (voir par exemple Johansson, 1973). Dans ce document, nous allons particulièrement nous intéresser à cette dernière catégorie de mouvement.

I. L'observation d'action : Définitions et spécificités

1) La technique du « point-light display »

Depuis plus de quarante ans, la capacité des êtres humains à percevoir et interpréter les mouvements biologiques a fait l'objet de nombreuses études scientifiques (voir Blake & Shiffrar, 2007; Pavlova, 2012 pour des revues). Tout a commencé en 1973 quand Gunnar Johansson, un chercheur suédois, a découvert que les êtres humains étaient capables de reconnaître très rapidement une action humaine représentée sous la forme d'une séquence animée de point lumineux représentant les articulations d'un acteur en mouvement (technique du « point-light display », voir Figure 1, Johansson, 1973).

De nombreuses recherches ont suivi cette première découverte et ont permis de montrer qu'à partir de ces stimuli très appauvris où seule la dynamique du mouvement est présente, il est possible non seulement de reconnaître l'action produite mais également de savoir si cette action se dirige vers la gauche ou vers la droite (voir par exemple Davila, Schouten, & Verfaillie, 2014) ou même d'accéder à certaines caractéristiques de l'acteur comme le sexe (Kozlowski & Cutting, 1977), l'identité (Beardsworth & Buckner, 1981; Cutting & Kozlowski, 1977; Loula, Prasad, Harber, & Shiffrar, 2005), l'état émotionnel (Atkinson, Dittrich, Gemmell, & Young, 2004; Chouchourelou, Matsuka, Harber, & Shiffrar, 2006; Clarke, Bradshaw, Field, Hampson, & Rose, 2005) ou les intentions (Martel, Bidet-Ildei, & Coello, 2011), ainsi qu'aux caractéristiques des objets qui interagissent avec cet acteur comme le poids (Runeson & Frykholm, 1981).

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

Ainsi, la capacité à reconnaître et interpréter les actions humaines permettrait d'accéder aux états mentaux d'autrui et serait donc impliquée de manière privilégiée dans la compréhension des comportements permettant entre autres l'établissement d'interactions sociales fructueuses (voir Blake & Shiffrar, 2007; Pavlova, 2012 pour des revues).

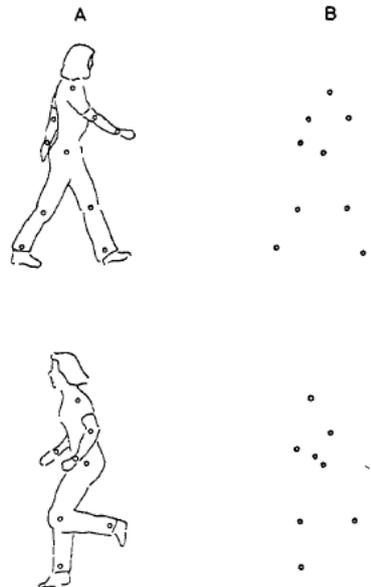


Figure 1 : Illustration de la technique du « point-light display ». La partie A montre deux images statiques représentant un acteur en train de réaliser un mouvement de marche (en haut) et un mouvement de course (en bas). Les ronds représentent les diodes lumineuses placées sur les différentes articulations de l'acteur (tête, épaules, coudes, poignets, hanches, genoux, chevilles). La partie B représente les mêmes mouvements mais en faisant apparaître uniquement les diodes lumineuses. Adapté de « Visual perception of biological motion and a model for its analysis » de Johansson, 1973, *Perception & Psychophysics*, p 202. Copyright 1973 par The Psychonomic Society.

Cette importante sensibilité aux mouvements biologiques se manifeste également par une résistance accrue à la présentation de masques composés d'autres points en mouvements. Ainsi, les mouvements biologiques restent reconnaissables même lorsqu'ils sont associés à la présentation d'un ensemble de points qui se déplacent de manière linéaire, aléatoire, en rotation, ou même avec une dynamique biologique (« scrambled mask ») (Bidet-Ildei, Chauvin, & Coello, 2010; Cutting, Moore, & Morrison, 1988; Hiris, 2007). Nous avons ainsi montré que des adultes sont capables de discriminer la direction d'un mouvement de course (vers la droite vs vers la gauche) imbriqué dans un masque constitué de plus de quatre-vingt-dix points se déplaçant également en suivant une cinématique biologique (Bidet-Ildei et al., 2010, voir Figure 2 et Volume 2 p 7).

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

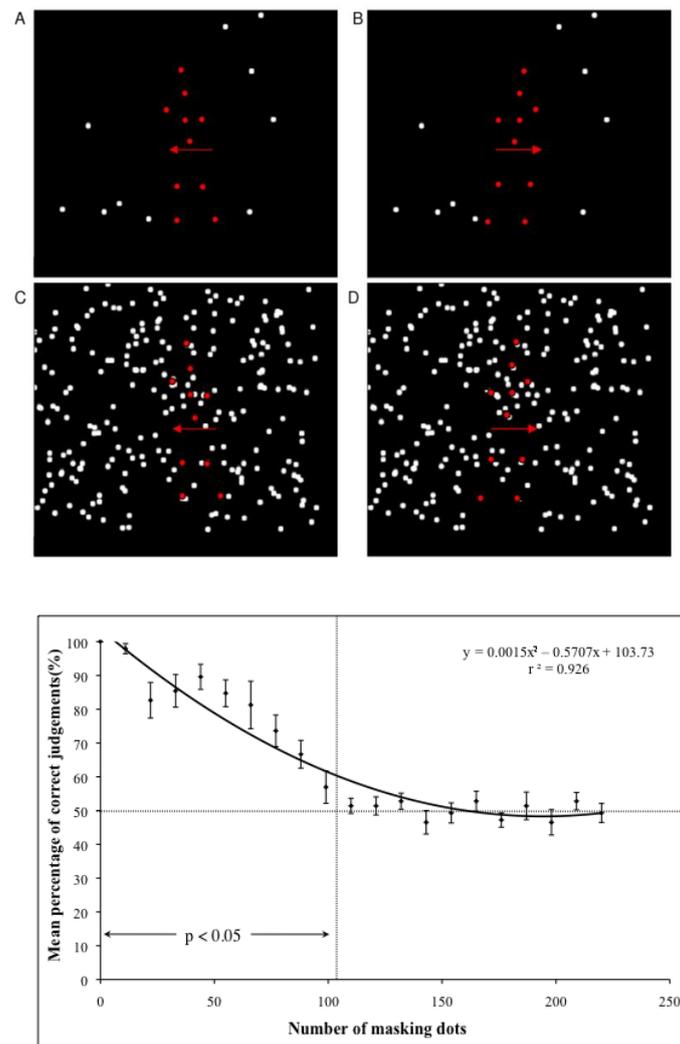


Figure 2 : En haut : Exemples des stimuli utilisés pour la tâche de discrimination des mouvements de course. Les points rouges représentent le mouvement de course alors que les points blancs représentent le masque. Les flèches rouges indiquent la direction de la course. Les panels A et B représentent le mouvement de course avec un masque constitué de 11 points alors que les panels C et D représentent le mouvement de course avec un masque constitué de 220 points. Pendant la tâche, les flèches n'étaient pas présentes, tous les points étaient blancs et les stimuli étaient présentés de manière dynamique durant 600 ms. En bas : Nombre moyen de jugements corrects en fonction du nombre de points constituant le masque. Adapté de « Observing or producing a motor action improves later perception of biological motion: Evidence for a gender effect » de Bidet-Ildei, Chauvin & Coello, 2010, *Acta Psychologica*, p 217-218. Copyright 2010 par Elsevier.

2) L'influence de la cinématique et de l'orientation

L'ensemble de ces capacités seraient principalement reliées à deux caractéristiques du mouvement : l'orientation et la cinématique. Ainsi, la présentation d'un point-light display avec un angle de rotation de plus de 60° par rapport à la normale (appelée « orientation canonique ») va entraîner une baisse très importante de la reconnaissance qui pourra même atteindre 0% lorsque le mouvement est présenté avec un angle de 180° (Pavlova & Sokolov, 2000). Par

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

ailleurs, seule la cinématique biologique, c'est-à-dire la cinématique correspondant à la production motrice du mouvement, est considérée comme uniforme et constante (La Scaleia, Zago, Moscatelli, Lacquaniti, & Viviani, 2014; Runeson, 1974; Viviani & Stucchi, 1992) et le non-respect de cette dynamique est repérée facilement (Bidet-Ildei, Orliaguet, Sokolov, & Pavlova, 2006) et peut entraîner des illusions perceptives. Ainsi, une ellipse associée à une vitesse constante sera plutôt perçue comme un cercle (Viviani & Stucchi, 1989). De la même manière, seuls les mouvements produits avec une vitesse respectant les lois de production motrice (c'est-à-dire le principe d'isochronie pour les mouvements morphocinétiques et la loi de Fitts pour les mouvements topocinétiques¹) sont considérés comme « correct » c'est-à-dire ni trop rapides ni trop lents (Bidet-Ildei, Méary, & Orliaguet, 2006; Méary, Chary, Palluel-Germain, & Orliaguet, 2005) et ces jugements perceptifs peuvent être perturbés lorsque la cinématique biologique n'est plus respectée (Bidet-Ildei, Kitromilides-Salerio, Orliaguet, & Badets, 2011; Martel et al., 2011; Pozzo, Papaxanthis, Petit, Schweighofer, & Stucchi, 2006; Stadler, Springer, Parkinson, & Prinz, 2012). Dans une de ces expériences (Martel et al., 2011, Volume 2 p 18), nous avons demandé à 14 sujets d'anticiper la fin d'un mouvement de pointage présenté sous la forme d'une séquence animée de points lumineux s'arrêtant à 60% de sa trajectoire. Les résultats ont montré des performances diminuées avec une erreur spatiale augmentée de plus de 10 mm dans les conditions non-biologiques (vitesse constante, vitesse croissante et vitesse inverse) par rapport à la condition biologique (Voir Figure 3).

¹ Le principe d'isochronie se réfère au fait que le temps de mouvement n'est pas proportionnel à la taille de celui-ci (Viviani & Flash, 1995). La loi de Fitts se réfère au fait que le temps de mouvement dépend de distance de la cible à atteindre ainsi que de sa largeur (Fitts, 1954)

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

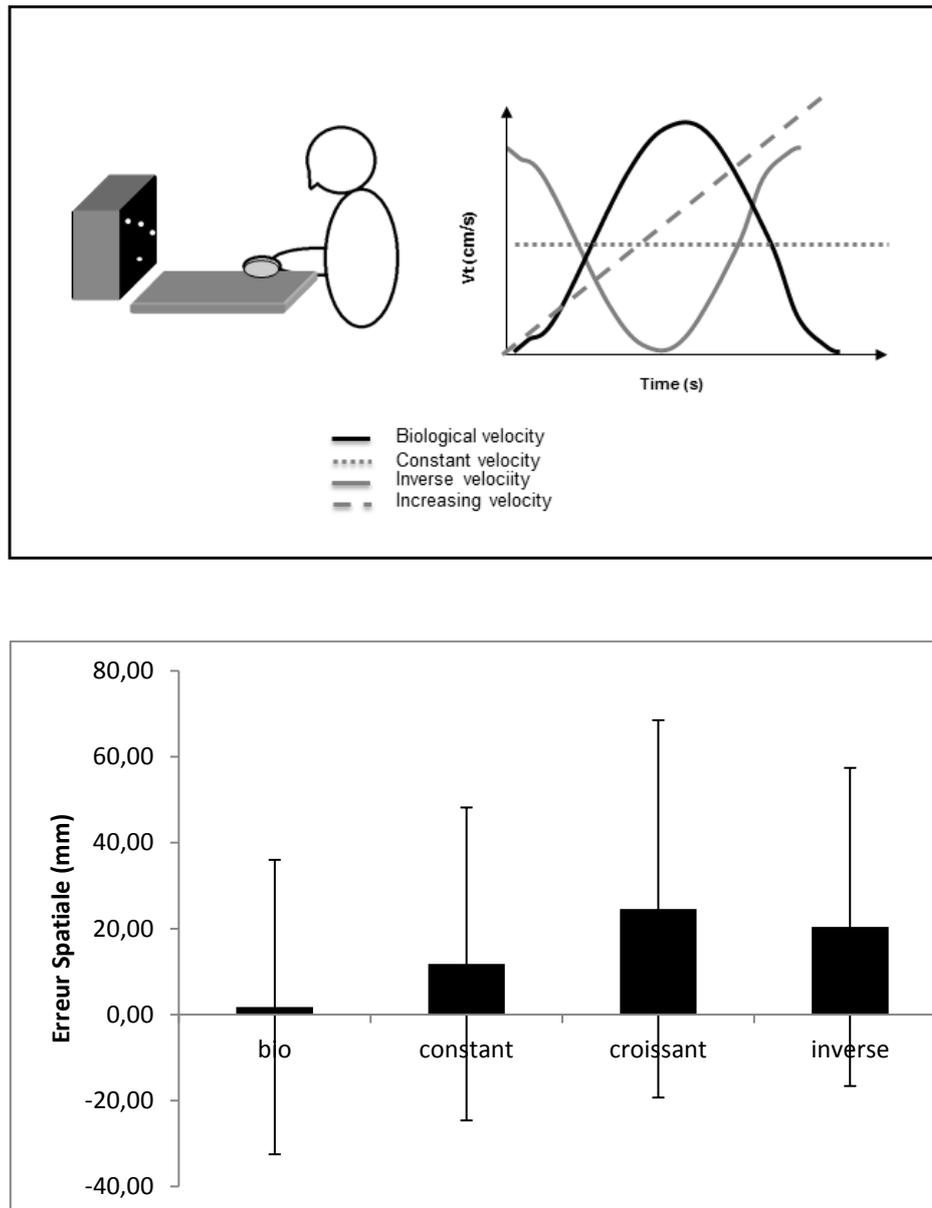


Figure 3 : En haut : Représentation schématique de la procédure expérimentale. Les sujets voyaient sur un écran une séquence animée représentant un mouvement de pointage associé à différentes cinématiques (voir en haut à droite). Le mouvement s'arrêtait à 60% de la trajectoire et la tâche des sujets était de déterminer la position finale de la cible. En bas : Moyenne et erreur standard de l'erreur spatiale (en mm) entre la position donnée par le sujet et la position réelle de la cible en fonction de la cinématique du mouvement. Adaptée de « Anticipating the terminal position of an observed action: Effect of kinematic, structural, and identity information » de Martel, Bidet-Ildei & Coello, 2011, *Visual Cognition*, p 788. Copyright 2011 par Psychology Press.

De manière intéressante, cette sensibilité accrue aux mouvements biologiques apparaît très tôt au cours du développement (Bardi, Regolin, & Simion, 2011, 2014; Bidet-Ildei, Kitromilides, Orliaguet, Pavlova, & Gentaz, 2014; Meary, Kitromilides, Mazens, Graff, & Gentaz, 2007; Simion, Regolin, & Bulf, 2008). Ainsi seulement quelques jours après leur

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

naissance, les nouveau-nés sont capables de discriminer des actions humaines et non-humaines (Meary et al., 2007) et présentent déjà une préférence pour les mouvements suivant une orientation canonique et une cinématique biologique (Simion et al., 2008). Cette sensibilité aux mouvements biologiques se retrouve également chez de nombreuses espèces animales telles que les chats (Blake, 1993), les poules (Vallortigara, Regolin, & Marconato, 2005), les dauphins (Herman, Morrel-Samuels, & Pack, 1990), les pigeons (Omori, 1996), les singes (Oram & Perrett, 1994; Parron, Deruelle, & Fagot, 2007) ou encore les poissons (Schluessel, Kortekamp, Cortes, Klein, & Bleckmann, 2015) allant dans le sens d'une capacité génétique programmée et reliée à l'évolution des espèces (Bardi et al., 2014; Johnson, 2006).

Chez l'homme, l'ensemble de ces facultés reposeraient sur l'implication d'un réseau cortical spécifique associant des aires visuelles et des aires motrices.

II. Les circuits neuronaux impliqués dans la perception visuelle des mouvements humains

L'association de différentes techniques d'investigation incluant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), la topographie par émission de positon (TEP), la stimulation magnétique transcranienne (TMS) et les études neuropsychologiques chez l'homme ainsi que les enregistrements cellulaires chez le singe ont permis de montrer que la perception visuelle des mouvements biologiques engageait un réseau cérébral spécifique (voir Giese & Poggio, 2003 pour une revue) incluant le gyrus lingual (Servos, Osu, Santi, & Kawato, 2002), le gyrus fusiforme (E. Grossman et al., 2000; Michels, Kleiser, de Lussanet, Seitz, & Lappe, 2009; Peelen, Wiggett, & Downing, 2006; Vaina, Solomon, Chowdhury, Sinha, & Belliveau, 2001), l'amygdale (Bonda, Petrides, Ostry, & Evans, 1996), le cortex pré-moteur (Saygin, Wilson, Hagler, Bates, & Sereno, 2004; van Kemenade, Muggleton, Walsh, & Saygin, 2012), le gyrus frontal inférieur (Saygin et al., 2004), le lobule pariétal inférieur (Bonda et al., 1996; Grézès et al., 2001), le cervelet (Sokolov et al., 2012; Sokolov, Erb, Grodd, & Pavlova, 2014; Sokolov, Gharabaghi, Tatagiba, & Pavlova, 2010; Vaina et al., 2001), une partie du cortex occipital latéral intervenant dans la reconnaissance des parties du corps (extra-striate Body area, EBA, Downing, Peelen, Wiggett, & Tew, 2006; E. Grossman & Blake, 2002; Jastorff & Orban, 2009; Peelen et al., 2006) ainsi que le sillon temporal supérieur (STS, Beauchamp, Lee, Haxby, & Martin, 2003; E. Grossman et al., 2000; E. Grossman, Battelli, & Pascual-Leone, 2005; E.

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

Grossman & Blake, 2002; E. Grossman, Jardine, & Pyles, 2010; Jellema & Perrett, 2003; Michels et al., 2009; Pelphrey, Morris, Michelich, Allison, & McCarthy, 2005; Peuskens, Vanrie, Verfaillie, & Orban, 2005; Puce & Perrett, 2003; Saygin, 2007; Sokolov et al., 2012, 2014; van Kemenade et al., 2012).

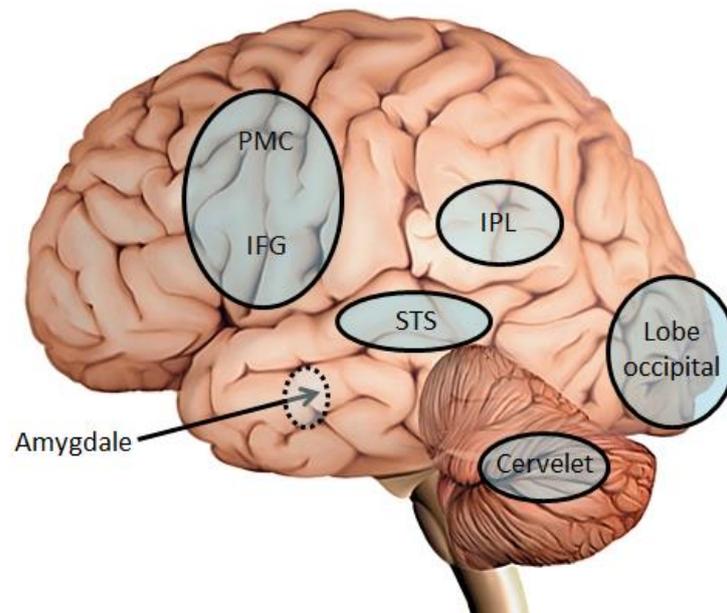


Figure 4: Schéma représentant les différentes structures cérébrales impliquées lors de la perception visuelle des mouvements biologiques. PMC représente le cortex pré-moteur, IFG le gyrus frontal inférieur, IPL le lobule pariétal inférieur et STS le sillon temporal supérieur. Dans la figure, l'amygdale est indiquée en pointillés car elle n'est pas visible sur la face externe du cerveau. Cette illustration s'inspire de l'article de Iacobini & Dapretto 2006. L'image du cerveau a été modifiée à partir d'une image récupérée sur le site internet suivant : <http://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Enc%C3%A9phale/1001411>. Dessin Michel Saemann - Archives Larousse.

La perception visuelle des mouvements humains sollicite donc un large réseau incluant à la fois des aires cérébrales impliquées dans la perception visuelle des mouvements mais aussi, des aires impliquées dans la production et l'interprétation des actions (Urgesi, Candidi, & Avenanti, 2014), dont le « système miroir », qui regroupent plusieurs aires impliquées à la fois lors de la production et de l'observation d'actions (voir Cattaneo & Rizzolatti, 2009; Iacoboni & Mazziotta, 2007; Sale & Franceschini, 2012 pour des revues). De manière intéressante, il est établi que certaines de ces aires pourraient être plus ou moins activées en fonction de la familiarité motrice du mouvement perçu. Ainsi, le jugement de ces propres mouvements entraînerait une activation supérieure au niveau du lobe pariétal inférieur, du gyrus angulaire

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

gauche et du cortex pré-moteur alors que le jugement des mouvements d'autrui entraînerait une activation plus importante au niveau du sillon intra-pariétal gauche et du gyrus supramarginal droit suggérant que le réseau cérébral sollicité lors de la perception d'un mouvement biologique pourrait être directement en lien avec les caractéristiques du mouvement perçu (Bischoff et al., 2012).

Afin de mieux spécifier le décours temporel des activations cérébrales lors de la perception de mouvements biologiques, plusieurs études utilisant des techniques de magnétoencéphalographie (MEG, Lange, Pavlidou, & Schnitzler, 2015; Pavlidou, Schnitzler, & Lange, 2014a, 2014b; Pavlova, Bidet-Ildei, Sokolov, Braun, & Krageloh-Mann, 2009; Pavlova, Birbaumer, & Sokolov, 2006; Pavlova, Lutzenberger, Sokolov, & Birbaumer, 2004; Virji-Babul, Cheung, Weeks, Herdman, & Cheyne, 2007) et potentiels évoqués (ERP, Bottari et al., 2015; Fraiman, Saunier, Martins, & Vargas, 2014; Hirai, Senju, Fukushima, & Hiraki, 2005; Jahshan, Wynn, Mathis, & Green, 2015; Jokisch, Daum, Suchan, & Troje, 2005; Saunier et al., 2013) ont été réalisées. Les résultats montrent que la perception de « point-light display » représentant un marcheur entraîne une oscillation gamma (25-30 Hz) précoce (100 ms après la présentation du stimulus) non spécifique dans le cortex occipital suivie d'une succession d'oscillations gamma spécifiques apparaissant dans le lobe pariétal (130 ms) puis temporal droit (170 ms) confirmant l'implication d'un réseau occipito-pariéto-temporal dans la reconnaissance des mouvements biologiques (Pavlova et al., 2004). Par ailleurs, les études en électroencéphalographie (EEG) ont permis de montrer une diminution significative des oscillations dans la bande de fréquence mu (8-13Hz) lors de la perception des mouvements biologiques confirmant l'implication du système miroir lors de la perception visuelle des mouvements humains (Ulloa & Pineda, 2007; Virji-Babul et al., 2008).

Pour aller plus loin dans ces investigations, nous avons tenté de déterminer le rôle de la connectivité cérébrale dans la sensibilité aux mouvements biologiques (Pavlova et al., 2009, Volume 2 p 33). Pour cela, nous avons comparé les activités cérébrales observées lors de la détection de mouvements biologiques chez des adolescents sains ou présentant une leucomalacie périventriculaire entraînant un défaut de connectivité cérébrale (voir Figure 5).

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

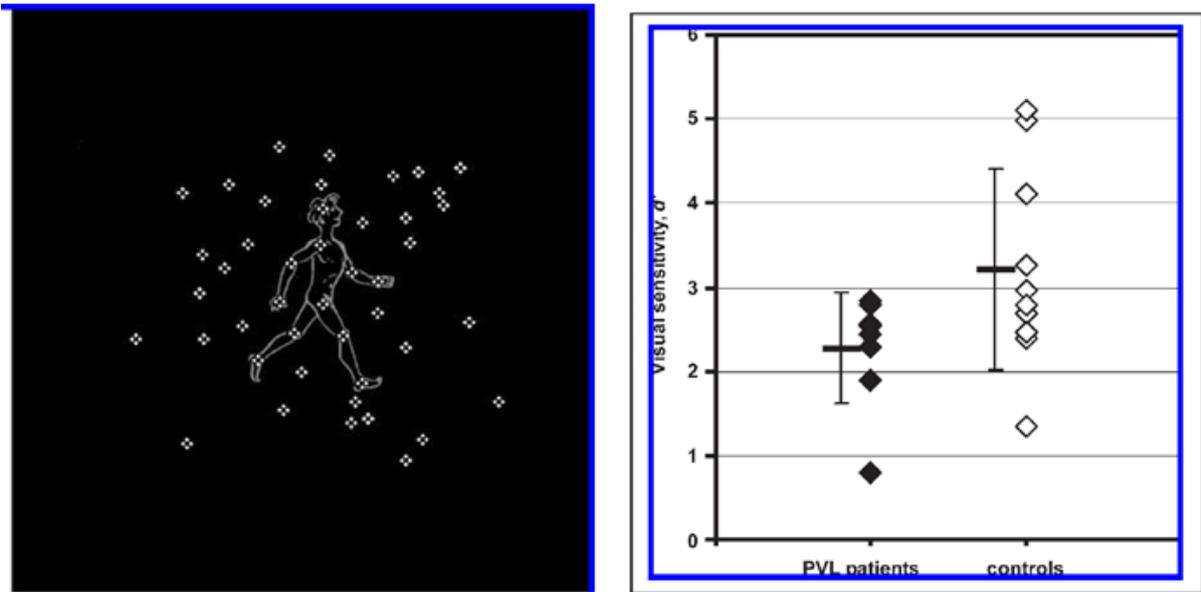


Figure 5 : A gauche : Procédure utilisée dans la tâche. Les sujets voyaient une séquence animée représentant un ensemble de points et devaient déterminer si oui ou non il y avait un marcheur inclus dans la séquence. Lors de la tâche, le marcheur était également représenté sous la forme d'une séquence animée de points. A droite) résultats obtenus dans la tâche de détection chez les sujets présentant une lésion périventriculaire et chez les sujets contrôle. Adapté de « Neuromagnetic response to body motions and brain connectivity » de Pavlova, Bidet-Ildei, Sokolov, Braun & Krageloh-Mann, 2009, *Journal of Cognitive Neuroscience*, p 838-840. Copyright 2009 par MIT Press Journals.

Les résultats ont permis de mettre en évidence une capacité de détection plus faible chez les sujets présentant une leucomalacie périventriculaire associée à une diminution de l'activité du lobe frontal et temporal droit (Voir figure 6).

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

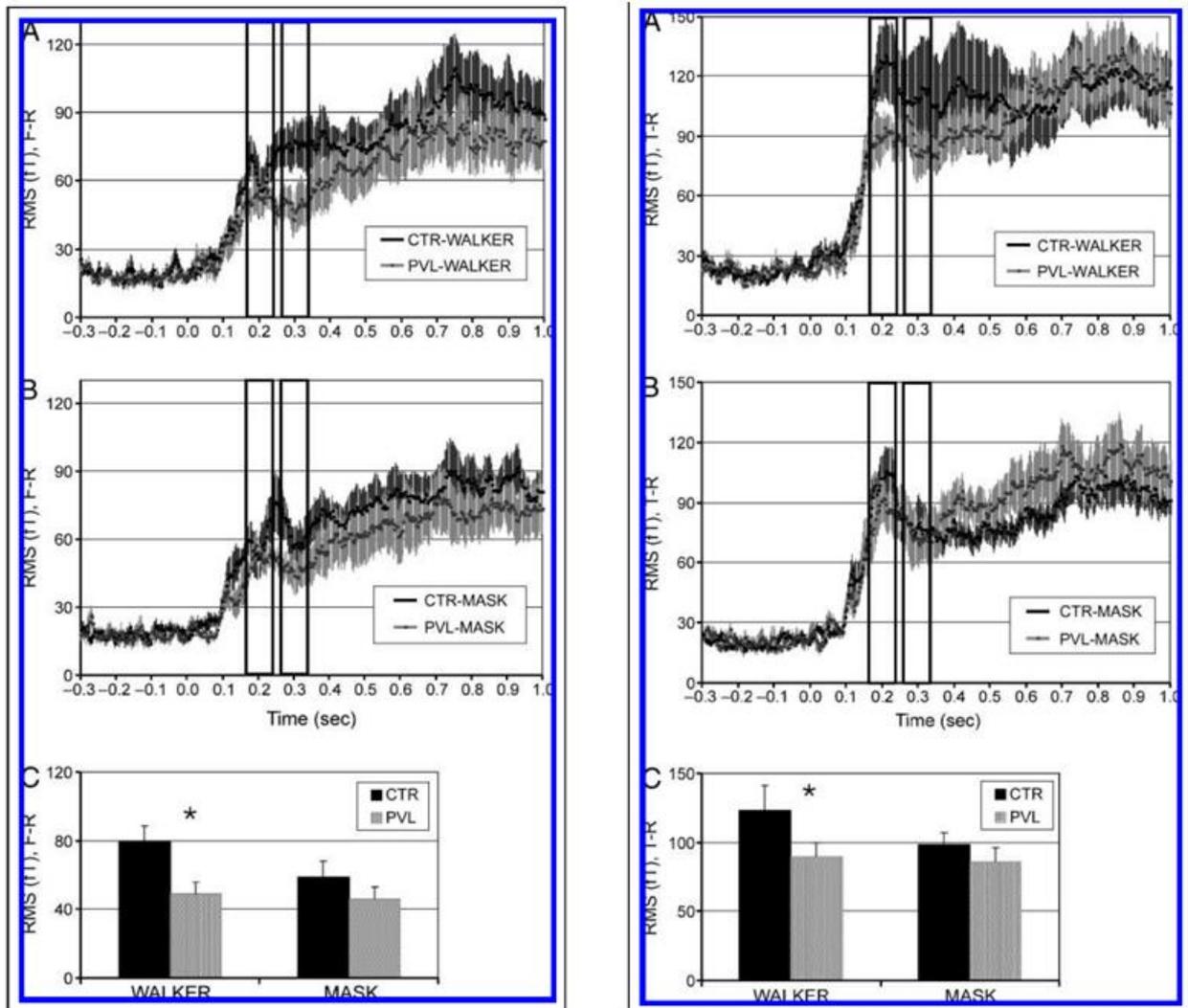


Figure 6 : Amplitude de la moyenne quadratique observée dans le cortex frontal droit (à gauche) et le cortex temporal droit (à droite) pour les sujets contrôle et les sujets atteints de lésions périventriculaires. Les graphiques A et B représentent la réponse corticale observée au cours du temps en femo-tesla lorsque le stimulus était présent (A) ou absent (B). Les rectangles indiquent les fenêtres temporelles d'intérêt. Les graphiques du bas montrent les différences significatives en termes d'amplitude entre 276 et 340 ms dans le lobe frontal et entre 180 et 244 ms dans le lobe temporal. Adapté de « Neuromagnetic response to body motions and brain connectivity » de Pavlova, Bidet-Ildei, Sokolov, Braun & Krageloh-Mann, 2009, *Journal of Cognitive Neuroscience*, p 838-840. Copyright 2009 par MIT Press Journals.

Comme cette diminution des activités cérébrales n'était retrouvée que pour le jugement de mouvements biologiques mais pas lorsque le stimulus représentait seulement un masque, ces résultats suggèrent l'implication du cortex temporal et frontal droit dans la détection de mouvements biologiques.

III. Les modèles de la perception visuelle des mouvements humains

Plusieurs conceptions théoriques ont essayé de rendre compte de la très grande sensibilité du système visuel aux mouvements biologiques. Historiquement, cette sensibilité a plutôt été expliquée par des extrapolations computationnelles à partir d'informations perceptives basiques (Giese & Poggio, 2003; Giese, Thornton, & Edelman, 2008; Johansson, 1973; Lange & Lappe, 2006; Theusner, de Lussanet, & Lappe, 2014). Un peu plus tard, s'appuyant sur l'intervention majeure des circuits moteurs lors de la perception visuelle des mouvements humains, plusieurs théories ont suggéré une intervention directe du système moteur que ce soit sous la forme de représentations (Hommel, Musseler, Aschersleben, & Prinz, 2001; Jeannerod, 2001; Rizzolatti & Sinigaglia, 2010; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007; M. Wilson & Knoblich, 2005) ou de couplages sensori-moteurs de bas niveau (Hamker, 2003; O'Regan & Noë, 2001). Sans détailler l'ensemble de ces conceptions, nous présenterons dans cette partie quelques modèles théoriques qui permettent de rendre compte de la sensibilité du système visuel aux mouvements biologiques. Nous insisterons particulièrement sur les théories motrices de la perception qui ont davantage guidé nos travaux.

1) Un exemple de modèle computationnel : le modèle « hiérarchique » de Giese & Poggio (2003)

De manière générale les modèles computationnels expliquent les capacités du système visuel pour la reconnaissance des mouvements biologiques par l'utilisation de calculs basés sur l'extraction de la forme et/ou de la dynamique des stimuli perçus. Nous développerons ici, plus particulièrement le modèle « hiérarchique » de Giese & Poggio qui est l'un des modèles de base de cette conception.

Pour construire ce modèle, les auteurs se sont basés sur les activations cérébrales retrouvées lors de l'observation des mouvements humains (Voir Partie 1.II, p 40) et ont proposé un traitement en parallèle des informations de forme et de mouvement (voir Figure 7). Dans chaque voie, des détecteurs neuronaux spécifiques permettraient d'intégrer de manière hiérarchique des informations de plus en plus complexes.

Dans cette conception, la reconnaissance des mouvements biologiques se feraient donc grâce à « un modèle prédictif basé sur l'existence de patterns prototypiques qui seraient

PARTIE 1 : DEFINITIONS, SPECIFICITES ET MODELES THEORIQUES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

potentiellement stockés dans des neurones spécifiques des voies ventrale et dorsale² du système visuel » (Giese & Poggio, 2003; p 179).

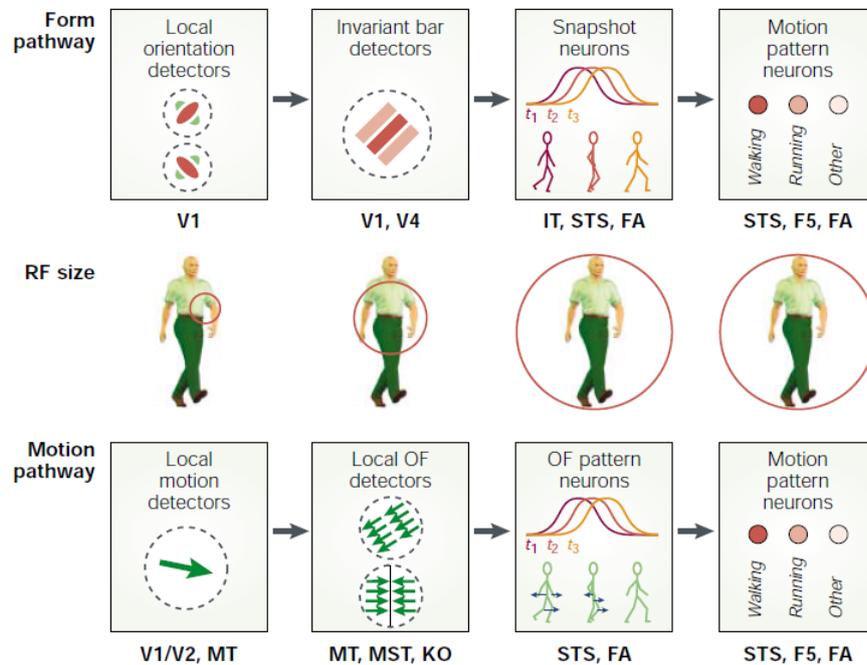


Figure 7 : Modèle hiérarchique de Giese & Poggio (2003). Les cercles rouges indiquent approximativement la taille des champs récepteurs. Les différentes abréviations correspondent à des structures cérébrales que l'on retrouve chez l'homme et/ou chez le singe. V1 : cortex visuel primaire, V2 : Cortex visuel secondaire, V4/MT : aires visuelles de haut niveau, STS : sillon temporal supérieur, IT : Cortex temporal inférieur, KO : Région occipitale du mouvement, F5 : cortex pré-moteur chez le singe, FA : Aire de reconnaissance des visages, OF : Flux optique, RF : champ récepteur. Extrait de « Neural mechanisms for the recognition of biological movements » de Giese & Poggio, 2003, *Nature Review Neuroscience*, p 181. Copyright 2003 par Nature Publishing Group.

Ce modèle permet de rendre compte de nombreux résultats expérimentaux et a donné lieu à plusieurs travaux qui tentent entre autre d'estimer de manière plus précise l'importance de l'analyse de la forme et du mouvement dans la reconnaissance des mouvements biologiques (voir par exemple Casile & Giese, 2005; Lu, 2010; Thurman, Giese, & Grossman, 2010; Thurman & Grossman, 2008). Il est en particulier très intéressant pour rendre compte de la sensibilité du système visuel humain aux mouvements biologiques non-humains c'est-à-dire

² Je fais référence ici aux voies visuelles définies par Goodale & Milner (1992). Les deux voies traiteraient l'information concernant les traits des objets et leurs relations spatiales mais chaque voie utiliserait différemment cette information. Les traitements réalisés dans la voie ventrale concerneraient les caractéristiques des objets et de leurs relations permettant la formation de représentations perceptives à long terme. Elle serait ainsi principalement impliquée dans l'identification. Au contraire, la voie dorsale travaillerait dans l'instant et pas pour du long terme. Elle traiterait les localisations et les dispositions spatiales des objets dans un cadre de référence égocentrique afin qu'elles soient utilisables de manière directe par le système moteur pour planifier des actions.

n'appartenant pas au répertoire moteur des observateurs. Cependant ces théories ont été remises en question par d'autres modèles qui considèrent que la reconnaissance des mouvements biologiques ne fait pas uniquement appel à de processus visuels mais nécessite également l'intervention de sa propre expérience motrice : ce sont les théories motrices de la perception.

2) Les théories motrices de la perception

Dans cette conception théorique, l'intervention du système moteur est considérée comme nécessaire pour rendre compte des capacités de perception visuelle des mouvements humains. Nous présenterons ici succinctement (pour plus de détails, voir Bidet-Ildei, Orliaguet, & Coello, 2011, Volume 2 p 44), trois modèles majeurs qui sont actuellement au cœur des débats : la théorie du codage commun (Hommel et al., 2001; Knoblich & Prinz, 2005; Prinz, 1997), la théorie de la résonance motrice (Viviani, 2002) et la théorie de la simulation motrice (Jeannerod, 2001).

a) Théorie du codage commun

Cette théorie postule que les représentations visuelles et motrices se baseraient sur des codes communs qui représenteraient, de manière abstraite, les conséquences spatiales et sensorielles d'actions potentielles (Hommel et al., 2001; Knoblich & Prinz, 2005; Prinz, 1997). Ce codage commun serait directement fonction de l'expérience acquise au cours des différentes associations entre production d'action et conséquence sensorielles observées. Il permettrait entre autre de rendre compte de l'aspect amodal des représentations perceptives de l'action (Viviani, Baud-Bovy, & Redolfi, 1997) et des illusions perceptives observées lorsque l'action perçue n'est pas en correspondance avec la représentation que le participant a de cette action (Viviani & Stucchi, 1992). Notons que pour Schütz-Bosbach & Prinz (2007), l'existence de ces représentations communes mènent directement à l'idée de l'activation automatique d'une résonance motrice (c'est-à-dire d'une activation du système moteur lorsqu'un individu observe une action) et d'une résonance perceptive (c'est-à-dire une activation du système perceptif lorsqu'un individu réalise une action, voir Figure 8).

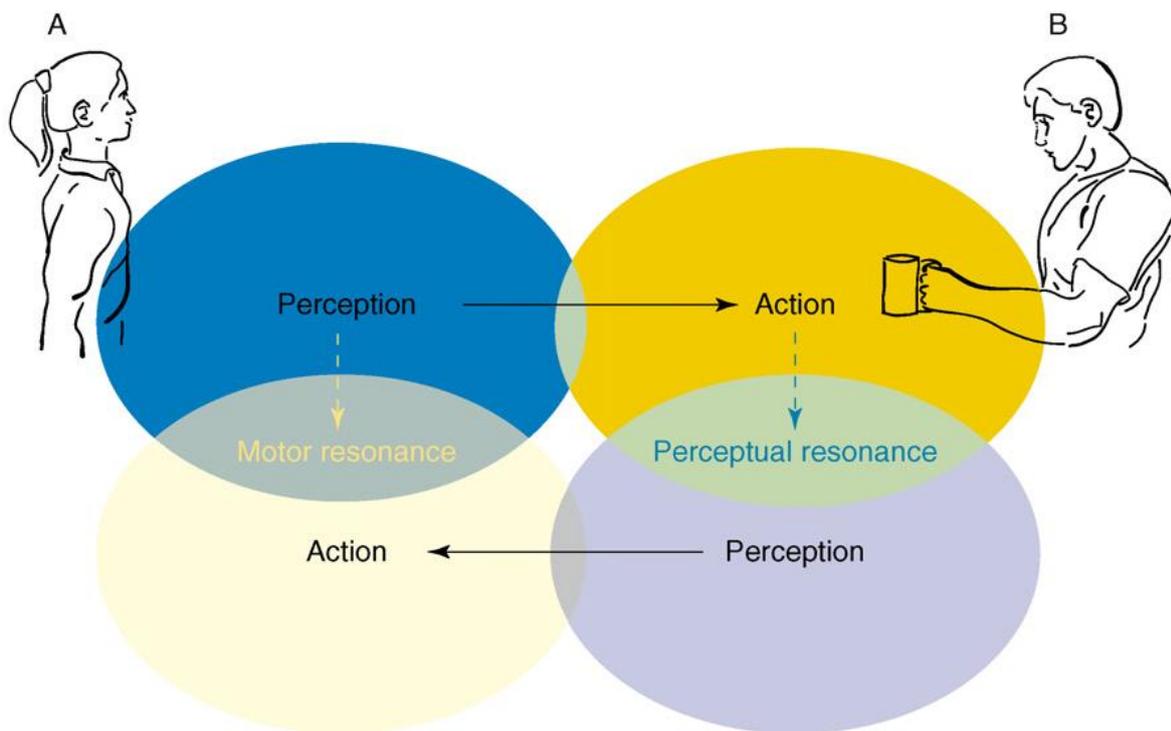


Figure 8 : schéma représentant l'intervention d'une résonance motrice lorsque le sujet observe une action (partie gauche de la figure) et d'une résonance perceptive lorsque le sujet produit une action (partie droite de la figure). Reproduit de "Perceptual resonance: action-induced modulation of perception." de Schütz-Bosbach et Prinz, 2007, *Trends in Cognitive Sciences*, p. 350. Copyright 2007 par Springer.

Cependant, ces notions de résonance ne nécessitent pas forcément l'intervention de représentations communes et c'est ce que nous allons aborder dans la suite du manuscrit.

b) Résonance motrice

Dans cette conception, l'action et la perception ne se baseraient plus sur des codes communs mais sur des représentations spécifiques codées dans des systèmes différents qui sont en interaction. Ainsi, la mise en jeu d'un système entrainerait la mise en jeu automatique de l'autre sans pour autant que les deux systèmes fassent appel aux mêmes représentations (Viviani, 2002). Tout se passerait ici, comme si le système moteur et le système perceptif était des oscillateurs parallèles fonctionnant en perpétuelle interaction. Ainsi, l'observation d'une action déclencherait de manière automatique l'intervention du système moteur et inversement la production d'une action déclencherait de manière automatique l'intervention du système perceptif. Cette théorie permet entre autre d'expliquer la notion de « préférence perceptive » qui correspondrait alors à la valeur pour laquelle les oscillateurs sont le plus en phase c'est-à-dire à la production habituelle des sujets (Bidet-Ildei, Méary, et al., 2006).

c) La simulation motrice

Cette conception fait suite aux travaux montrant l'équivalence fonctionnelle entre produire, imaginer et observer une action (voir par exemple Grèzes & Decety, 2001). Elle postule que l'observation d'une action déclencherait de manière automatique une simulation intériorisée de cette action permettant ainsi sa reconnaissance et son interprétation (Jeannerod, 2001). De manière intéressante, cette théorie permet de rendre compte de l'équivalence de réseaux cérébraux sollicités lors de la production et de l'observation d'action identiques (voir par exemple Gazzola & Keysers, 2009). Elle permet également d'expliquer le fait que les activations cérébrales sollicitées lors de l'observation d'action dépendent directement du mouvement perçu (voir par exemple Chaminade, Meary, Orliaguet, & Decety, 2001) et donc des aires cérébrales sollicitées lors de la production de ces actions. Ainsi, le jugement d'un mouvement de pointage va plutôt entraîner l'activation du cortex pré-moteur gauche et du sillon intra-pariétal droit alors que l'opercule frontal gauche et la partie supérieure du lobe pariétal seraient plus impliqués dans le jugement de mouvements d'écriture (Chaminade et al., 2001).

De manière générale, il s'oppose donc dans la littérature des théories qui estiment que la perception visuelle des mouvements biologiques est entièrement dépendante de processus visuels alors que d'autres théories postulent au contraire que l'intervention du répertoire moteur des participants est nécessaire. L'objectif de la partie suivante sera de déterminer dans quelle mesure l'expérience motrice joue un rôle lors du jugement de mouvements humains présentés sous la forme de « point-light display ».

Partie 2 : Rôle de l'expérience motrice dans la perception visuelle des mouvements humains

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

L'intérêt pour la mise en évidence du rôle de l'expérience motrice dans la perception visuelle des mouvements humains date de la fin des années 1990 et est fortement relié à la découverte de l'implication du système de production d'action lors du jugement des mouvements humains (Voir Partie 1.II p 40). Pourtant, dès le début des années 80, une étude avait déjà soulevé le rôle de l'expérience motrice dans les capacités de reconnaissance des mouvements humains en montrant que l'expérience de réalisation d'un mouvement peut être parfois supérieure à l'expérience visuelle (Beardsworth & Buckner, 1981). Ainsi, les auteurs ont observé que la reconnaissance de sa propre démarche est plus facile que la reconnaissance de la démarche de personnes avec lesquelles on interagit fréquemment. Plusieurs recherches ont ensuite confirmé ce premier résultat même si d'autres travaux ont émis des limites quant à l'implication systématique de l'expérience motrice lors du jugement de mouvements humains (voir Bidet-Ildei, Orliaguet, et al., 2011 pour une revue, Volume 2 p 44). Dans cette partie, nous discuterons les travaux montrant l'implication de l'expérience motrice et ses limites.

I. Expérience motrice et perception visuelle des mouvements humains

L'implication de l'expérience motrice a principalement été démontrée à l'aide d'études comportementales et neuropsychologiques pour les travaux réalisés à l'aide du paradigme du point-light display. En comportement, par exemple, Casile & Giese (2006) ont montré que la capacité de discrimination d'une action présentée sous la forme d'une séquence animée de points lumineux était reliée à la capacité à produire cette action. Ainsi, les auteurs ont montré qu'entraîner des participants à marcher avec une différence de phases entre les articulations controlatérales de 270° (alors que la différence de phases normale est de 180°) permettait une amélioration des performances dans la discrimination de ces mouvements. Comme l'entraînement était effectué les yeux bandés, cette étude montre qu'un entraînement moteur peut directement influencer les performances de jugement visuel de mouvements biologiques.

Nous avons confirmé ces résultats en 2010 (Bidet-Ildei et al., 2010, Volume 2 p 7) en montrant qu'un amorçage moteur de seulement 30 secondes peut améliorer significativement les performances de discrimination des sujets. Dans cette expérience, nous avons demandé à soixante-quatre participants de déterminer si un mouvement de course représenté sous la forme d'une séquence animée de point lumineux montrait un acteur courant vers la droite ou vers la

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

gauche (Voir Figure 9A). Les points constituant la séquence de course étaient entourés d'autres points (de 110 à 220 points) présentés également de manière dynamique (cinématique biologique) afin de masquer le mouvement cible et de rendre très difficile le jugement de la direction (voir Bidet-Ildei et al., 2010 Expérience 1 pour plus de détails). Avant de réaliser cette tâche, les participants étaient soumis à différents types d'amorçage : neutre, visuel ou moteur (voir Figure 9B).

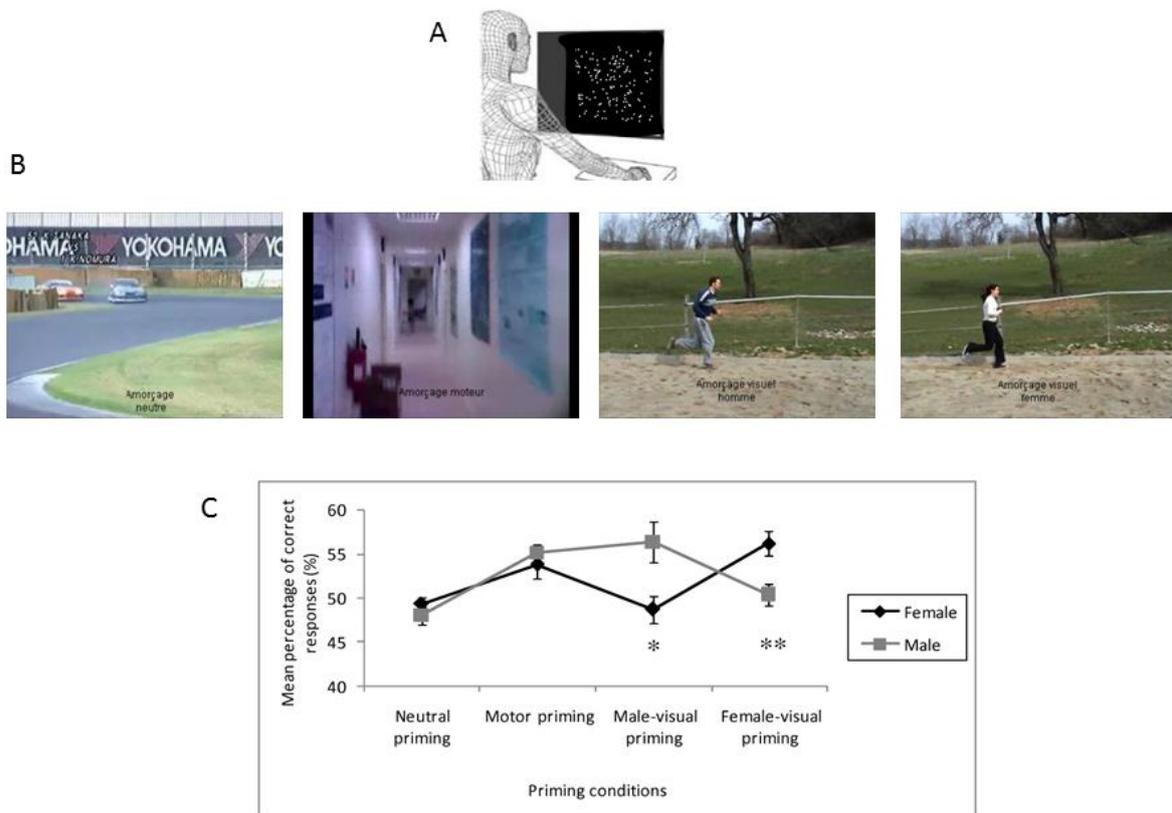


Figure 9 : A) Exemple de la tâche à effectuer dans l'expérience de Bidet-Ildei et al., 2010. A partir de la séquence animée de points les participants devaient déterminer si le mouvement de course représenté au centre se dirigeait vers la droite ou vers la gauche. B) Représentation des différents types d'amorçage proposé avant la réalisation de la tâche (neutre, moteur, visuel homme et visuel femme). C) Résultats obtenus sur la tâche de discrimination. Les Astérisques représentent des différences significatives. Adapté de « Rôle des représentations motrices dans la perception visuelle des mouvements humains » de Bidet-Ildei, Orliaguet & Coello, 2011, p 427, *l'Année Psychologique*. Copyright 2011 par Armand Colin.

L'amorçage neutre consistait dans la présentation d'une vidéo de 30 secondes montrant un extrait d'une course de voitures avec des virages vers la gauche et vers la droite. L'amorçage visuel montrait une vidéo de 30 secondes représentant un homme (amorçage visuel homme) ou une femme (amorçage visuel femme) en train de courir vers la gauche puis vers la droite. Enfin

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

l'amorçage moteur consistait à demander aux participants de courir pendant 30 secondes avant de réaliser la tâche.

Les résultats (Voir Figure 9C) ont permis de mettre en évidence une amélioration significative des capacités de discrimination après un amorçage moteur par rapport à l'amorçage neutre confirmant ainsi le rôle de l'exécution d'action dans les capacités de jugement visuel de mouvements biologiques. Par ailleurs, cette expérience a permis de montrer que le jugement visuel de « point-light display » peut également être amélioré par un amorçage visuel mais seulement s'il existe une correspondance entre le sexe du participant et le sexe de l'acteur présenté en amorçage. Ainsi, les hommes étaient améliorés par un amorçage visuel uniquement en situation « amorçage visuel homme » alors que les femmes ne s'amélioraient que lorsque l'acteur présenté en amorçage visuel était une femme. Ce résultat qui peut refléter soit un effet d'appartenance à un groupe soit un rôle des compétences motrices montre qu'un amorçage visuel peut se révéler moins efficace qu'un amorçage moteur dans le jugement de mouvements humains représentés sous la forme de « point-light display ».

Par ailleurs, il a été montré que la capacité à juger la cinématique des gestes particulièrement impliquée dans l'anticipation des séquences de mouvements (Kandel, Orliaguet, & Viviani, 2000) serait reliée à l'expérience motrice des participants. Ainsi, les joueurs de basketball et de football seraient plus performants que les non-joueurs sur des tâches d'anticipation de la hauteur et de la distance maximum d'un saut présenté sous la forme d'un « point-light display » (Weast, Walton, Chandler, Shockley, & Riley, 2014). De la même manière, plusieurs expériences ont montré que les individus étaient plus précis lors du jugement de leur propre mouvement par rapport aux mouvements d'autrui (Bischoff et al., 2012; Martel et al., 2011). Ainsi, nous avons montré que l'anticipation de la position finale d'un mouvement de pointage coupé à 60% de sa trajectoire est beaucoup plus précise lorsque le mouvement perçu est le sien (6.3 mm d'erreur) par rapport à celui d'autrui (environ 23 mm d'erreur; Martel et al., 2011, Volume 2 p 18). Ces résultats viennent confirmer une étude de cas montrant des jugements de la cinématique défailants chez une patiente présentant des troubles moteurs (Chary et al., 2004). Ainsi DC, une patiente devenue dysgraphique à la suite d'une lésion du cortex pariétal gauche n'était plus capable d'anticiper correctement la suite d'une séquence de lettres après la présentation dynamique d'une première lettre. Par contre, le jugement de lettres isolées ou de séquence de pointages demeuraient possibles. Comme DC demeurait capable après sa lésion de produire des lettres isolées ainsi que des mouvements de pointage mais éprouvait des difficultés spécifiques à produire des séquences de lettres, cette étude suggère que

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

la capacité à lire et interpréter la cinématique des gestes présentés visuellement est directement reliée à la capacité à produire les actions perçues de manière correcte confirmant l'implication des capacités motrices lors de la perception visuelle des mouvements humains.

L'implication de l'expérience motrice a enfin été confirmée par des études en neuroimagerie concernant la perception visuelle de mouvements humains présentés sous la forme de vidéos réelles. Une des études les plus célèbres dans ce domaine a été celle réalisée par Calvo-Merino et ses collaborateurs qui montrent que l'activation des zones cérébrales motrices (cortex pré-moteur et cortex pariétal) reliée au jugement de mouvements de danse est plus importante lorsque les participants sont experts dans l'activité perçue (danse classique vs capoeira; Calvo-Merino, Glaser, Grezes, Passingham, & Haggard, 2005) confirmant que le répertoire moteur des individus est directement impliqué lors du jugement visuel de mouvements humains (voir aussi Calvo-Merino, Grezes, Glaser, Passingham, & Haggard, 2006).

II. Les limites de l'implication motrice lors de la perception visuelle des mouvements humains

Même si l'implication de l'expérience motrice dans la perception visuelle des mouvements humains a été largement démontrée au cours des vingt-cinq dernières années, plusieurs travaux ont mis en évidence le fait qu'elle n'intervient pas de manière systématique (voir Bidet-Ildei, Orliaguet, et al., 2011 pour une revue, Volume 2 p 44). Ainsi, il est clairement établi que des individus présentant une infirmité motrice cérébrale et n'ayant pas la capacité de marcher depuis leur naissance à la suite d'une leucomalacie périventriculaire conservent des capacités de reconnaissance des mouvements de marche (Pavlova, Staudt, Sokolov, Birbaumer, & Krageloh-Mann, 2003; voir Figure 10). La sensibilité au mouvement biologique se révèle donc indépendante du degré d'expérience motrice montrant clairement que la possibilité à juger des séquences animées représentant des mouvements humains ne nécessite pas toujours l'intervention du répertoire moteur de l'individu. Il est cependant intéressant de noter que les capacités de reconnaissance du mouvement biologique étaient liées à l'étendue des lésions périventriculaires au niveau pariéto-occipital (voir Figure 10) confirmant l'implication de ces régions lors de la perception visuelle des mouvements humains (Voir Partie 1.II p 40).

PARTIE 2 : RÔLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

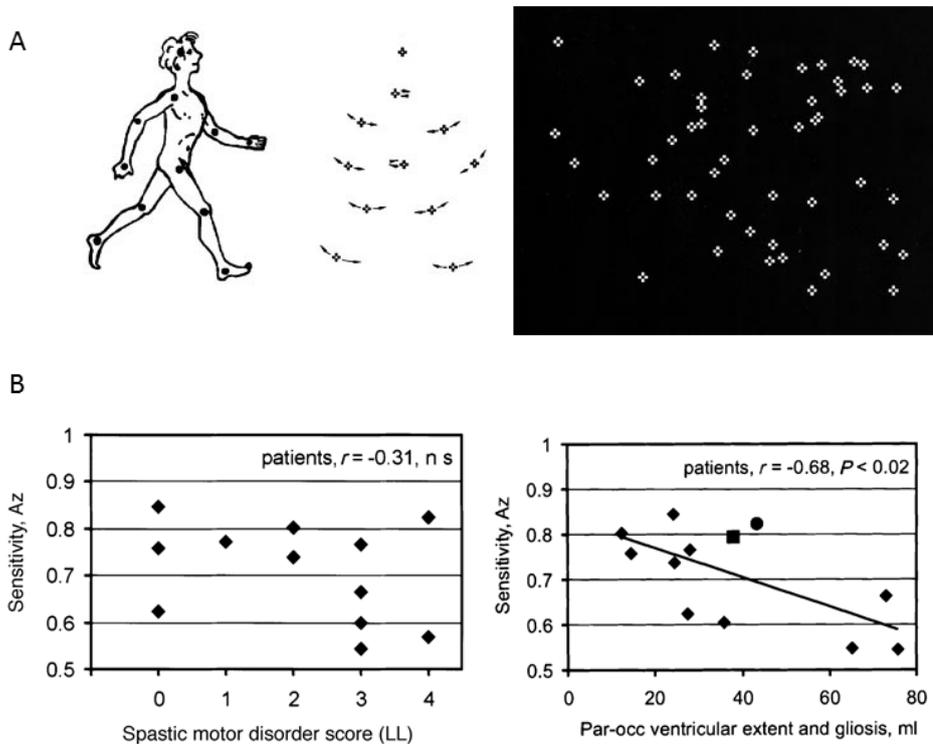


Figure 10 : Stimuli (A) et résultats (B) obtenus dans l'expérience de Pavlova et al., 2003. Adapté de « Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions? Pavlova, Staudt, Sokolov, Birbaumer & Kraëgeloh-Mann, 2003, p 695-697, *Brain*. Copyright 2003 par Oxford University Press.

Cette remise en cause d'une intervention systématique du répertoire moteur lors du jugement de mouvements biologique a été confirmée récemment par Vannuscorps & Caramazza (2016) qui ont montré que des patients atteints de dysplasie des membres supérieurs restent capables d'identifier correctement des mouvements des membres supérieurs présentés sous forme de séquences animées de points lumineux. De manière intéressante, une autre expérience récente a également confirmé ces données chez le sujet sain en montrant que la capacité à détecter des changements cinématiques fins lors de la perception de séquences animées représentant des mouvements humains n'était pas reliée à l'expérience motrice des participants (Giblin, Farrow, Reid, Ball, & Abernethy, 2016). L'expérience visuelle seule pourrait donc être suffisante (au moins dans certains cas) pour juger des mouvements humains.

Enfin, plusieurs expériences ont montré que les nouveaux nés, pourtant très limités à la naissance sur le plan moteur étaient très sensibles au mouvement biologique. Ainsi, trois-quatre jours après leur naissance, les nouveau-nés présentent une préférence pour les séquences

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

animées représentant des mouvements biologiques (Bardi et al., 2011, 2014; Simion et al., 2008) et font la différence entre un mouvement suivant une cinématique biologique et non-biologique (Meary et al., 2007).

Pour éclaircir les processus en jeu lors de la perception de mouvements biologiques, nous avons voulu tester le rôle de la translation, composante importante des mouvements biologiques dans la sensibilité des nouveaux nés (Bidet-Ildei et al., 2014, Volume 2 p 84). Pour cela, nous avons testé les préférences perceptives de quarante-neuf nouveaux nés âgés de 3-4 jours dans différentes conditions impliquant ou non de la dynamique biologique et/ou de la translation (voir Figure 11 pour la procédure).

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

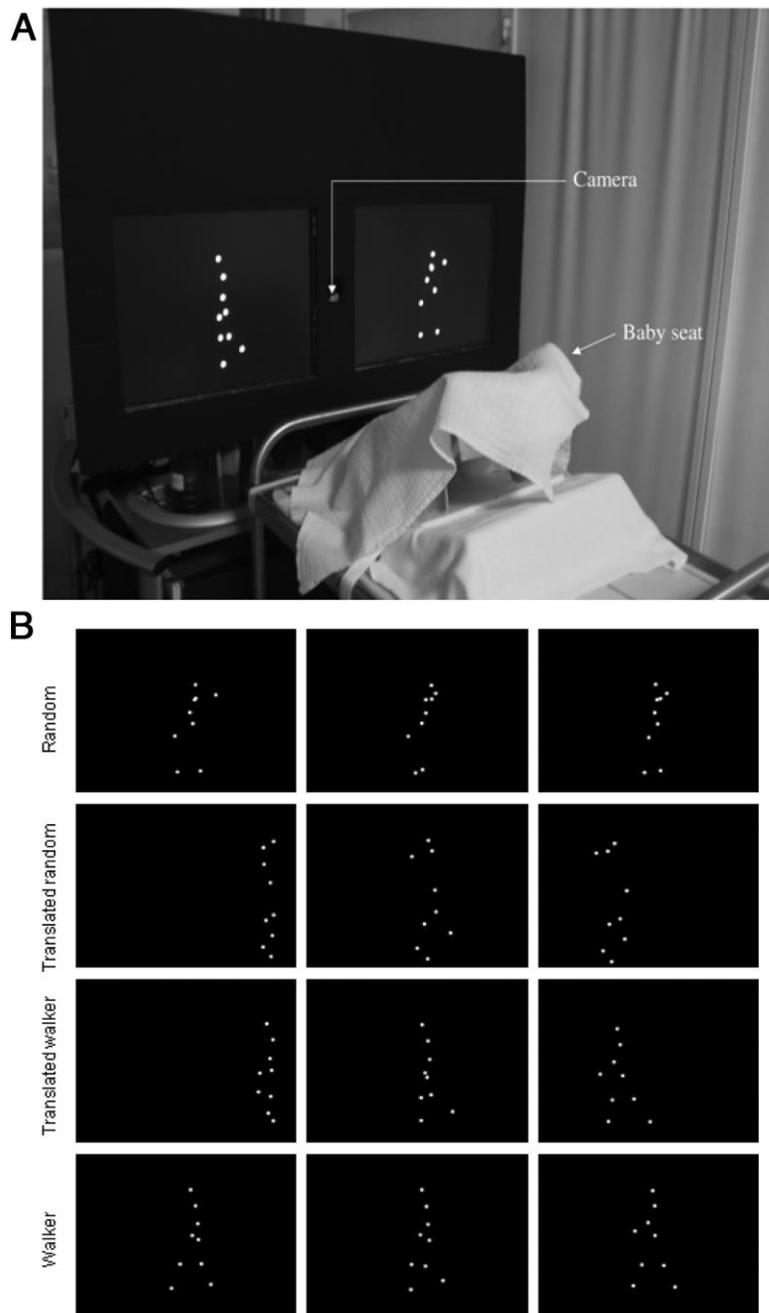


Figure 11 : A) Photographie représentant la procédure expérimentale. Les nouveaux nés étaient assis sur un siège rigide face à deux écrans. Une caméra placée au centre des écrans permettait de filmer le regard des nouveaux nés. Sur chaque écran la séquence apparaissait pendant 1 minute avec une inversion de la position des séquences au bout de 30s. B) Extraits statiques des différentes séquences animées utilisées durant l'expérience. Reproduit de « Preference for Point-Light Human Biological Motion in Newborns: Contribution of Translational Displacement » de Bidet-ildei, Kitromilides, Orliaguet, Pavlova & Gentaz, 2014, p 115, *Developmental Psychology*. Copyright 2014 par American Psychological Association.

Les résultats montrent que quelque soit la situation, les nouveaux nés préfèrent les séquences animées présentant un déplacement en translation par rapport à ceux ne présentant pas de déplacement en translation (voir Figure 12).

PARTIE 2 : RÔLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

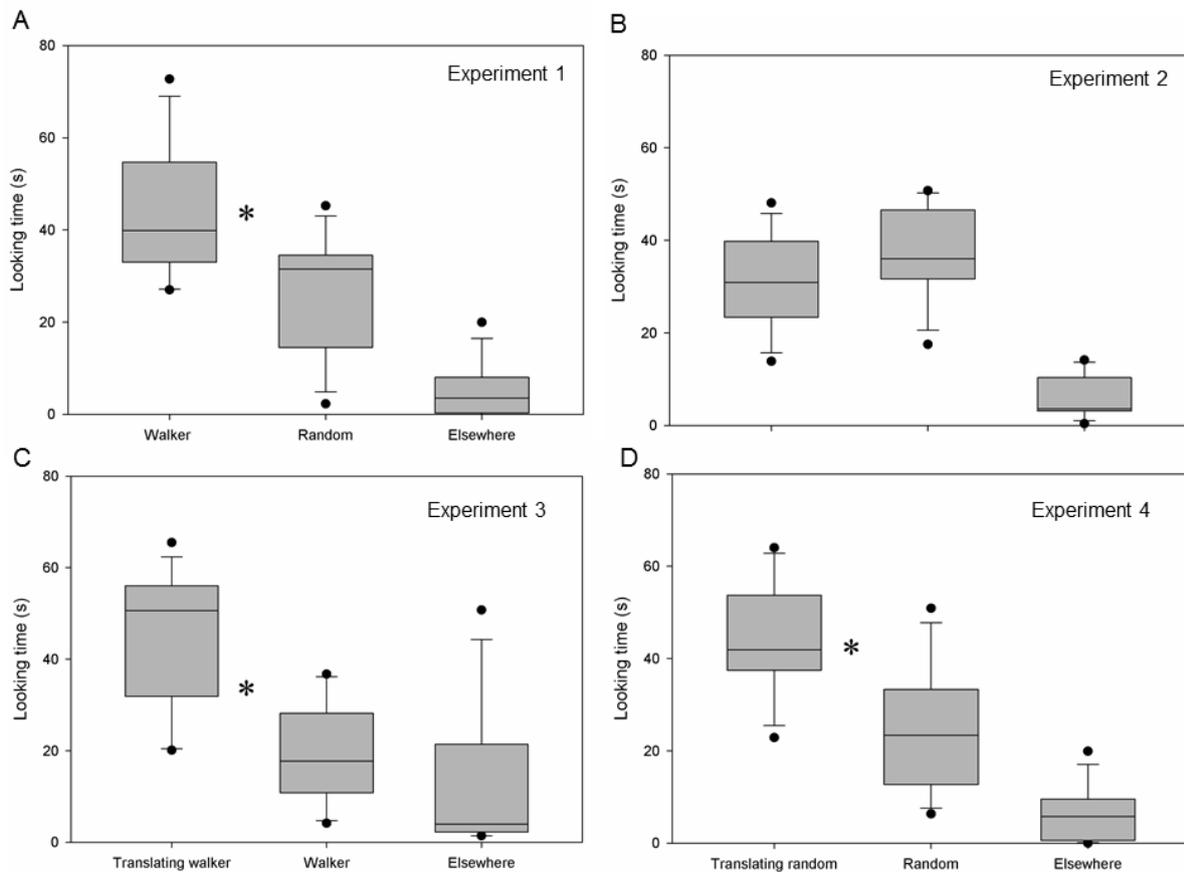


Figure 12 : Résultats obtenus dans l'étude de Bidet-Ildei et al. 2014. Adapté de « Preference for Point-Light Human Biological Motion in Newborns: Contribution of Translational Displacement » de Bidet-ildei, Kitromilides, Orliaguet, Pavlova & Gentaz, 2014, p 115, *Developmental Psychology*. Copyright 2014 par American Psychological Association.

En outre, lorsque le déplacement en translation est présent, nous n'observons plus de préférence pour le mouvement biologique. Ces résultats montrent que la sensibilité des nouveaux nés pour les mouvements biologiques pourrait davantage être liée à une sensibilité à la translation par rapport à une pure sensibilité à la cinématique biologique. Etant donné que cette sensibilité existe pour des mouvements humains (Bidet-Ildei et al., 2014; Meary et al., 2007) mais aussi non humains (Bardi et al., 2011, 2014; Simion et al., 2008), ces résultats sont davantage compatibles avec les modèles visuels qu'avec les théories motrices de la perception. Par ailleurs, l'importance de la composante de translation dans la perception des mouvements biologiques a été confirmée chez l'adulte (Masselink & Lappe, 2015) confirmant le rôle de l'analyse du mouvement global par rapport à l'analyse du mouvement local de chaque point constituant la séquence.

III. Une intervention motrice lors de la perception visuelle des mouvements biologiques ?

Dans cette partie, nous avons mis en évidence plusieurs résultats expérimentaux montrant l'importance de l'expérience motrice des participants dans le jugement de mouvements biologiques mais nous avons également souligné plusieurs autres études montrant au contraire la non-nécessité du recours à l'expérience motrice. Dans cette dernière section, nous allons essayer de discuter ces résultats en mettant l'accent sur différents facteurs qui permettraient d'expliquer ces effets contradictoires.

1) L'Effet de la tâche

Un premier facteur important à souligner est la nature de la tâche à exécuter par les participants. En effet, les études mettant en évidence un rôle de l'expérience motrice dans la perception des mouvements biologiques utilisent principalement des tâches de prédiction (Chary et al., 2004; Martel et al., 2011; Weast et al., 2014) alors que les études remettant en cause le rôle de l'expérience motrice sont plutôt basées sur des tâches impliquant une simple reconnaissance des actions (Pavlova et al., 2003; Vannuscorps & Caramazza, 2016). Ainsi, il est tout à fait possible de faire l'hypothèse d'une intervention plus importante de l'expérience motrice dans les tâches impliquant une prédiction plutôt qu'une simple reconnaissance. Cette hypothèse est tout à fait compatible avec l'expérience de Graf et ses collaborateurs (Graf et al., 2007) qui montre clairement que la prédiction de la suite d'un mouvement fait directement appel à une simulation motrice intériorisée du mouvement perçu. Elle est également en accord avec l'expérience de Lingnau et Petris (2013) qui montre que les tâches de reconnaissance de l'effecteur principal impliqué dans l'action ou la prédiction du but de l'action sollicitent davantage le système moteur qu'une tâche perceptive (repérer si un des points représentant l'action devient rouge, voir Figure 13). Cependant, il est important de noter que les tâches de prédiction ne font pas toujours intervenir l'expérience motrice (voir par exemple Bidet-Ildei, Tamamiya, & Hiraki, 2013) et que des tâches de simple discrimination de mouvement peuvent également bénéficier de l'expérience motrice des participants, en particulier lorsqu'elles sont proposées dans un contexte rendant leur réalisation complexe (Bidet-Ildei et al., 2010; Casile & Giese, 2006).

PARTIE 2 : RÔLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

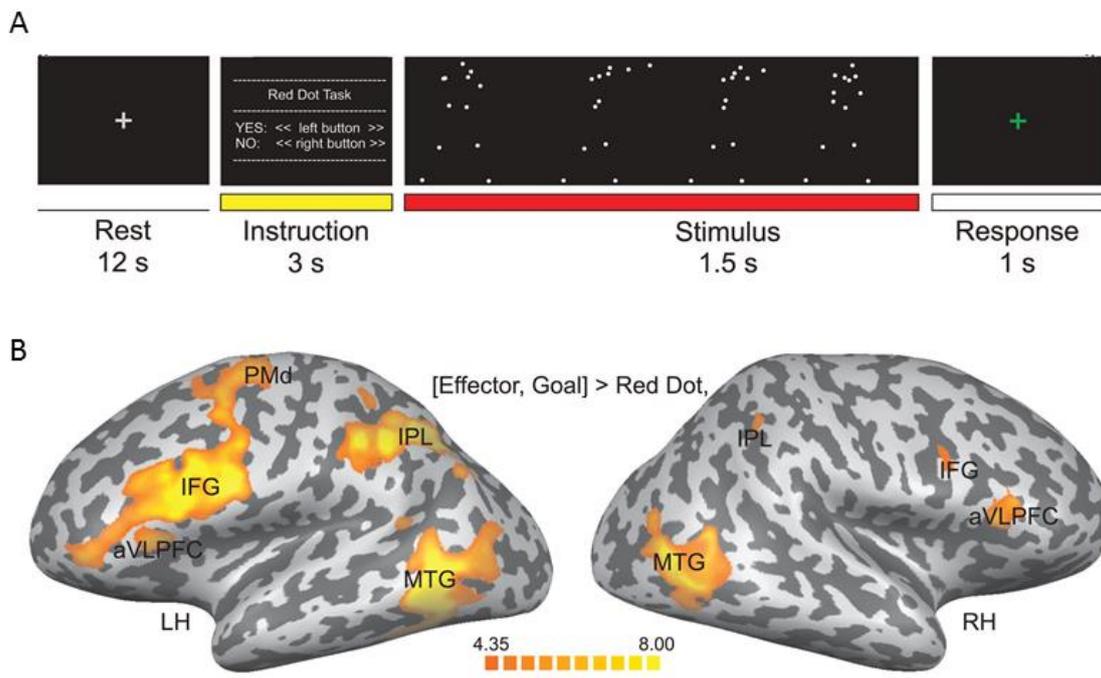


Figure 13 : Procédure (A) et résultats (B) obtenus dans l'expérience de Lingnau & Petris (2013). La partie A représente le déroulement d'un essai pour la tâche perceptive (indiquer s'il y avait un point rouge durant la séquence). Les essais se déroulaient de la même manière mais la consigne changeait pour les deux autres tâches (tâche effecteur : indiquer si l'effecteur important dans le mouvement était le bras ou la jambe ; Détermination du but : indiquer si le mouvement perçu impliquait une balle ou non). Sur la partie B apparaît le résultat du contraste (tâche impliquant le choix de l'effecteur ou du but de l'action > tâche impliquant le repérage d'un marqueur rouge dans la séquence de mouvement). RH : hémisphère droit, LH : hémisphère gauche, PMd : partie dorsale du cortex pré-moteur, IFG : Gyrus frontal inférieur, IPL : Lobe pariétal inférieur, aVLPFC : Cortex Pré-frontal ventro latéral antérieur, MTG : Gyrus temporal médial. Adapté de "Action Understanding Within and Outside the Motor System: The Role of Task Difficulty" de Lingnau & Petris, 2013, p1344-1346, *Cerebral Cortex*, Copyright 2013 par Oxford Journal.

Par ailleurs, l'intervention du système moteur pourrait également dépendre de l'intention du sujet. Ainsi, lorsque l'intention motrice n'est pas clairement exprimée, les aires motrices pourraient ne pas être systématiquement sollicitées (Decety et al., 1997). Cette conception s'accorde parfaitement avec l'expérience de Bischoff et ses collaborateurs (2015) qui montrent un recrutement du système moteur (gyrus frontal inférieur, cortex pré-moteur, sillon intra-pariétal) plus important lors d'une tâche d'anticipation sur un mouvement de lancer lorsque l'on demande aux participants de se focaliser sur la prédiction du résultat (c'est à dire sur la distance parcourue par la balle) plutôt que sur la vitesse de la main. Ainsi, les auteurs suggèrent que « an instruction to focus on action effects when anticipating the effects of throwing movements facilitates the recruitment of core components of simulation network » (Bischoff et al., 2015 p 54) confirmant les observations de Decety et collaborateurs (1997).

Enfin, un effet de la tâche pourrait également se manifester lors de la perception des mouvements biologiques en fonction du recours à un traitement global ou local de la séquence

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

de mouvement. Ainsi, Chang & Troje (2009) ont montré que le traitement global d'un mouvement nécessaire par exemple pour effectuer une tâche de discrimination entre une séquence animée représentant un marcheur ou un mouvement mélangé (scrambled motion) était influencé par l'expérience des participants ou le masquage des séquences. Par contraste, ces facteurs n'influençaient pas du tout les performances lorsque l'on demandait aux participants de réaliser un traitement local pour, par exemple, déterminer la direction d'un mouvement de marche. Ces résultats suggèrent que la perception d'un mouvement biologique pourrait entraîner l'intervention de mécanismes neuronaux distincts en fonction du type de traitement (global vs local) à réaliser (Chang & Troje, 2009).

2) Intervention motrice vs simulation motrice

Dans la littérature, la mise en évidence d'une intervention du système moteur a souvent été considérée comme un argument en faveur des théories motrices de la perception et plus particulièrement de la théorie de la simulation motrice intériorisée (Jeannerod, 2001). Cependant, nous avons montré que le système moteur pouvait être sollicité sans pour autant qu'une simulation motrice puisse être exécutée. Ainsi, même lorsque les mouvements perçus ne respectent pas une cinématique biologique (vitesse constante ou inversée) et ne peuvent donc pas être simulés au niveau moteur, les observateurs restent capables d'évoquer des lois motrices comme le principe d'isochronie (Bidet-Ildei, Meary, & Orliaguet, 2008). Par ailleurs, une étude récente a démontré que l'augmentation de l'excitabilité cortico-spinale reliée à la stimulation magnétique transcrânienne du cortex moteur primaire lors de la perception visuelle de mouvements humains se retrouve lors de la perception de mouvements biologiques mais aussi lorsque le mouvement présente une cinématique non biologique suggérant une indépendance entre l'activation du système moteur et le recours à l'expérience motrice. Ce résultat s'intègre parfaitement au modèle de Schubotz (2007) qui proposent que le recours au système sensori-moteur fait partie intégrante d'un système de prédiction d'action permettant à la fois l'interprétation des actions humaines mais aussi des actions non humaines (mouvement animaux) ou des événements naturels (le mouvement des vagues). Ainsi, il est possible de considérer que « the involvement of the motor system can be mandatory whenever the perceived movement, executed by a human, by an animal or by an object, is recognized as reproducible in its final outcome (e.g., position in space, direction of movement, posture of a body part, to-be-produced sound, specific interaction with an object, etc.), and that the peculiar relationship existing between others' actions and the actions executed by the observer could

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

just represent the extreme in which the motor system is able to almost perfectly reproduce the observed stimulus as it unfolds and, consequently, contribute to stimulus perception in the most efficient way” (Craighero, Jacono, & Mele, 2016 in abstract).

3) Des différences entre hommes et femmes

S'appuyant sur les différences existantes entre hommes et femmes dans le jugement et l'interprétation des comportements sociaux et des émotions en lien avec la mise en évidence de différences anatomiques et d'activation cérébrale en particulier au du niveau système miroir (Cheng et al., 2008, 2009; Cheng, Tzeng, Decety, Imada, & Hsieh, 2006), plusieurs auteurs ont essayé de déterminer si ces différences homme-femme se retrouvaient également dans la capacité à percevoir et juger des mouvements biologiques. Il a ainsi été montré que les femmes ont des capacités de reconnaissance des mouvements biologiques plus élevées ainsi qu'une facilitation pour la discrimination des émotions (Alaerts, Nackaerts, Meyns, Swinnen, & Wenderoth, 2011) même si ces différences sont modulées par l'expression émotionnelle et le sexe des acteurs (Krüger, Sokolov, Enck, Krägeloh-Mann, & Pavlova, 2013; Sokolov, Krüger, Enck, Krägeloh-Mann, & Pavlova, 2011). Par exemple, Krüger et ses collaborateurs ont montré que les hommes avaient plus de facilités à reconnaître un mouvement de locomotion chez une femme arborant une émotion positive (« happy walking ») alors que les femmes seraient plus performantes dans la reconnaissance du mouvement d'hommes arborant des expressions négatives (« angry walking »).

Pour essayer d'aller plus loin sur l'investigation de ces différences hommes-femmes lors de la perception visuelle de séquences animées représentant des mouvements humains, nous avons étudié grâce à la magnétoencéphalographie, le décours temporel des activations cérébrales relié à la présentation de séquences animées représentant un mouvement de marche biologique comparée à une séquence représentant une version mélangée (« scrambled ») de cette action (Pavlova, Sokolov, & Bidet-Ildei, 2015, Volume 2 p 101). Pour cela, nous avons demandé à sept hommes et sept femmes d'effectuer une tâche de « one-back » consistant à évaluer si le stimulus présenté à un instant t était identique ou différent du stimulus présenté juste auparavant. En accord avec la littérature (Pavlova et al., 2004) les analyses comportementales ont mis en évidence de très bonnes performances (environ 2% d'erreur) et aucune différence significative n'a été observée entre hommes et femmes. Par ailleurs, nos analyses ont porté sur les différences d'activations cérébrales entre hommes et femmes lors du jugement de stimuli représentant les mouvements biologiques et ceux représentant les mouvements mélangés. De

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

manière intéressante, ces analyses ont permis de révéler l'existence de différences dans le déroulement temporel des activations cérébrales liées à la perception d'un mouvement biologique. Ainsi, la présentation de mouvements biologiques entraînait une activation précoce plus importante entre 200 et 250 ms au niveau du cortex pariétal droit et du cortex temporal de manière bilatérale chez les femmes alors que de manière plus tardive, les activations deviennent au contraire plus importantes chez les hommes au niveau du cortex occipital (entre 400 et 450 ms) et du cortex frontal (entre 250 et 300 ms puis entre 350 et 400 ms) droit (voir Figure 14). Chez les femmes, nos résultats s'accordent avec l'idée d'une capture précoce du mouvement biologique (voir aussi Bidet-Ildei & Bouquet, 2014 pour des résultats similaires sur de l'observation d'action réelles) qui pourrait s'accorder avec une perspective évolutionniste qui considère qu'historiquement, les femmes avaient un rôle de protection et donc de détection rapide du danger potentiel. Par ailleurs, les résultats obtenus au niveau du cortex temporal droit, qui est une structure particulièrement impliquée dans la compréhension et l'interprétation des actions d'autrui, s'accordent parfaitement avec l'idée que la capacité à percevoir les mouvements humains est liée aux compétences sociales (Pavlova, 2012). Chez les hommes, les activations plus tardives liées aux aires frontales et occipitales, sont en accord avec l'implication de fonctions cognitives de plus haut-niveau et avec des traitements sensoriels plus importants lors de la perception visuelle de mouvements humains.

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

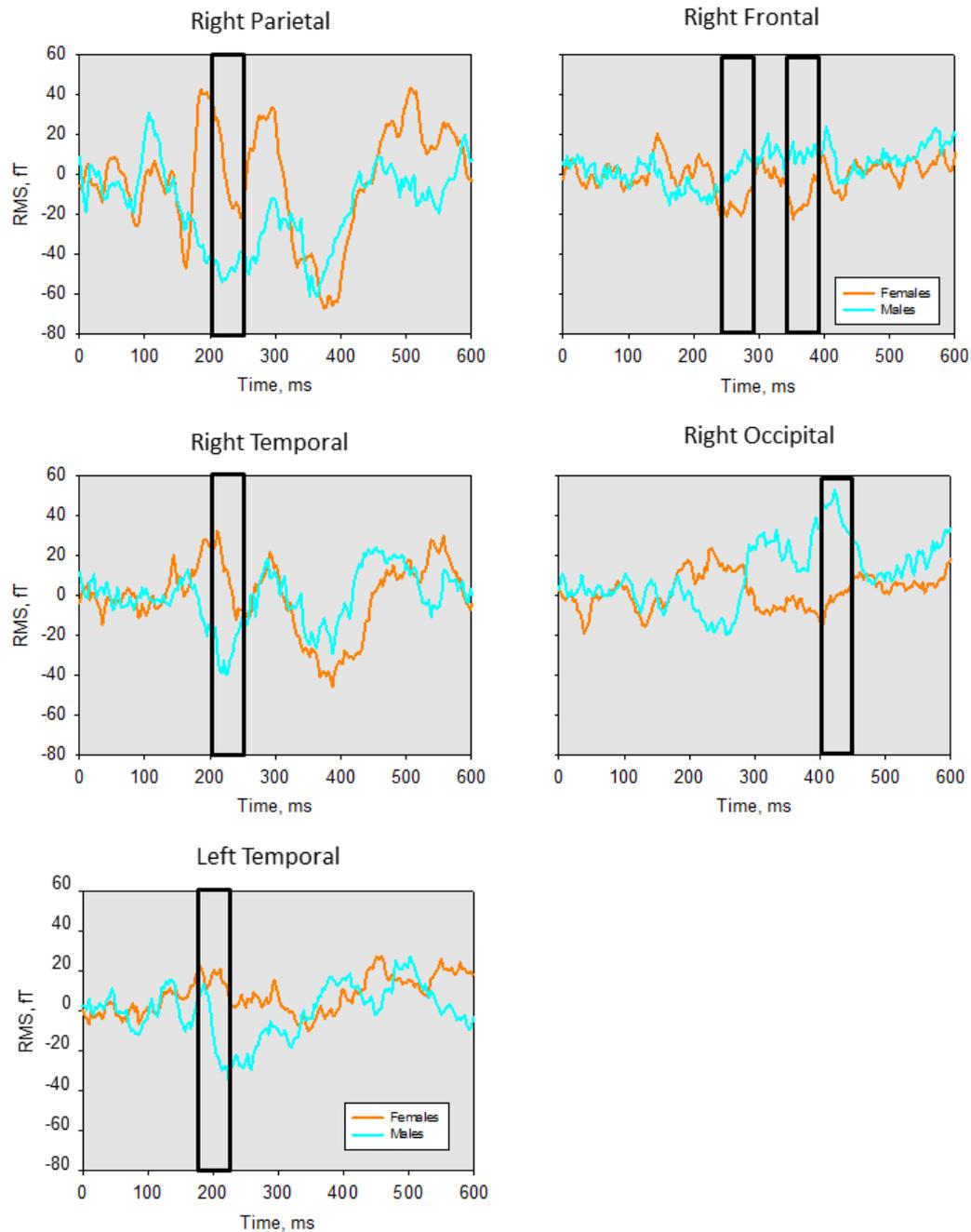


Figure 14 : Illustrations des différences significatives obtenues chez les hommes et les femmes lors de la perception de mouvements biologiques représentant un marcheur. RMS indique les différences entre l'activation obtenue pour les séquences animées représentant un marcheur et les séquences animées représentant un mouvement de marche mélangé. Adapté de « Sex differences in the neuromagnetic cortical response to biological motion » de Pavlova, Sokolov & Bidet-Ildei, 2015, *Cerebral Cortex*, p 3470-3471. Copyright 2015 par Oxford Journals.

De manière globale, ces résultats suggèrent que les mécanismes à l'œuvre dans la perception des mouvements biologiques pourraient être différents chez l'homme et la femme et il est donc envisageable que l'implication du système moteur lors de la perception visuelle

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

de mouvements biologiques dépende également du sexe de l'observateur (voir Bidet-Ildei & Bouquet, 2014 pour des résultats compatibles lors de l'observation de mouvements réels).

4) Conclusion et perspectives : vers un nouveau modèle de la perception visuelle des mouvements biologiques

Sans remettre en cause l'intervention du système moteur lors de la perception visuelle des mouvements biologiques, cette partie nous a permis de mettre en évidence l'implication spécifique de l'expérience motrice. Ainsi l'expérience motrice se révèle importante, voire même déterminante dans plusieurs situations impliquant le jugement de mouvements biologiques sans pour autant s'avérer nécessaire. En outre, cette implication de l'expérience motrice pourrait dépendre de plusieurs facteurs tels que l'intention ou le sexe de l'observateur ou encore les contraintes de la tâche à exécuter. De manière globale, ces résultats remettent en cause les théories motrices de la perception en démontrant clairement que le recours au répertoire moteur de l'observateur n'est pas une nécessité pour juger de manière correcte les mouvements biologiques. Pour autant, ils ne s'accordent pas non plus tout à fait avec les modèles purement computationnels qui ne tiennent pas ou peu compte dans leurs prédictions du rôle de l'expérience motrice. Par ailleurs, dans cette partie, nous avons également mis en évidence l'importance des prédispositions génétiques dans le jugement perceptif des mouvements biologiques en montrant une sensibilité très importante des nouveaux nés pour ce type de mouvement malgré leur faible expérience motrice et visuelle.

Pour aller plus loin dans ces investigations, il paraît nécessaire de recourir à de nouvelles conceptions théoriques intégrant l'ensemble de ces données. Pour cela, nous proposons un modèle « d'intervention conditionnelle du système moteur » envisageant l'existence de deux systèmes indépendants mais reliés (voir Figure 15).

PARTIE 2 : RÔLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

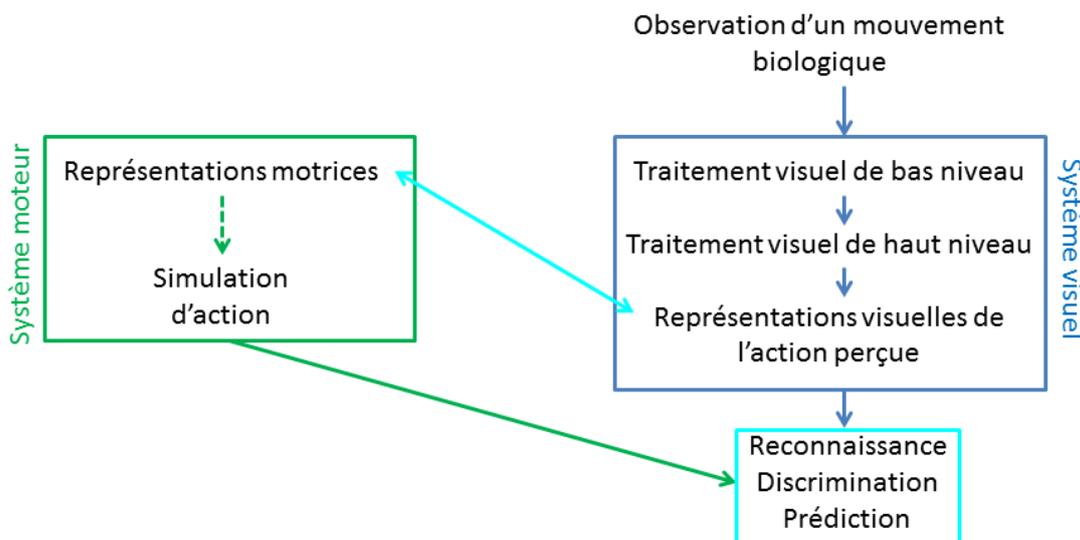


Figure 15 : Schéma représentant le modèle d'intervention conditionnelle du système moteur rendant compte du jugement de séquences animées représentant des mouvements humains chez les sujets sains. Les flèches pleines représentent des étapes systématiques alors que la flèche en pointillés représente une possibilité. La couleur verte représente les étapes intervenant au niveau du système moteur alors que la couleur bleue représente les étapes intervenant au niveau du système visuel. La couleur turquoise représente l'intervention des deux systèmes (visuel et moteur).

Chaque système posséderait ses propres représentations (visuelles et motrices respectivement) et celles-ci pourraient évoluer de manière indépendante en fonction de l'expérience visuelle et/ou motrice des participants. Chez le sujet sain, c'est-à-dire lorsque les deux systèmes sont accessibles, ces représentations spécifiques seraient reliées de manière automatique permettant à chacun des systèmes de s'enrichir mutuellement grâce aux interactions sensori-motrices. Cet aspect du modèle est consistant avec les travaux de la littérature qui montrent qu'un apprentissage moteur pourrait directement influencer les capacités perceptives (Casile & Giese, 2006) et un apprentissage par observation les capacités motrices (Boutin, Fries, Panzer, Shea, & Blandin, 2010). La force de ce lien pourrait en outre dépendre de la qualité et de la quantité des interactions sensori-motrices et serait donc directement reliée à l'expérience des participants (voir Catmur, Walsh, & Heyes, 2007 pour la même idée dans le contexte d'observation de mouvements réels). Lors de l'observation d'un mouvement biologique, le système visuel serait sollicité, des traitements visuels de bas niveaux puis de plus en plus haut niveaux seraient effectués au niveau des voies ventrales et dorsales (cf modèle de Giese & Poggio, 2003) et déclencheraient une activation des représentations visuelles du mouvement perçu qui déclencheraient à leur tour de manière automatique

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

l'accessibilité aux représentations motrices³. L'accès à ces représentations pourrait alors venir enrichir les traitements visuels effectués, en particulier si l'action perçue fait partie du répertoire moteur de l'individu. Une simulation motrice du mouvement perçu pourrait éventuellement être déclenchée à ce stade et venir améliorer la qualité du jugement perceptif. Le déclenchement de cette simulation pourrait dépendre en outre de la tâche à effectuer et du sexe de l'observateur. Concernant les prédispositions génétiques, elles pourraient concerner l'existence de cellules neuronales sensibles au mouvement ainsi que l'existence d'un lien préétabli entre le système visuel et le système moteur à travers le système miroir (Lepage & Theoret, 2007).

Même si cette proposition reste spéculative, elle permettrait de rendre compte de l'intervention de l'expérience motrice dans le jugement de mouvements biologiques tout en rendant optionnelle la simulation motrice intériorisée de l'action. Par ailleurs, même si le modèle prévoit un lien automatique entre l'activation des représentations visuelles et motrices, le système visuel garde la possibilité de fonctionner de manière autonome si le système moteur ou le lien perception-action est défaillant. Enfin, même si nous faisons l'hypothèse de l'existence de prédispositions génétiques dans la mise en place du lien action-perception, le modèle postule l'existence d'une flexibilité dépendante entre autre des interactions visuo-motrices de l'individu. D'autre part, le modèle englobe la possibilité d'améliorer les représentations motrices d'un individu par l'expérience visuelle ainsi que les représentations visuelles d'un individu par l'expérience motrice. Dans l'avenir il pourrait être intéressant de tester plus directement l'indépendance des systèmes visuels et moteurs en utilisant par exemple des paradigmes de double tâche. Ainsi, si les deux systèmes peuvent réellement fonctionner de manière indépendante chez le sujet sain, certaines tâches perceptives impliquant le jugement de mouvements biologiques devraient pouvoir être exécutée même si le système moteur est neutralisé (tâche motrice interférente). Par ailleurs, il devrait être possible de moduler la force du lien action-perception par l'entraînement. Ainsi, l'association systématique de l'observation d'un mouvement biologique avec la production de ce mouvement devrait entraîner une augmentation des activités motrices observées lors du jugement visuel de ce mouvement. Au final, ce modèle permet donc d'expliquer une grande partie de la littérature actuelle et de faire des prédictions testables au niveau expérimental. Un des défis de l'avenir sera entre autre de

³ Dans cette proposition, seul le lien visuo-moteur est envisagé mais il est très probable que l'accès aux représentations visuelles déclenche également l'accès aux autres représentations sensorielles de l'action (représentations proprioceptives et auditives).

PARTIE 2 : ROLE DE L'EXPERIENCE MOTRICE DANS LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS

mieux comprendre à quoi servent ces liens et comment les améliorer en cas de dysfonctionnement (Pavlova, 2012).

Par ailleurs, une autre piste de travail pourrait concerner l'étude des représentations motrices et visuelles de l'action dans d'autres fonctions. En effet, dans le modèle proposé nous sommes restreints aux interactions action-vision mais plusieurs travaux ont montré que les liens ne s'arrêtent pas là et peuvent également s'appliquer aux autres systèmes sensoriels (voir par exemple Alaerts, Swinnen, & Wenderoth, 2009; Viviani et al., 1997) ainsi qu'à des fonctions de plus haut niveau comme le langage (Rizzolatti, 2005). La troisième partie du document porte spécifiquement sur ce dernier point.

Partie 3 : Lien perception visuelle des mouvements humains-Langage

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

La question du lien existant entre corps et esprit occupe les scientifiques et penseurs depuis des siècles et avait déjà été soulevée par Platon dans *Phédon* (Platon, 383 Avant JC, date approximative) qui au cours du dialogue entre Socrate et Simmias stipule que « l'âme ne raisonne jamais mieux que quand rien ne la trouble, ni l'ouïe, ni la vue, ni la douleur, ni quelque plaisir, mais qu'au contraire elle s'isole le plus complètement en elle-même, en envoyant promener le corps et qu'elle rompt, autant qu'elle peut, tout commerce et tout contact avec lui pour essayer de saisir le réel ». Ici la capacité de raisonnement ne peut donc réellement s'épanouir que si l'âme arrive à se « désincarner » du corps. Au cours du temps, cette idée de dualisme corps-esprit a été reprise par plusieurs auteurs dont un des plus célèbres, Descartes disait dans *Méditations métaphysiques* en 1641 « l'esprit est une chose pensante qui peut exister indépendamment de son corps étendu. Et par conséquent, l'esprit est une substance distincte du corps, une substance dont l'essence est la pensée » (Descartes & Khodoss, 2004). Plus tard, avec l'apparition du monisme (Wolff, 1728; pour une traduction en français voir Wolff, Feuerhahn, Goubet, Rohrbasser, & Arnaud, 2006), vint l'idée que toute activité qu'elle soit physique ou mentale provient de l'activité des cellules. Cependant, même si les scientifiques se sont vite accordés sur le fait que la cognition comme toute autre activité était reliée à l'activité des cellules, elle resta encore, pendant de nombreuses années, restreinte à l'idée d'une organisation modulaire et amodale où le cerveau de l'Homme fonctionnerait comme un ordinateur (Fodor, 1983). C'est seulement dans les années 1990 que cette conception va être directement remise en cause avec la mise en évidence de l'existence d'un lien indéfectible entre notre corps sensoriel et moteur et notre esprit cognitif et émotionnel (Damasio, 1994) amenant petit à petit à une vision « incarnée » de la cognition. Dans cette approche, il n'est plus question de séparation entre le corps et l'esprit puisque la pensée, le raisonnement et l'ensemble des fonctions cognitives sont directement liés au corps et plus précisément à l'ensemble des expériences motrices et sensorielles de l'individu (Barsalou, 1999, 2008; Varela, Thompson, Rosch, & Havelange, 1999). Actuellement, cette perspective théorique a pris beaucoup d'ampleur et de nombreuses études sont venues soutenir l'idée que les capacités cognitives d'un individu sont étroitement reliées à ces expériences sensori-motrices et donc aux interactions qu'il a avec son l'environnement (voir par exemple M. Wilson, 2002). Ainsi il ne sera possible de rendre compte des capacités cognitives d'un individu que si on le considère dans son ensemble. La suite de ce document s'inscrit dans cette perspective incarnée et va plus spécifiquement s'intéresser aux preuves expérimentales démontrant l'existence d'un lien entre

l'évocation d'une action par le langage et l'action elle-même qu'elle soit réellement produite, ou simplement perçue.

I. Le lien action-langage

De très nombreuses expériences se sont intéressées au lien pouvant exister entre le traitement de mots évoquant l'action et les actions elles-mêmes et ont permis de démontrer l'existence d'un lien très étroit entre ces deux activités (voir Fischer & Zwaan, 2008; Jirak, Menz, Buccino, Borghi, & Binkofski, 2010; Pulvermüller, 2005; Willems & Hagoort, 2007 pour des revues). Ainsi, dès le milieu des années 1990, plusieurs études utilisant des techniques d'enregistrement de l'activité cérébrale ont montré que le traitement de mots évoquant des actions impliquaient l'activation du cortex pré-moteur (voir par exemple Dehaene, 1995; Martin, Wiggs, Ungerleider, & Haxby, 1996; Pulvermüller, 1996) suggérant ainsi que l'activation des aires motrices pouvait directement être impliquées dans l'évocation du sens d'un mot d'action. Ces premières données ont été confirmées dans de nombreuses expériences utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (Aziz-Zadeh & Damasio, 2008; Aziz-Zadeh, Wilson, Rizzolatti, & Iacoboni, 2006; de Vega et al., 2014; Hauk, Johnsrude, & Pulvermüller, 2004; Hauk & Pulvermüller, 2004; Moody & Gennari, 2010; Tettamanti et al., 2005), la magnétoencéphalographie (Klepp et al., 2014; Klepp, Nicolai, Buccino, Schnitzler, & Biermann-Ruben, 2015), la stimulation magnétique transcrânienne (Kuipers, van Koningsbruggen, & Thierry, 2013; Pulvermüller, Hauk, Nikulin, & Ilmoniemi, 2005; Repetto, Colombo, Cipresso, & Riva, 2013; Willems, Labruna, D'Esposito, Ivry, & Casasanto, 2011), l'électroencéphalographie (Mollo, Pulvermüller, & Hauk, 2015; Moreno et al., 2015; Moreno, de Vega, & Leon, 2013; Pulvermüller, Lutzenberger, & Preissl, 1999) ou l'électrostimulation (Havas et al., 2015; Lubrano, Filleron, Démonet, & Roux, 2014) établissant clairement l'implication du système moteur lors du traitement de mots en lien avec l'action. Une des études les plus connues dans ce domaine est sans conteste celle de Hauk, Johnsrude et Pulvermüller (2004). Dans leur expérience, ces auteurs ont comparé grâce à des mesures en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle l'activité hémodynamique du cerveau de quatorze participants qui lisaient des verbes d'action ou qui effectuaient un mouvement. Parmi les verbes présentés, trois types d'action étaient distinguées : les actions de la main (par exemple « pick »,

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

gratter), du pied (par exemple : « kick », donner un coup de pied), ou du visage (« lick », lécher). Par ailleurs, afin de repérer précisément le cortex moteur de chaque individu, des scans de localisation ont été effectués pendant que les participants bougeaient leur pied droit, leur pied gauche, leur index droit, leur index gauche et leur langue. L'analyse de l'activité cérébrale reliée à la lecture passive de verbes d'action a permis de montrer une activation du cortex frontal inférieur gauche, du cortex moteur et du cortex pré-moteur en plus des activations repérées habituellement lors du traitement de mots écrits (gyrus fusiforme gauche et cortex temporal inférieur gauche) confirmant ainsi l'implication du système moteur lors du traitement de verbes d'action. De manière intéressante, cette expérience a par ailleurs permis de révéler l'aspect somatotopique des activations cérébrales reliées au traitement de verbes d'action en montrant des activations communes (et spécifiques de la partie du corps concernée) lors du traitement des verbes d'action et de la production d'action sollicitant ces mêmes parties du corps (Voir figure 16).

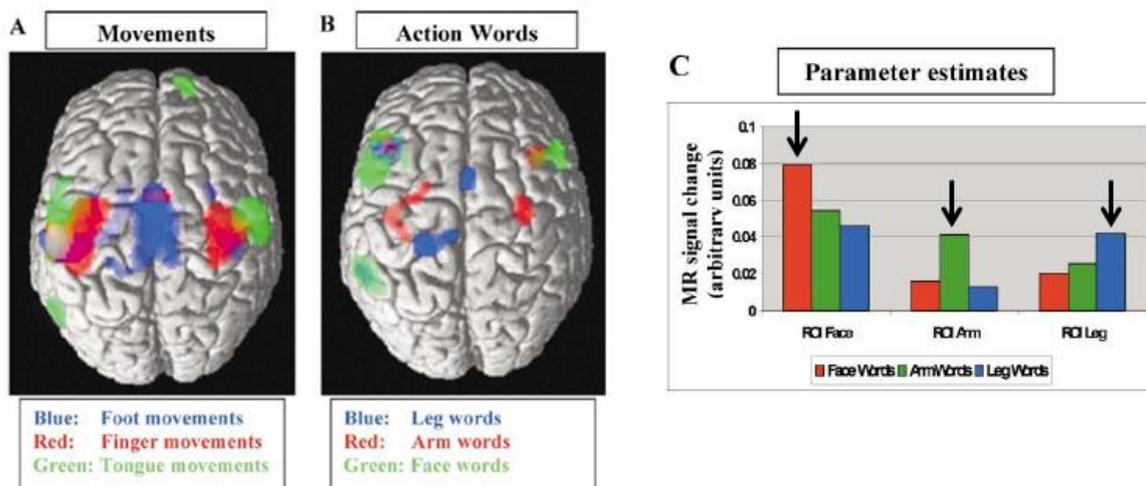


Figure 16 : Résultats obtenus dans l'expérience de Hauk et collaborateurs (2004). A) Activations hémodynamique reliée aux mouvements de la langue, du doigt et du pied. B) Activations hémodynamiques reliées à la lecture de verbes d'action en lien avec le visage, le bras ou la jambe. C) Moyenne des activations (en unités arbitraires) observées dans chaque partie du cortex moteur de l'hémisphère gauche lors de la lecture des différentes catégories de verbes d'action. Adapté de « Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex » de Hauk, Johnsrude & Pulvurmüller, 2004, *Neuron*, p301-307. Copyright 2004 par Cell Press.

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent donc clairement que le traitement de verbes d'action et la réalisation d'actions s'appuient sur des réseaux cérébraux communs et spécifiques

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

confirmant l'existence d'un lien action-langage (voir aussi Buccino et al., 2005 sur l'aspect somatotopique).

Récemment, nous avons confirmé cet aspect somatotopique du lien action-langage en utilisant une technique d'immobilisation de courte durée (Bidet-Ildi, Meugnot, Beauprez, Gimenes, & Toussaint, In press, Volume 2 p 111). Dans cette étude, nous avons mené deux expériences où l'on a demandé à des participants adultes de réaliser une tâche de décision sémantique consistant à indiquer le plus vite possible si un verbe présenté sur un écran était relié aux mains ou aux jambes. Les réponses étaient données dans un micro afin d'éviter les possibles interactions entre le segment corporel relié à la réponse du sujet et le segment corporel sollicité dans l'action (Andres, Finocchiaro, Buiatti, & Piazza, 2015). Dans la première expérience, nous avons directement comparé les performances d'un groupe de sujets ayant été immobilisés de la main et du bras droit (bras dominant pour l'ensemble des participants) pendant 24H avant la tâche aux performances de sujets n'ayant pas été immobilisés. Les résultats ont montré un effet de l'immobilisation avec une absence de différence des temps de réaction entre le jugement des verbes « main » et des verbes « pied » dans le groupe immobilisé alors que cette différence apparaissait chez les sujets n'ayant pas été immobilisés, la reconnaissance des verbes « main » étant plus rapide que celle des verbes « pied ».

Cet effet de l'immobilisation a été confirmé dans une deuxième expérience où nous avons utilisé une procédure pré-post test (voir Figure 17). Dans cette expérience le groupe immobilisé et le groupe contrôle effectuaient deux fois la tâche de décision sémantique à 24h d'intervalle. Pour les sujets immobilisés, ces 24H correspondaient au temps durant lequel ils portaient une attelle les empêchant d'effectuer des mouvements avec leur bras droit et leur main droite.

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

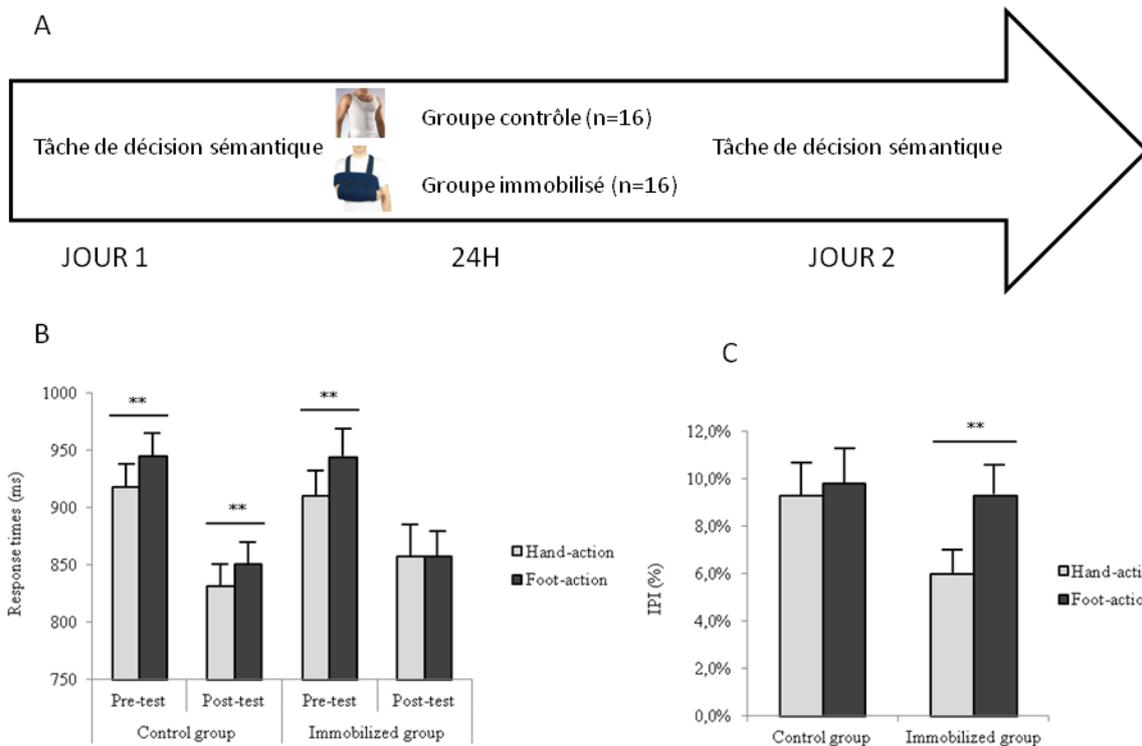


Figure 17 : Procédure (A) et Résultats (B) observés dans l'expérience 2 de Bidet-Ildei et al. (sous-presse). A) procédure utilisée. B) Moyennes et erreurs types des temps de mouvements mesurés en pré-test et post-test dans le groupe contrôle et le groupe immobilisé. C) Moyennes et erreur types de l'indice d'amélioration entre pré-test et post test pour le groupe contrôle et le groupe immobilisé. Adapté de « Short-term upper limb immobilization affects action-words understanding » de Bidet-Ildei, Meugnot, Beauprez, Gomenes & Toussaint.

Les résultats ont permis de montrer un effet de l'immobilisation se manifestant par un ralentissement de l'identification des verbes « main », faisant disparaître la rapidité des réponses aux verbes « main » comparée aux verbes « pied » alors que cette différence est présente dans les deux groupes avant immobilisation et en post-test dans le groupe contrôle. Par ailleurs, dans cette deuxième expérience nous avons également montré que l'amélioration des temps de réaction observée entre le pré-test et le post test était similaire pour les verbes « pied » et « main » dans le groupe contrôle tandis qu'elle était significativement plus faible pour les verbes « main » dans le groupe immobilisé. Globalement, ces résultats montrent donc qu'une immobilisation de courte durée perturbe de manière somatotopique le jugement de verbes d'action confirmant le lien étroit entre expérience sensori-motrice et langage.

Ce lien expérience sensori-motrice-langage a par ailleurs été démontré par des auteurs s'intéressant au traitement des verbes d'action chez des patients présentant des troubles moteurs

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

comme la maladie de Huntington (Peran, Demonet, Pernet, & Cardebat, 2004), la maladie de parkinson (Boulenger, Mechtouff, et al., 2008; Cardona et al., 2013; Fernandino et al., 2013a, 2013b; Ibanez et al., 2013), une paralysie supranucléaire progressive (Bak et al., 2006; Daniele et al., 2013) ou une sclérose latérale amyotrophique (Bak, O'Donovan, Xuereb, Boniface, & Hodges, 2001; M. Grossman et al., 2008; York et al., 2014). Dans l'ensemble ces études ont montré que les patients présentant des difficultés lors de la production des actions présentaient également des performances amoindries concernant le traitement de verbes d'actions qu'ils soient présentés de manière isolée (voir par exemple Boulenger, Mechtouff, et al., 2008) ou intégrée dans des phrases (voir par exemple Fernandino et al., 2013b). Par ailleurs, la difficulté des patients à traiter des verbes d'action pourrait être directement reliée à leur état moteur actuel comme le suggère notre étude sur des sujets sains (voir précédemment, p 74) ou l'étude de Boulenger et collaborateurs (2008) chez les patients parkinsoniens. Dans cette dernière expérience, les auteurs ont comparé la capacité à traiter des verbes d'action et des noms concrets chez dix patients présentant une maladie de Parkinson et suivant une thérapie à base de Levodopa et dix sujets sains appariés en âge, genre, niveau d'éducation et statut socio-économique. En outre, les patients présentant une maladie de Parkinson étaient évalués deux fois dans la même journée : une première fois en condition « OFF » alors qu'ils n'avaient pas eu de traitement durant au moins 12H avant la passation et une fois en condition « ON », c'est-à-dire une heure après la prise d'une dose supraliminaire de Lévodopa correspondant à leur dose habituelle augmentée de 25%. Les participants devaient réaliser une tâche de décision lexicale c'est-à-dire évaluer si un ensemble de lettres correspondait ou non à un mot de la langue française sachant que l'ensemble des stimuli (mots et pseudo-mots) étaient prononçables. Parmi les mots, deux catégories étaient distinguées : des verbes d'action qui sollicitaient la main ou le bras (par exemple « dessiner ») et des noms concrets qui se référerait à des entités concrètes et imaginables mais qui ne pouvaient pas être manipulés (par exemple « moulin »). Lors de chaque essai, avant le jugement de la cible, on présentait aux participants une amorce durant 50 ms qui pouvait soit être identique à la cible soit être différente, il s'agissait alors d'une suite de consonnes imprononçables (voir Figure 18A pour la procédure).

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

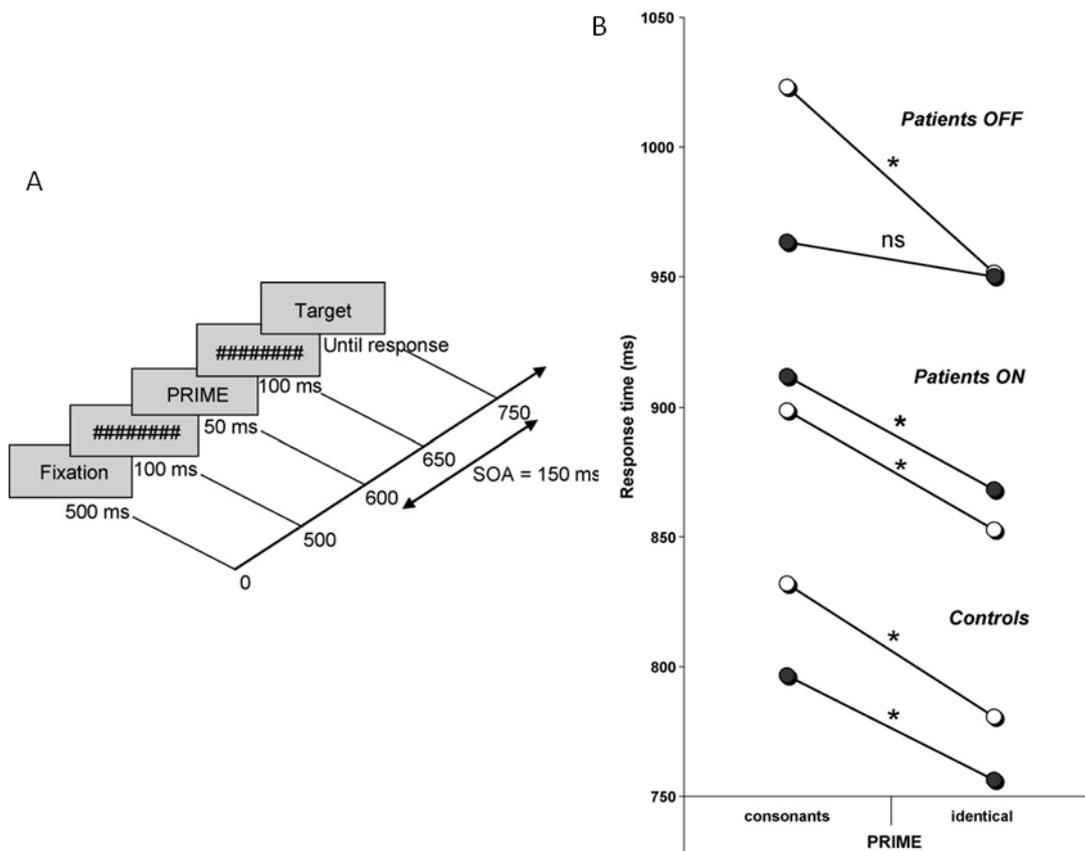


Figure 18 : Procédure et résultats obtenus dans l'expérience de Boulenger et collaborateurs (2008). A) déroulement d'un essai. B) Résultats obtenus en fonction de la condition d'amorçage (« Consonants » lorsque le prime était constitué d'une suite de consonnes et « Identical » « lorsque le prime était identique à la cible). Les points blancs indiquent les performances pour les noms et les points noirs pour les verbes. Les astérisques indiquent la présence de différences significatives. Adapté de « Word processing in Parkinson's disease is impaired for action verbs but not for concrete nouns » de Boulenger, Mechtouff, Thobois, Broussolle, Jeannerod, 2008, *Neuropsychologia*, p 743-756. Copyright 2008 par Elsevier.

Les résultats (voir Figure 18B) ont permis de montrer une diminution des temps de réponse lors de la présentation des amorces identiques dans la reconnaissance des noms concrets et des verbes chez les sujets sains. Chez les sujets présentant une maladie de Parkinson, les résultats observés dépendaient de la condition (avant ou après prise de Lévodopa). Avant la prise de Lévodopa (c'est-à-dire en OFF-Dopa), les résultats montrent des temps de réponse très élevés quel que soit le type de mots à évaluer, et un effet de l'amorce limité à la présentation de noms concrets. Après la prise de médicament (c'est-à-dire en ON-Dopa), les auteurs observaient une diminution significative des temps de réponse ainsi qu'un effet d'amorçage pour les noms concrets et pour les verbes. De manière intéressante, on peut noter que cette augmentation des performances s'accompagnaient d'une augmentation des capacités motrices mesurées grâce à la partie III de l'Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS, Fahn &

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

Elton, 1987). Ces résultats montrent donc clairement que le niveau moteur des participants impacte directement leur capacité à traiter des verbes d'action confirmant l'implication du système moteur lors du traitement des verbes d'action.

Enfin, plusieurs expériences comportementales ont également permis de mettre en évidence le lien existant entre l'action et le traitement de verbes d'action (voir Fischer & Zwaan, 2008; Jirak et al., 2010 pour des revues). Il a par exemple été montré que lorsque le traitement d'un verbe d'action se faisait simultanément à la réalisation d'une action, on observe des détériorations au niveau de la cinématique du geste (Boulenger et al., 2006; Boulenger, Silber, et al., 2008) ou au niveau du temps de réaction (voir par exemple Liepelt, Dolk, & Prinz, 2012) suggérant un partage de ressources entre les deux activités. Par ailleurs, il a été montré que le traitement d'un verbe d'action sollicitant la main entraînait une activation périphérique de la main suggérant l'implication d'une simulation motrice du geste (voir par exemple Aravena et al., 2012).

Globalement, il est donc établi que le traitement de verbes d'action partage des caractéristiques communes avec la production des actions. Cependant le lien action-langage ne s'arrête pas là et plusieurs expériences ont montré que non seulement la production des actions était liée au traitement de verbes d'action mais aussi la simulation d'action ou même la simple observation des actions suggérant que le lien langage-action se baserait sur les représentations sensori-motrices. La suite de ce manuscrit se situe dans cette approche et cherche à évaluer et comprendre le lien entre le traitement des verbes d'action et l'observation des actions.

II. Le lien observation d'action-langage

Dans la littérature, plusieurs expériences ont permis de mettre en évidence l'existence d'un lien entre observation d'action et traitement des verbes d'action, ceci que les actions soient physiques (voir par exemple Kaschak et al., 2005) ou humaines (voir par exemple Bidet-Ildei, Sparrow, & Coello, 2011, Volume 2 p 122). Dans cette partie, nous allons nous intéresser spécifiquement aux travaux montrant le lien entre traitement des verbes d'action et observation d'action humaines en nous concentrant particulièrement sur les travaux utilisant des séquences animées de points lumineux pour représenter ces mouvements. Avant de détailler plus amplement ces travaux, nous nous proposons de nous arrêter un instant sur l'intérêt de travailler spécifiquement sur ce lien observation d'action humaines-traitement des verbes d'action.

1) Pourquoi s'intéresser au lien observation d'action- traitement de verbes d'action ?

L'intérêt pour ces travaux est relié à plusieurs considérations. Tout d'abord, l'utilisation de l'observation d'action plutôt que de la production d'action, permet d'étudier de manière précise le rôle des processus centraux dans le lien action-langage sans interférence possible (ou minimales) des processus périphériques. Le passage par un paradigme d'observation permet donc de s'intéresser de manière spécifique au rôle des représentations sensori-motrices dans le lien action-langage. De plus, en ne nécessitant pas la production d'action qui peut s'avérer difficile chez certains patients, ce paradigme d'observation d'action offre également la possibilité d'être utilisé de manière plus simple dans le cadre de la rééducation de patients présentant des troubles moteurs ou langagiers. Notons que pour ces deux premiers points la simulation d'action partage les mêmes avantages que l'observation d'action (voir par exemple Moran, Bramham, Collet, Guillot, & MacIntyre, 2015 pour une revue sur les effets de la simulation motrice pour la rééducation). Cependant il est important d'étudier de manière spécifique le lien observation d'action-langage car si l'équivalence entre simulation d'action et production d'action est admise par la majorité des auteurs, l'équivalence entre production et observation d'action est plus discutée (Voir Partie 2.II p 54). En outre, l'observation des mouvements ayant des caractéristiques propres, parfois indépendantes des possibilités motrices de l'individu et souvent plus précoces, il paraît nécessaire d'étudier l'existence même du lien observation d'action-traitement des verbes d'actions ainsi que ses éventuelles spécificités. Enfin, l'utilisation de l'observation d'action (en particulier sous la forme de séquences animées de points lumineux) permet de manipuler de manière directe les caractéristiques de l'action présentée comme la dynamique des points, l'orientation ou encore le contexte afin de tester spécifiquement les caractéristiques intervenant de manière privilégiée dans le lien action-langage (Voir Partie 4.I p 101).

2) Les preuves neurophysiologiques du lien observation d'action-traitement des verbes d'action

Du fait de l'équivalence fonctionnelle existant entre production-simulation et observation des actions (Grézès & Decety, 2001; Grézès, Fonlupt, & Decety, 2000), les travaux s'intéressant au lien action-langage d'un point de vue neurophysiologique ne font

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

classiquement pas de différences entre les trois types d'activités. Ainsi, il a très vite été établi que le traitement de verbes d'action sollicitait des aires appartenant au système miroir (voir par exemple Aziz-Zadeh et al., 2006; Tettamanti et al., 2005), aires qui sont classiquement activées lorsque l'on produit, simule ou observe une action (voir par exemple Aziz-Zadeh & Ivry, 2009 pour une revue).

Dans ce contexte, une étude très intéressante a directement testé l'hypothèse d'une équivalence entre le traitement de verbes d'action et l'observation d'action (Aziz-Zadeh et al., 2006). Dans cette expérience, les auteurs ont demandé à douze participants adultes de lire des phrases contenant des verbes d'actions sollicitant la bouche (par exemple, « mordre dans une banane », traduction de « biting the banana »), les mains (par exemple « attraper un stylo » traduction de « grasping a pen ») ou les pieds (par exemple « appuyer sur la pédale du piano » traduction de « pressing the piano pedal »). Les participants devaient également dans un second bloc expérimental, observer des actions sollicitant ces mêmes parties du corps. Ainsi, on leur présentait des vidéos montrant une personne de profil en train de mordre différents objets (comme par exemple une banane), d'attraper différents objets (comme par exemple un stylo) ou d'appuyer sur différents objets (comme par exemple une pédale). Pendant la réalisation de ces deux tâches, les activations cérébrales des participants étaient mesurées par une technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Les résultats ont permis de montrer l'activation d'aires visuelles corticales et sous-corticales durant l'observation des actions et la lecture des phrases avec une activation plus marquée dans la voie dorsale pour l'observation des actions. Par ailleurs, l'observation des actions impliquaient également l'activation du cortex pré-moteur ventral de manière bilatérale. La lecture quant à elle, impliquait des activations importantes au niveau du gyrus frontal inférieur, du cortex pré-moteur et du gyrus pré-central de l'hémisphère gauche ainsi que des activations plus modérées au niveau du gyrus frontal inférieur droit. Enfin, de manière intéressante, la comparaison individuelle des activations du cortex pré-moteur lors de la réalisation de ces deux tâches a permis de montrer une équivalence entre ces deux activités au niveau de l'hémisphère gauche (voir Figure 19).

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

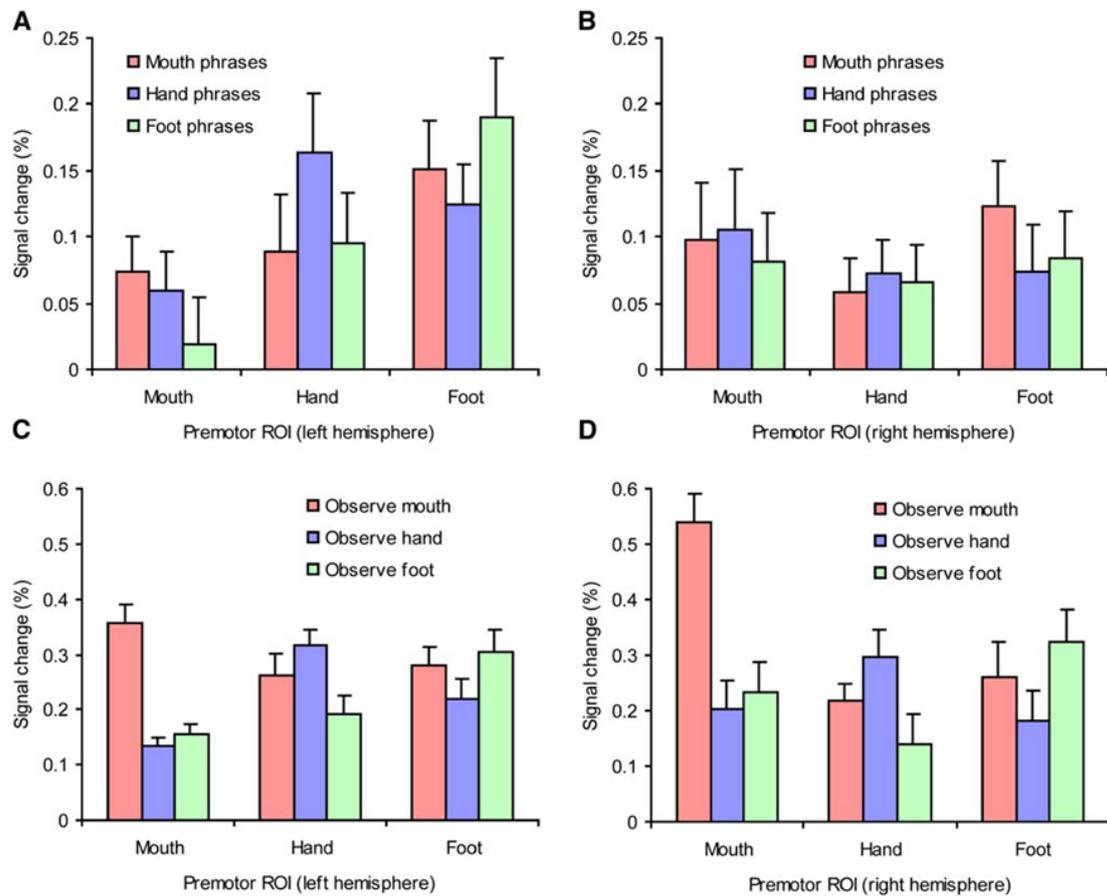


Figure 19 : Pourcentage de changement du signal obtenu dans la lecture des phrases et l'observation des actions en fonction des régions d'intérêts définies individuellement lors de l'observation des actions. Les barres représentent les erreurs standards. Les interactions entre la partie du corps sollicitée et les régions d'intérêt sont significatives pour tous les graphiques excepté le graphique B. Adapté de « Congruent embodied representations for visually presented actions and linguistic phrases describing actions » de Aziz-zadeh, Wilson, Rizzolatti & Iacobini, 2006, *Current Biology*, p 1818-1823. Copyright 2006 par Elsevier.

Ces résultats montrent donc clairement l'implication du système miroir dans le traitement des actions qu'elles soient présentées visuellement ou verbalement confirmant le lien existant entre observation d'action et traitement des verbes d'action. Par ailleurs, l'existence de ce lien a également été confortée par la mise en évidence de l'implication du sillon temporal supérieur, une structure cérébrale connue pour être impliquée de manière spécifique lors de l'observation d'action (Voir Partie 1.II p 40), lors de la génération de verbes d'action (Khader, Jost, Mertens, Bien, & Rosler, 2010). Dans cette expérience, les auteurs ont demandé à dix-sept participants de produire silencieusement un nom ou un verbe afin de compléter une phrase simple constituée d'un sujet, d'un verbe et d'un complément. Pendant cette tâche, l'activité cérébrale des participants été mesurée par une technique d'enregistrement par résonance magnétique fonctionnelle. L'étude du contraste verbe-nom a permis de montrer des activations spécifiques pour les verbes au niveau du cortex pré-frontal inférieur gauche, du cortex occipital

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

supérieur droit et du cortex temporal supérieur gauche confirmant l'implication des réseaux de l'observation d'action lors du traitement de verbes d'action (Voir Figure 20).

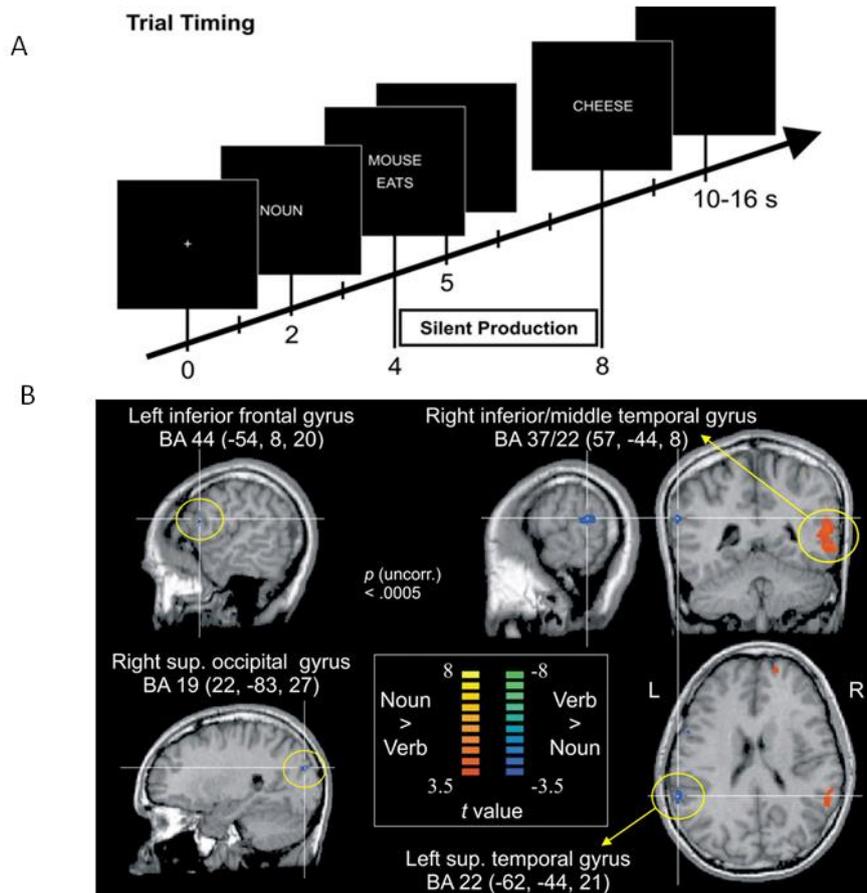


Figure 20 : Procédure et résultats de l'expérience de Khader et al. 2010. A) Procédure utilisée dans l'ensemble des essais. Dans l'exemple un nom doit être généré, le contexte étant donné par le sujet (souris) et le verbe (mange). B) résultats obtenus lors de la génération des noms et des verbes. Adapté de « Neural correlates of generating visual nouns and motor verbs in a minimal phrase context » de Khader, Jost, Mertens, Bien & Rösler, 2010, *Brain Research*, p 122-132. Copyright 2010 par Elsevier.

L'existence de bases neurophysiologiques communes entre l'observation d'action et le traitement de verbes d'action a également été confirmée par des expériences utilisant l'électroencéphalographie. Ainsi Moreno et ses collaborateurs (2013) ont montré que le traitement de phrases contenant une action (comme par exemple « maintenant, je coupe le pain » traduit de « Now, I cut the bread ») provoquait une suppression du rythme mu et bêta dans les électrodes centrales (C3, Cz, C4) tout comme l'observation de clips vidéos représentant des actions humaines alors que le traitement de phrases abstraites (comme par exemple « maintenant, je doute du plan », traduit de « Now, I doubt of the plan ») ne provoquait pas ces suppressions. Ces résultats ont été reproduits récemment par les mêmes auteurs (Moreno et al.,

2015) qui ont confirmé la spécificité de la suppression du rythme mu pour les phrases d'action (comme par exemple « tu couperas le gâteau aux fraises » traduit de « You will cut the strawberry cake ») par rapport aux phrases abstraites (comme par exemple « Tu douteras de l'explication des patients » traduit de « You will doubt the patient's argument ») ou aux phrases portant sur un aspect perceptif (comme « Tu remarqueras la clarté du jour » traduit « You will notice the bright day »). En outre, une analyse par reconstruction de sources a permis de montrer que la suppression du rythme mu serait localisée au niveau du cortex pré-moteur confirmant bien l'activation d'aires motrices lors du traitement de phrases d'action. De manière intéressante, enfin, les auteurs ont montré que cette activation motrice ne serait pas uniquement reliée au traitement lexical du verbe d'action mais qu'elle serait associée à l'intégration des différents mots tout au long de la phrase.

3) Les preuves neuropsychologiques du lien observation d'action-traitement des verbes d'action

L'existence du lien entre observation d'action et langage a également été démontrée dans l'étude de patients. En effet, plusieurs expériences ont mis en évidence l'impact bénéfique d'une thérapie par observation d'action pour la rééducation de patients présentant des troubles du langage comme une aphasie non-fluente (voir Marangolo & Caltagirone, 2014 pour une revue). Dans ce contexte, il a par exemple été démontré qu'une rééducation intensive (trois sessions de 30 à 45 minutes par jour pendant deux semaines consécutives) basée sur l'observation d'actions humaines permettait d'améliorer significativement la production de verbes chez des patients présentant une aphasie non fluente, avec des effets qui perduraient au moins deux mois après la fin du traitement (Marangolo et al., 2010). Ces résultats confirment donc le lien existant entre l'observation d'action et le traitement des verbes d'action et mettent clairement en évidence le potentiel d'une rééducation par observation d'action pour rééduquer les troubles du langage. De manière intéressante, l'amélioration des performances verbales des patients serait contrainte par le type d'actions présentée. Ainsi, seule la présentation d'actions humaines (comme par exemple « la marche ») permettrait d'améliorer de manière significative la capacité de production de verbes d'action (Marangolo, Cipollari, Fiori, Razzano, & Caltagirone, 2012). Il existerait donc une spécificité du lien action-langage qui serait reliée à l'appartenance des actions au répertoire moteur des participants renforçant clairement l'idée de

l'intervention d'une simulation motrice de l'action lors du traitement de verbes d'action (Pulvermüller, 2005).

4) Les preuves comportementales du lien observation d'action-traitement des verbes d'action

Enfin, plusieurs expérimentations ont évalué l'existence d'un lien entre observation d'action et traitement de verbes d'actions en montrant par exemple que le traitement d'un verbe d'action influençait la capacité à prédire la suite d'une action présentée sous la forme d'une séquence animée de points lumineux (Springer, Huttenlocher, & Prinz, 2012; Springer & Prinz, 2010). En outre, Springer et ses collaborateurs (2010) ont montré que la précision avec laquelle les participants étaient capables de prédire la suite d'une action dépendait de la catégorie du mot présenté (verbe, comme par exemple « soulever », traduction de « to lift » ou nom concret, comme par exemple « étoile » traduction de « star »), de la nature du verbe (statique, comme par exemple « mentir », traduction de « to lie » ou dynamique comme par exemple « sauter » traduction de « to jump ») ainsi que de la vitesse associée à ce verbe (lente, comme par exemple « étirer » traduction de « to stretch », moyenne, comme par exemple « saisir », traduction de « to grasp » ou rapide, comme par exemple « attraper » traduction de « to catch »). De plus, il a été montré que cette simulation serait implicite, puisque les performances de prédiction sont toujours affectées même lorsque le verbe présenté en amorce est masqué et non perçu consciemment (Springer et al., 2012). Dans l'ensemble, ces expériences montrent donc une influence directe du langage lors d'une tâche d'observation d'actions impliquant une simulation motrice (Graf et al., 2007). De manière intéressante, nous avons montré que ce lien traitement de verbes d'action-observation d'action existe également lorsque la tâche d'observation d'action n'implique pas de manière systématique une simulation de l'action (Bidet-Ildei, Sparrow, et al., 2011, Volume 2 p 122). Dans cette expérience, nous avons demandé à dix-huit participants de détecter la présence d'un mouvement humain présenté sous la forme d'une séquence vidéo de points lumineux (technique du « point-light display »). Pour cela, nous avons contrasté des vidéos contenant des mouvements humains imbriqués dans des masques avec des vidéos formées uniquement d'un masque. Les masques étaient constitués respectivement de 55 ou 66 points qui avaient une position de départ aléatoire et qui se déplaçaient selon une cinématique biologique appartenant à l'une des articulations de l'action humaine (« scrambled mask », Voir Partie 1.I p 36 pour plus de détails). Ainsi, au total six stimuli ont été construits :

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

trois contenant une action humaine associée à un masque formé de 55 points en mouvements et trois ne contenant pas d'action humaines et formés de 66 points en mouvement. Avant la présentation des stimuli, on présentait au participant un mot qu'il devait lire à voix haute (voir Figure 21). Les mots utilisés étaient des verbes qui pouvaient se référer ou non à des actions humaines (courir vs penser).

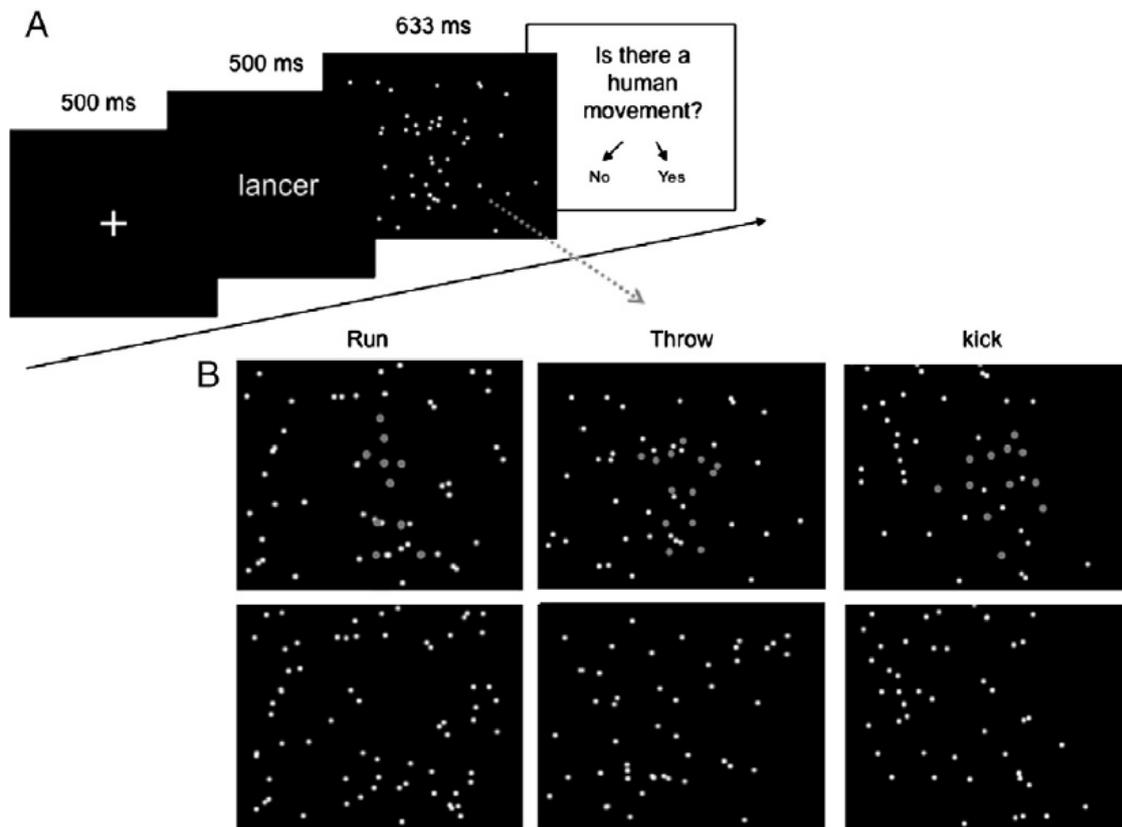


Figure 21 : Procédure utilisée dans l'expérience de Bidet-Ildei et al. (2011). A) Déroulement d'un essai. B) images statiques représentant les différentes vidéos utilisées au cours de l'expérience. Les images du haut représentent les vidéos contenant les actions humaines avec les points gris représentant l'action et les points blancs représentant le masque (dans l'expérience tous les points étaient blancs) et les images du bas représentent les vidéos ne contenant pas d'action humaines. Repris de « Reading action word affects the visual perception of biological movements » de Bidet-ildei, Sparow & Coello, 2011, *Acta Psychologica*, p 332. Copyright 2011 par Elsevier.

Les résultats ont confirmé la très grande capacité des êtres humains à détecter des actions humaines avec une moyenne de 93% de bonnes réponses quel que soit la condition. De manière intéressante, lorsque l'action était présente, les temps de réponse étaient plus rapides lorsque les stimuli contenaient une action congruente avec le verbe présenté en amorce (Voir Figure 22).

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

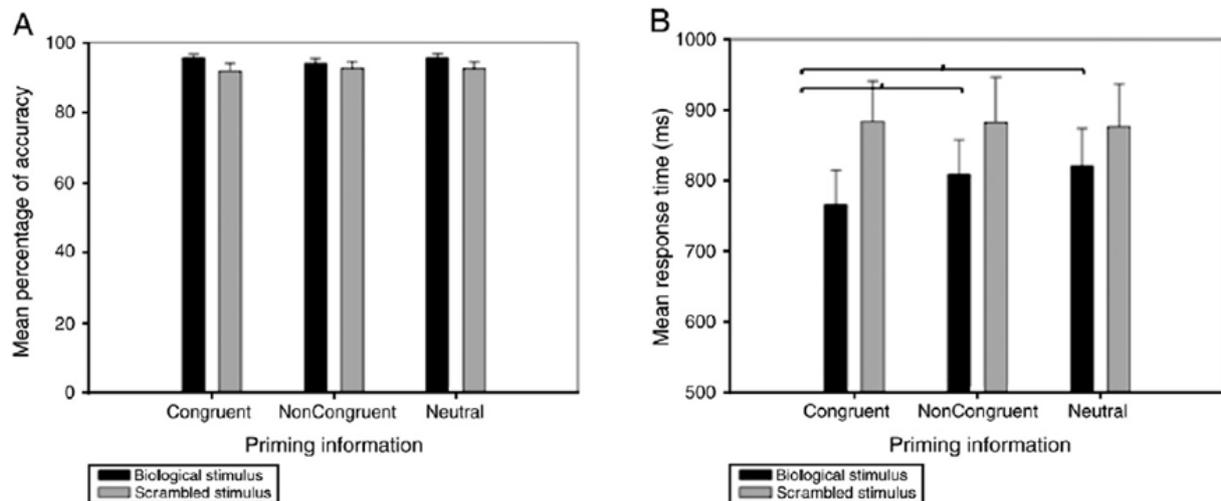


Figure 22 : Résultats obtenus dans l'expérience de Bidet-Ildei et al. (2011) pour le pourcentage de bonnes réponses et le temps de réponse dans les différentes conditions. Les barres indiquent les erreurs standards et les accolades des différences significatives. Repris de « Reading action word affects the visual perception of biological movements » de Bidet-ildei, Sparow & Coello, 2011, *Acta Psychologica*, p 333. Copyright 2011 par Elsevier.

Ces résultats montrent donc que la lecture de verbes d'action influence la capacité à détecter une action humaine imbriquée dans un masque confirmant l'existence d'un lien entre langage et observation d'action. De plus, comme cette tâche n'implique pas nécessairement de simulation de l'action car elle peut être réussie chez des patients présentant des troubles moteurs innés (Voir Partie 2.II p 54), les résultats nous permettent de valider l'idée de l'existence d'un lien spécifique entre traitement des verbes d'action et observation d'action.

Dans une autre expérience, nous avons pu confirmer la spécificité de ce lien observation d'action-traitement des verbes d'action en démontrant l'existence d'un lien privilégié entre ces deux activités (Bidet-Ildei & Toussaint, 2015, Volume 2 p 128). Dans cette expérience, nous avons comparé les performances de vingt-quatre participants sur une tâche de décision lexicale et une tâche de décision de mouvement (voir Figure 23). Pour la tâche de décision lexicale, une procédure classique était utilisée. On présentait aux participants une suite de lettres prononçables et ils devaient indiquer le plus rapidement possible si cette suite de lettres représentait ou non un mot de la langue française. Les mots présentés pouvaient soit être des verbes d'action (comme par exemple « pousser ») soit des noms concrets (comme par exemple « bâtiment »). Concernant la tâche de décision de mouvement, elle consistait à présenter aux participants une séquence animée de points qui représentait soit une action humaine (biological action) soit un équivalent de cette action mais où la position des articulations avait été mélangée

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

(scrambled action). La tâche des participants était d'indiquer le plus rapidement possible si la séquence présentée correspondait ou non à une action humaine.

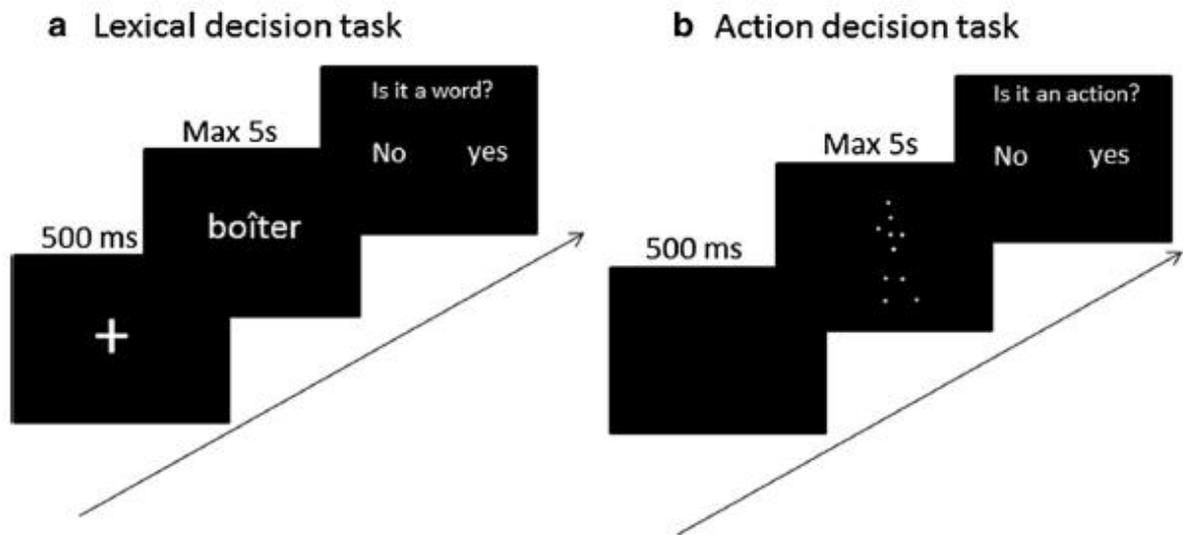


Figure 23 : Procédure utilisée dans l'expérience de Bidet-Ildei & Toussaint (2015) pour la tâche de décision lexicale (A) et la tâche de décision de mouvement (B). Repris de « Are judgements for action verbs and point-light human actions equivalent? » de Bidet-Ildei, & Toussaint, 2015, *Cognitive Processing*, p 61. Copyright 2015 par Springer.

Les résultats ont permis de montrer que les participants étaient impactés dans les deux tâches par les mêmes contraintes. En effet, malgré une difficulté plus importante de la tâche de décision de mouvement marquée par un taux de bonne réponses inférieur et des temps de réponse plus longs, les performances se différençaient de la même manière dans les deux tâches. Quel que soit le type de matériel jugé (mots ou actions), les pseudo-stimuli étaient jugés moins rapidement que les stimuli valides (voir Figure 24 A). Par ailleurs, de manière intéressante une analyse de corrélation a permis de montrer un lien spécifique entre les performances obtenues dans le jugement des actions et le jugement des verbes suggérant l'utilisation de mécanismes communs spécifiques reliant ces deux tâches (voir Figure 24 B).

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

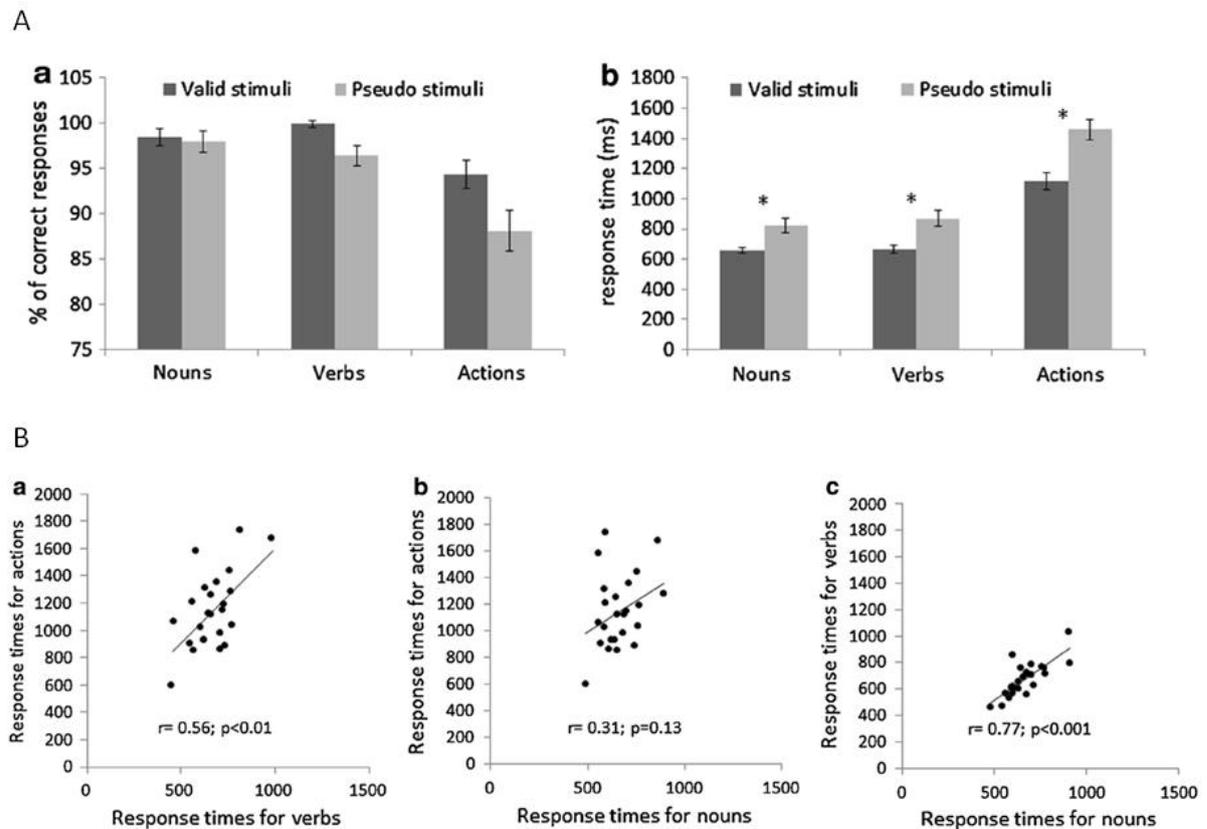


Figure 24 : Résultats obtenus dans l'expérience de Bidet-Ildei & Toussaint (2015). A) moyenne du pourcentage de bonnes réponses (a) et des temps de réponse (b) pour les pseudo-stimuli (pseudo-noms, pseudo-verbes et pseudo-action) et les stimuli valides (noms, verbes et actions). Les barres indiquent les erreurs standards et les astérisques des différences significatives. B) Corrélations obtenues entre les performances pour juger des mots (voir graphique a pour verbes et graphique b pour noms) et la performance pour juger des actions ainsi que concernant la performance pour juger de noms et des verbes (c). Adapté de « Are judgements for action verbs and point-light human actions equivalent? » de Bidet-Ildei, & Toussaint, 2015, *Cognitive Processing*, p 61-62. Copyright 2015 par Springer.

Globalement, l'ensemble de ces expériences montrent donc qu'il existe bien un lien entre le traitement des verbes d'action et l'action que celle-ci soit produite, simulée ou simplement observée. Cependant, au niveau théorique, les mécanismes sous-tendant l'existence de ce lien reste actuellement débattus.

III. Comment expliquer le lien action-langage : débats théoriques

Si la question de l'existence d'un lien entre action et langage est actuellement admise par la majorité des auteurs (cependant voir de Zubicaray, Postle, McMahon, Meredith, & Ashton, 2008; Postle, Ashton, McFarland, & de Zubicaray, 2013; Postle, McMahon, Ashton, Meredith, & de Zubicaray, 2008 pour des données contradictoires), la compréhension des mécanismes sous-tendant ce lien reste encore débattue (Caramazza, Anzellotti, Strnad, & Lingnau, 2014; Coello & Bartolo, 2014; Coello & Bidet-Ildei, 2012; Pulvermüller, 2013b; Yang, 2014; Zwaan, 2014). Dans cette partie, nous allons détailler quelques uns de ces débats concernant principalement les mécanismes sous-tendant le lien action-langage, le rôle des activations motrices dans la compréhension du sens des mots d'action ainsi que l'apparition du lien action-langage au cours de l'évolution.

1) Les mécanismes sous-tendant le lien action langage

Une importante question concerne les mécanismes impliqués pour rendre compte des activations motrices lors du traitement de verbes d'action. Dans la suite du document nous allons chercher en particulier à savoir si le lien action-langage est nécessairement basé sur l'intervention de représentations motrices, si ces représentations sont activées par simulation motrice (implicite), résonance motrice ou imagerie motrice (explicite). Par ailleurs, nous nous intéresserons aussi au rôle de du système miroir dans le lien action-langage.

a) Le lien action-langage nécessite-t-il l'implication de représentations motrices ?

Un premier débat concerne l'implication des représentations dans le lien action-langage. Les théories non-représentationnelles postulent que l'implication du système moteur s'effectue à un niveau périphérique et émerge directement à partir des informations pertinentes disponibles dans l'environnement (voir par exemple A. D. Wilson & Golonka, 2013) alors que les théories représentationnelles postulent que langage et action sont basés sur des représentations internes communes (voir par exemple Aziz-Zadeh & Damasio, 2008). A notre connaissance très peu d'études se sont directement intéressés à différencier ces deux conceptions bien que la majorité des preuves expérimentales aillent dans le sens de l'activation de représentations cérébrales communes (Voir Parties 3.I et 3.II p 71 et p 77). Récemment,

pourtant, Cardona et collaborateurs (2014) ont tenter de différencier ces deux conceptions en étudiant le lien action-langage dans différentes pathologies impliquant des troubles moteurs liés à des problèmes périphériques (la neuromyéélite optique et la myélite transverse aigue idiopathique) ou à un dysfonctionnement central (la maladie de Parkinson). Les résultats ont montré un lien action-langage altéré uniquement pour les patients atteints de la maladie de Parkinson allant dans le sens d'une implication du système nerveux central dans le lien action-langage. A noter cependant que des perturbations périphériques comme l'immobilisation d'un membre peuvent également affecter le lien action-langage mais à condition que ces perturbations aient un impact direct au niveau central (voir Bidet-Ildei et al., In press, Volume 2 p 111)

b) Quel mécanisme est à l'origine de l'activation de ces représentations motrices ?

Par ailleurs, même si l'on accepte comme postulat que le lien action-langage est basé sur l'implication de représentations motrices, il n'en reste pas moins que les mécanismes sous-tendant l'activation de ces représentations restent obscurs. En effet si certains auteurs postulent que l'activation motrice reliée au traitement de mots d'action sollicite directement le système moteur que ce soit par l'intermédiaire d'une simulation intériorisée de l'action (voir par exemple Aziz-Zadeh & Damasio, 2008; Cardona et al., 2014; Pulvermüller, Hauk, et al., 2005) ou par l'intermédiaire d'une résonance motrice (Andres et al., 2015; Bidet-Ildei, Sparrow, et al., 2011; Bidet-Ildei & Toussaint, 2015; Heard, Masson, & Bub, 2015; Zwaan & Taylor, 2006, d'autres au contraire postulent que l'activation motrice ne serait pas directe mais reliée à une intervention de l'imagerie motrice explicite (Bedny & Caramazza, 2011). En ce qui concerne la distinction entre simulation motrice et résonance motrice celle-ci est très difficile à mettre en évidence et à ma connaissance aucune étude n'a essayé de les distinguer bien qu'il faut garder à l'esprit que pour moi les deux théories se distinguent sur l'existence d'un seul et même système (pour la simulation) ou sur l'intervention de deux systèmes différents (système visuel et système moteur) en interaction (pour la résonance). Par contre, plusieurs études ont envisagé la possible intervention de l'imagerie motrice explicite pour rendre compte des activations du système moteur lors du traitement des verbes d'action. En effet, dès les premiers travaux mettant en évidence une activation motrice reliée au traitement de verbes d'action, les auteurs ont essayé de distinguer si cette activation était ou non reliée à l'imagerie motrice (voir par

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

exemple Aziz-Zadeh et al., 2006; Hauk & Pulvermuller, 2004; Pulvermüller, Shtyrov, & Ilmoniemi, 2005). Aujourd'hui plusieurs arguments basés essentiellement sur la rapidité de l'intervention du système moteur (moins de 200 ms voir par exemple Pulvermüller, Shtyrov, et al., 2005) et sur la localisation des activations dans un seul hémisphère (Aziz-Zadeh et al., 2006) vont plutôt dans le sens d'une activation motrice implicite indépendante de l'imagerie. Cette idée a également été confirmée par Willems et collaborateurs (2010) qui ont directement comparé les activations motrices spontanées reliées au traitement de verbes d'action et les activations motrices reliées à l'imagerie motrice explicite de ces actions. Les résultats ont montré une activation du cortex pré-moteur dans les deux tâches mais sans qu'aucune similitude ni corrélation puisse être mise en évidence suggérant que le traitement des verbes d'action solliciterait davantage une simulation motrice implicite du mouvement plutôt que l'intervention d'une imagerie motrice explicite. Nous avons également récemment confirmé cette idée (Bidet-Ildei et al., In press, Volume 2 p 111) en montrant que la capacité à traiter un verbe d'action était davantage reliée aux capacités d'imagerie interne des individus, c'est-à-dire à la capacité à pouvoir s'imaginer en train d'exécuter l'action (ce qui relève plutôt de la simulation motrice que de l'imagerie visuelle, voir Hostetter & Alibali, 2008). Au final, même si cette explication ne peut pas être complètement abandonnée, il existe aujourd'hui une accumulation de preuves permettant de remettre en cause l'idée que l'activation motrice reliée au traitement des verbes d'action serait uniquement dépendante de l'intervention de l'imagerie visuelle explicite.

c) Quel est le rôle du système miroir ?

De nombreux auteurs suggèrent que le système miroir pourrait être à l'origine du lien existant entre action et langage (Aziz-Zadeh & Ivry, 2009; Bonifazi et al., 2013; Caramazza et al., 2014; Chen & Yuan, 2008; Hostetter & Alibali, 2008; Marangolo et al., 2010; Moody-Triantis, Humphreys, & Gennari, 2014; Rizzolatti, 2005; Rizzolatti & Arbib, 1998; Rizzolatti & Sinigaglia, 2010; Tettamanti et al., 2005; Willems & Casasanto, 2011; Zarr, Ferguson, & Glenberg, 2013). Dans cette perspective, les aires impliquées lors de la production et de l'observation d'actions seraient également sollicitées dans la compréhension du langage. Ainsi, la compréhension d'un verbe d'action passerait par la ré-activation des réseaux neuronaux reliés à l'expérience motrice et/ou visuelle des individus. En outre, ce lien serait direct et automatique et ne nécessiterait aucune inférence de haut niveau (Rizzolatti & Sinigaglia, 2010). Beaucoup de travaux expérimentaux soutiennent clairement l'implication du système miroir lors du traitement de verbes d'action (voir Aziz-Zadeh & Ivry, 2009; Fischer & Zwaan, 2008; Jirak et

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

al., 2010; Pulvermüller, Hauk, et al., 2005; Willems & Hagoort, 2007 pour des revues). De plus, le fait que le lien action-langage s'applique non seulement à la production des actions mais aussi à la simulation d'action et à l'observation d'action argumente également dans ce sens. Cependant, il faut garder à l'esprit que l'activation des zones miroirs lors du traitement du langage n'est pas nécessairement suffisante pour prouver l'automaticité du lien action-langage ou même son implication systématique pour accéder au sens des mots (Caramazza et al., 2014; Toni, de Lange, Noordzij, & Hagoort, 2008). En outre le système miroir pourrait contenir en plus des neurones purement sensori-moteurs, des neurones avec des capacités importantes d'abstraction (voir par exemple Caggiano et al., 2012) suggérant que le lien action-langage pourrait se baser sur des représentations de haut niveau et pas sur un simple couplage motricité-langage (Caramazza et al., 2014). Ceci étant dit, indépendamment de ce débat entre « matching » simple et intervention de représentations de plus haut niveau, le simple fait que le système miroir soit impliqué dans le lien action-langage ouvre d'importantes perspectives (Voir Partie 4.III p 105) car de nombreuses études ont montré l'implication de ce système dans d'autres fonctions cognitives comme le traitement des émotions ou la compréhension des états mentaux d'autrui (Iacoboni & Dapretto, 2006; Keysers & Fadiga, 2008; Rizzolatti & Fadiga, 2008).

2) L'implication du système moteur est elle nécessaire à la compréhension des verbes d'action ?

Un autre débat important de la littérature est de savoir si l'implication du système moteur lors du traitement d'un verbe d'action relève d'un fonctionnement intrinsèque nécessaire pour accéder au sens du mot (Barsalou, 1999; Zwaan & Taylor, 2006) ou plutôt d'un épiphénomène intervenant à la suite du processus de compréhension (Mahon & Caramazza, 2008). Des arguments en faveur de la première conception ont été apportés par des expériences montrant que les activations motrices reliées au traitement des verbes d'action apparaissent seulement 150-200 ms après l'apparition du mot suggérant bien l'implication précoce et automatique des aires motrices dans l'accès au sens (Hauk, Coutout, Holden, & Chen, 2012; Hauk, Shtyrov, & Pulvermüller, 2008; Klepp et al., 2014; Mollo et al., 2015; Moseley, Pulvermüller, & Shtyrov, 2013; Pulvermüller, Shtyrov, & Hauk, 2009). Cette automaticité a également été confirmée par des expériences montrant que l'implication sensori-motrice reliée au traitement d'un verbe d'action se produit même lorsque la présentation du verbe est subliminale (Boulenger, Silber,

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

et al., 2008). Enfin, des arguments en faveur de cette conception automatique et obligatoire ont été apportés par des expériences utilisant la stimulation magnétique transcranienne (Pulvermüller, Hauk, et al., 2005) ou des approches neuropsychologiques (Boulenger, Mechtouff, et al., 2008; Fernandino et al., 2013a) en montrant que l'intégrité et la disponibilité du système moteur est nécessaire pour traiter des verbes d'action. Cependant, ces effets ne seraient pas systématiquement observés (Kuipers et al., 2013; Tomasino, Fink, Sparing, Dafotakis, & Weiss, 2008) et ne corréleraient pas forcément avec les observations comportementales (Papeo, Pascual-Leone, & Caramazza, 2013; Papeo, Vallesi, Isaja, & Rumiati, 2009) remettant en cause l'idée d'une intervention nécessaire du système moteur pour accéder au sens d'un verbe d'action. Par ailleurs, plusieurs expériences ont montré que le traitement d'un verbe d'action n'entraînait pas de manière systématique le recours à des activations motrices mais que celui-ci serait dépendant du contexte de présentation du mot (Aravena et al., 2012, 2014; Taylor & Zwaan, 2008; Zwaan, Taylor, & de Boer, 2010). Ainsi, lorsqu'un verbe d'action est présenté dans une phrase à la forme négative (Aravena et al., 2012), lorsqu'il décrit une action pouvant potentiellement se produire dans le futur (Zwaan et al., 2010) ou lorsque il n'est pas au centre de la phrase (Aravena et al., 2014; Taylor & Zwaan, 2008), il n'activerait pas le système moteur remettant en cause l'idée d'une intervention obligatoire du système moteur pour accéder au sens.

Récemment, nous avons confirmé ces travaux en montrant que seul le traitement d'un verbe d'action inclut dans une phrase plausible impliquait un bénéfice pour la détection d'un mouvement humain imbriqué dans un masque (Bidet-Ildei, Gimenes, Toussaint, Almecija, & Badets, 2016, Volume 2 p 140). Dans cette expérience, nous avons demandé à 25 participants d'effectuer une tâche de détection de mouvements humains. Les mouvements étaient présentés sous la forme de séquences animées de points lumineux et étaient imbriqués dans des masques formés de 55 points se déplaçant avec une cinématique biologique mais à partir de positions spatiales aléatoires. Avant la présentation du stimulus, les participants entendaient une phrase contenant un verbe d'action qui pouvait être congruent ou non congruent avec l'action présentée ensuite. Ces verbes étaient présentés dans des phrases plausibles (« le footballeur court sur le terrain ») ou non plausibles (« le terrain court sur le footballeur »). Les résultats ont montré un effet de facilitation lorsque l'action à détecter était congruente avec le verbe présenté en amorce mais uniquement lorsque celui-ci était inclus dans une phrase plausible suggérant que l'activation motrice reliée à la présentation d'un verbe d'action n'est pas automatique mais dépend du contexte de présentation du verbe (voir Figure 25B) confirmant la flexibilité du lien

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

action-langage (Willems & Casasanto, 2011). Pourtant de manière intéressante, cette expérience a également permis de montrer une capacité de détection des actions (calculé à l'aide du d' qui est une mesure standard de sensibilité dans la théorie de la détection du signal, voir Macmillan & Creelman, 2005) supérieure lorsque le verbe présenté en amorce était congruent et ceci quel que soit le contexte de présentation (voir Figure 25A). Ces données suggèrent qu'il pourrait y avoir une activation motrice automatique lors de la présentation d'un verbe d'action mais que celle-ci pourrait être augmentée lorsque le mot est présenté dans un contexte plausible allant dans le sens de l'intervention d'une résonance motrice dans le lien action-langage.

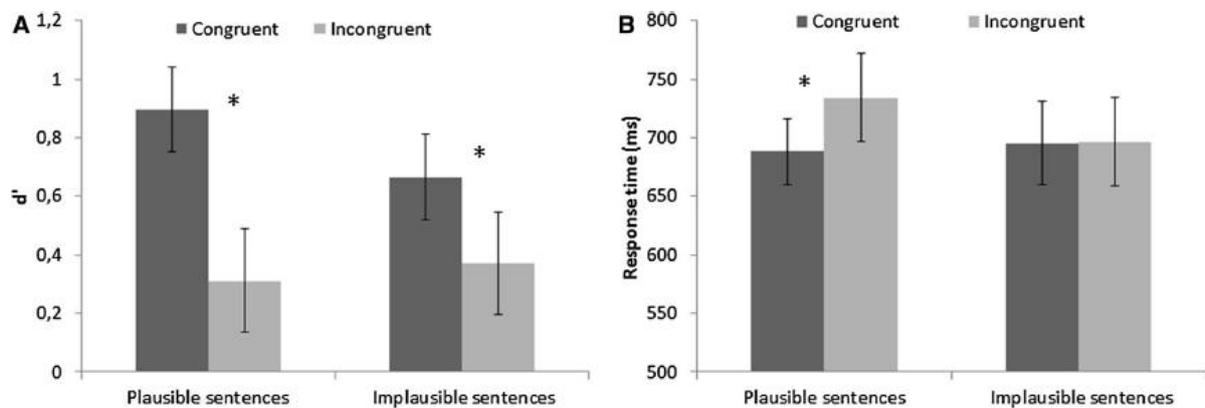


Figure 25 : Résultats obtenus dans l'expérience de Bidet-Ildei et collaborateurs (2016) en ce qui concerne les capacités de détection (A) et les temps de réponse (B). Les barres représentent les erreurs standards. Reproduit de « Sentences plausibility influences the link between action words and the perception of biological movements » de Bidet-Ildei, Gimenes, Toussaint, Almecija & Badets, 2016, *Psychological Research*, Copyright 2016 par Springer.

A la lumière de l'ensemble de ces résultats, il paraît évident que la question de l'implication systématique du système moteur dans la compréhension des verbes d'action est encore loin d'être résolue. En effet, même si plusieurs arguments expérimentaux sont venus appuyer chacune des conceptions, la question reste encore débattue (Hauk & Tschentscher, 2013; Pulvermüller, 2013b). Une idée intéressante pour faire avancer les choses et réconcilier les deux conceptions serait peut être de considérer que “ motor knowledge is part to the *meaning potential* of action words. It participates in the construction of meaning when a currently modeled situation focuses the action and might serve *meaning-specification*” (Aravena et al., 2014 p 10; voir aussi Zwaan et al., 2010). Ainsi, les activations motrices seraient bien

impliquées dans le traitement du sens des verbes d'action mais cette implication pourrait être modulée par la situation.

3) Comment le lien action-langage se développe-t-il ?

Enfin, une dernière question concerne l'origine de cette activation motrice qui pour certains auteurs relèverait d'associations multiples entre le traitement des mots et l'activation motrice (Pulvermüller, 2005) alors que pour d'autres, ce lien serait inné et ancré dans l'évolution de l'espèce (Rizzolatti & Arbib, 1998).

Inspiré du modèle de Hebb (1949), la première conception postule que le lien action-langage s'expliquerait par un simple apprentissage associatif. Au cours du développement les verbes d'action seraient souvent présentés en lien avec l'action qu'ils représentent (Goldfield, 2000). Avec le temps, ces associations multiples entraîneraient petit à petit une co-activation des circuits neuronaux liés au traitement du langage et de la motricité (Pulvermüller, 1999; Pulvermüller, Hauk, et al., 2005). Ainsi, "Taking into account well-known facts about the cortical basis of learning — namely that frequently co activated neurons strengthen their mutual connections — it is likely that the cortical systems for language and action develop specific links between each other whenever actions correlate with specific language processes" (Pulvermüller, Hauk, et al., 2005 p 576). Ici, nous avons donc bien l'idée de deux systèmes différents fonctionnant en interaction.

D'un point de vue neurophysiologique, cette conception est renforcée par l'existence de liens entre le cortex pré-moteur, le cortex pré-frontal dorsal et ventral et le gyrus temporal supérieur impliqué dans le langage. Comme le dit Pulvermüller (2005 p 576) « These links indicate that information flow is possible between the cortical systems for language and action » (Voir Figure 26).

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

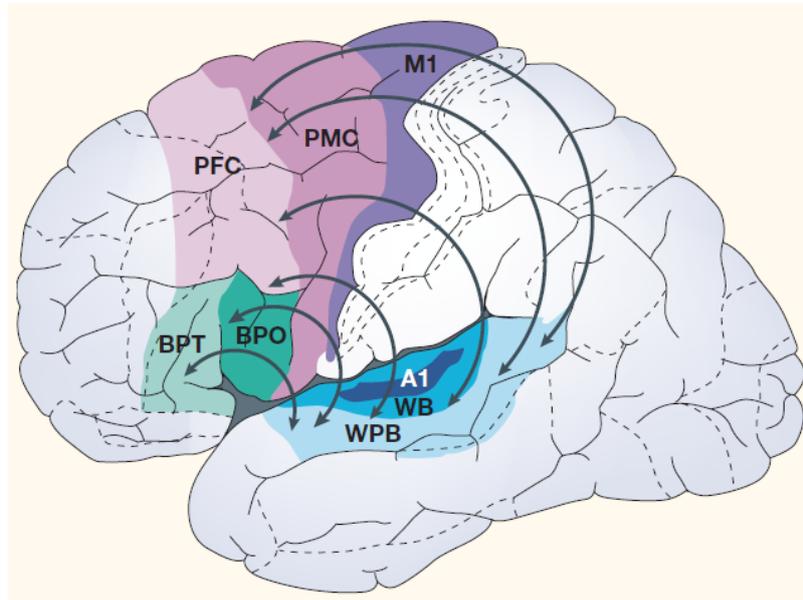


Figure 26 : Illustration des liens existant entre les zones du langage et les zones de la motricité. Les flèches indiquent des connexions cortico-corticales de longue distance. A1 : représente le cortex auditif primaire, BPO : la partie operculaire de l'aire de Broca, BPT : la partie triangulaire de l'aire de Broca, M1 : le cortex moteur primaire, PFC : partie postérieure du cortex pré-frontal, PMC : le cortex pré-moteur, WB : Cortex auditif secondaire de l'aire de Wernicke, WPB : Régions auditives tertiaires de l'aire de Wernicke. Reproduit de « Brain mechanisms linking language and action » de F. Pulvurmüller, 2005, *Nature Reviews Neuroscience*, p 577 Copyright 2005 par Nature Publishing Group.

Si une telle conception est vraie, cela suppose qu'il devrait exister des liens automatiques et très rapides entre les actions et le traitement du langage. De nombreuses preuves expérimentales viennent confirmer cette idée en montrant des liens très étroits entre action et langage (voir Partie 3.I p 71). Une autre prédiction très forte du modèle est que l'apprentissage de nouvelles associations verbe d'action-action devrait entraîner une activation des aires motrices lors du traitement des verbes d'action appris au préalable. Confirmant cette prédiction, plusieurs études ont montré que l'apprentissage de nouvelles associations verbe d'action-action entraînait rapidement l'apparition d'activations motrices lors du traitement des verbes d'action que ce soit chez l'adulte (Fargier et al., 2012) ou chez l'enfant (James & Swain, 2011). Ainsi Fargier et ses collaborateurs (2012) ont entraîné pendant deux jours consécutifs des adultes à associer de nouveaux verbes d'action avec l'observation de ces actions et ils ont ensuite mesuré la désynchronisation du rythme mu associée aux verbes appris. Les résultats montrent que l'entraînement a un effet direct sur la désynchronisation du rythme mu au niveau centro-pariétal suggérant que l'implication du système sensori-moteur dans le traitement des verbes d'action est bien reliée à la quantité d'expériences (1 jour vs 2 jours) associant le verbe

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

d'action et l'action. De plus, les activations cérébrales reliées au traitement de concepts seraient directement dépendantes des interactions sensori-motrices présentes durant la phase d'acquisition de ces concepts confirmant l'importance des associations action-langage durant l'apprentissage (Kiefer, Sim, Liebich, Hauk, & Tanaka, 2007).

A contrario, la deuxième conception postule que ce sont les mêmes structures cérébrales (c'est-à-dire le système miroir) qui sous-tendrait à la fois la compréhension des actions perçues et le traitement du langage. Dans cette conception, la sémantique serait donc directement reliée aux gestes utilisés pour communiquer et la capacité de langage des êtres humains constituerait une évolution à partir de la capacité de communication gestuelle des animaux (Corballis, 2002; Rizzolatti & Arbib, 1998). Cependant, comme le précise Rizzolatti et Craighero (2004 p 184), dans le langage humain, “ the meaning of the words and the phono-articulatory actions necessary to pronounce them are unrelated. Consequently, a necessary step for speech evolution was the transfer of gestural meaning, intrinsic to gesture itself, to abstract sound meaning”. Suivant cette idée, ce modèle fait donc « une prédiction neurophysiologique très claire: les mouvements de la main ou du bras et les mouvements nécessaires au langage doivent être strictement liés et doivent au moins partager des substrats neuronaux communs ». Plusieurs travaux ont confirmé cette conception en montrant par exemple des activations cérébrales similaires entre le traitement du langage impliquant les mains et l'observation des actions impliquant les mains (e.g., Aziz-Zadeh et al., 2006) ou encore en démontrant que l'excitabilité du cortex moteur contrôlant les gestes de la main augmente lorsque l'on lit ou l'on parle de manière spontanée (Meister et al., 2003; Seyal, Mull, Bhullar, Ahmad, & Gage, 1999; Tokimura, Tokimura, Oliviero, Asakura, & Rothwell, 1996). Ce dernier effet se limitant à l'implication de l'hémisphère gauche, il ne peut pas être uniquement expliqué par les gestes moteurs nécessaires à l'articulation des mots qui eux impliquent une activation des deux hémisphères. Ainsi, ce résultat va dans le sens d'un lien direct reliant les activations cérébrales de la main dominante et les réseaux impliqués dans des fonctions langagières de haut niveau (Meister et al., 2003). De plus, d'autres études ont clairement montré que lorsque l'on effectue des tâches linguistiques (conceptuelles ou phonologiques) et des tâches d'observation d'action impliquant les mêmes stimuli, des aires cérébrales communes sont activées (voir par exemple Meister & Iacoboni, 2007). Dans cette expérience, les auteurs ont présenté des images statiques d'objets ou des vidéos montrant une main en train de manipuler un objet. Les sujets devaient soit effectuer une tâche perceptive (dire si une partie de l'objet était noire ou si les cinq doigts de la main étaient en contact avec l'objet) soit une tâche conceptuelle (dire si l'objet était un

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

outil) ou une tâche phonologique (dire si le nom de l'objet commençait par le son [s]). Lorsque des vidéos d'actions humaines étaient présentées, les auteurs ont observé une activation au niveau des aires frontales inférieures gauches et ceci quel que soit la tâche demandée. Ce résultat supporte bien l'hypothèse évolutionniste en suggérant qu'une partie du système miroir dévolu à l'exécution et l'observation des actions a été réutilisé (« co-opted ») chez l'homme pour le langage (Meister & Iacoboni, 2007), utilisant un phénomène connu sous le nom d'exaptation (Andrews, Gangestad, & Matthews, 2002).

De manière générale, ces deux conceptions se retrouvent donc dans le fait qu'elles postulent toutes les deux l'existence d'un lien très étroit entre action et langage. Cependant, si dans la première conception, les deux fonctions se basent sur des structures cérébrales différentes en interaction, dans la deuxième conception au contraire, les deux fonctions utiliseraient un socle cérébral commun. Dans cette dernière conception, le lien action-langage serait donc inné alors que dans la première conception il apparaîtrait petit à petit au cours du développement à force d'associations entre les deux fonctions. Une manière de distinguer ces deux modèles seraient donc d'étudier l'évolution du lien action-langage au cours du développement. Actuellement, à notre connaissance, aucune étude ne s'est spécifiquement intéressée à cette question et ceci sera un de nos objectifs dans le futur (Voir Partie 4.II p 103).

IV. Conclusion

A l'issue de cette partie, l'existence d'un lien entre action et langage semble confirmée par un ensemble de preuves émanant de la neuroimagerie, de la neuropsychologie ainsi que des analyses comportementales. Même si ces différentes expériences ne suffisent pas en tant que telles pour démontrer la conception incarnée de la cognition, il n'en reste pas moins qu'elles vont dans le sens d'un fonctionnement intégré entre Cognition et motricité du moins quand il s'agit d'étudier le traitement des verbes d'action. En effet, nous avons bien conscience que nous sommes ici uniquement intéressés au traitement des verbes d'action qui représentent seulement une partie du langage. Même si certaines conceptions théoriques postulent que les mécanismes à l'œuvre seraient les mêmes pour l'ensemble des concepts et en particulier pour les mots abstraits (Pulvermüller, 2013a), d'autres auteurs au contraire envisagent une spécificité syntaxique de la catégorie « verbe » qu'ils soient d'action ou non (Freddi, Esteban, & Dru, 2015). D'autres enfin postulent l'existence d'un continuum allant d'une absence d'embodiment

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

(« unembodied »), pour le traitement des mots symboliques, à l'existence d'un fort embodiment (« strong embodiment ») pour le traitement des verbes d'action (Meteyard, Cuadrado, Bahrami, & Vigliocco, 2012). Etudier le rôle du système moteur pour ces différentes catégories de mots reste donc un objectif important pour la suite des travaux dans le domaine.

De manière intéressante, le lien existerait à la fois entre production d'action et langage et entre observation d'action et langage allant dans le sens de l'activation de représentations communes pour l'ensemble de ces fonctions. Cependant, comme nous l'avons souligné précédemment (voir Partie 3.III p 94), l'activation de représentations communes pour l'action et le langage pourraient être reliées à différents mécanismes allant de la formation d'associations entre système moteur et système langagier avec l'apprentissage (Pulvermüller, 2005) jusqu'à l'activation post-lexicale du système sensori-moteur (Caramazza et al., 2014; Mahon & Caramazza, 2008) en passant par l'existence d'un seul et même système basé sur les capacités d'imitation et de reconnaissance de l'action (Rizzolatti & Arbib, 1998; Rizzolatti & Craighero, 2004). Distinguer ces différentes perspectives sera un important challenge des études futures. Par ailleurs, plusieurs travaux ont mis en évidence l'importance de certaines caractéristiques des mots (en particulier le contexte de présentation) dans l'activation de ces représentations (Aravena et al., 2012; Bidet-Ildei et al., 2016; Zwaan et al., 2010). Une autre question importante sera de déterminer si l'activation de ces représentations est également dépendante de certaines caractéristiques des actions comme par exemple la cinématique ou le contexte (Voir Partie 4.I p 101). De nombreux points sont donc encore à éclaircir avant de pouvoir proposer un modèle du lien action-observation d'action-langage même si cela reste un de mes objectifs dans le futur.

De plus, les travaux présentés dans cette partie n'ont pas réellement permis de mettre en évidence de spécificité du lien perception d'action-langage dans le sens où nous obtenons des résultats quasiment similaires qu'on considère le lien production d'action-langage ou perception d'action-langage. Cependant, une de nos études semble suggérer l'existence d'un lien plus étroit entre observation d'action et traitement des verbes d'action dans le sens où le contexte de présentation du mot semble avoir moins d'impact sur une tâche subséquente d'observation d'action (Bidet-Ildei et al., 2016) que de production d'action (Aravena et al., 2012). En effet, comme nous l'avons montré précédemment, la détection visuelle d'un mouvement congruent imbriqué dans un masque est plus performante lorsqu'un verbe d'action

PARTIE 3 : LIEN PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS- LANGAGE

congruent est présenté en amorce et ceci quel que soit le contexte de présentation de ce verbe. Ceci suggère une certaine automaticité du lien langage-observation d'action. Ainsi, la simple présentation d'un verbe pourrait activer de manière automatique la représentation de l'action bien que l'activation de cette représentation semble retarder ou moins forte lorsque le contexte de présentation du verbe n'est pas plausible. Ce résultat qui irait dans le sens des théories de l'évolution devra être étudié de manière plus approfondie dans le futur.

Enfin, Si quelques études se sont intéressées au rôle de ce lien dans le fonctionnement de l'individu en montrant par exemple un déficit de ce lien dans certaines pathologies (par exemple dans l'autisme, voir Moseley, Mohr, et al., 2013) ou un intérêt de ce lien dans la rééducation de certains troubles (comme l'aphasie, voir Marangolo et al., 2012), la fonction précise de l'existence d'un lien langage-action reste encore obscure et la clarification du rôle de ce lien sera également l'un des défis des études futures.

Partie 4 : Perspectives

L'objectif de cette partie est de donner quelques pistes sur l'orientation de mes recherches pour les prochaines années. De manière générale, je souhaite poursuivre l'étude du lien existant entre observation d'action et sémantique en m'intéressant particulièrement aux caractéristiques des actions déterminant l'activation du lien action-langage, aux origines de ce lien, au rapport existant entre ce lien et les capacités de cognition sociale et enfin à la possible utilisation de ce lien dans le rééducation.

I. Les caractéristiques des actions déterminant l'activation du lien action-langage

Comme nous l'avons présenté précédemment (Voir Partie 3.II p 91), plusieurs travaux expérimentaux suggèrent que le lien action-langage pourraient être modulés par les caractéristiques de présentation du verbe d'action ceci que l'on considère le lien langage-production d'action (Aravena et al., 2012, 2014; Taylor & Zwaan, 2008; Zwaan et al., 2010) ou le lien langage-perception d'action (Bidet-Ildei et al., 2016; Troyer, Curley, Miller, Saygin, & Bergen, 2014). Cependant, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à la modulation du lien action-langage par les caractéristiques de présentation de l'action et ceci constitue un des premiers objectifs de nos futurs travaux. Pour investiguer cette question l'utilisation de l'observation d'action est particulièrement bien adaptée puisque cela permet directement de pouvoir étudier l'impact de chaque modification des caractéristiques de l'action, prise isolément, sur la force du lien action-langage.

Les nombreuses expériences effectuées sur les capacités d'observation et de reconnaissance des mouvements humains ont permis de montrer que cette capacité est très sensible à différents facteurs tels que la cinématique et l'orientation (Voir Partie 1.II p 37). En effet, dès la naissance, il existerait une sensibilité accrue à ces différentes caractéristiques (Bardi et al., 2014; Meary et al., 2007; Simion et al., 2008) et leur perturbation entrainerait une modification des capacités perceptives des sujets (Bidet-Ildei, Kitromilides-Salerio, et al., 2011; Bidet-Ildei, Orliaguet, et al., 2006; Martel et al., 2011; Pavlova & Sokolov, 2000). Ainsi, par exemple, la présentation d'un mouvement humain associé à une cinématique non-biologique, c'est-à-dire à une dynamique ne respectant pas la dynamique observée lors de la production naturelle du geste, modifie les jugements perceptifs des gestes moteurs (Bidet-Ildei, Kitromilides-Salerio, et al., 2011; Bidet-Ildei, Orliaguet, et al., 2006; de'Sperati & Viviani,

1997; Viviani & Stucchi, 1989). De plus, nous avons mis en évidence récemment un effet de la cinématique sur le traitement de la sémantique en montrant que la génération aléatoire de chiffre est modifiée lorsqu'elle est associée à une amorce présentant une cinématique non-biologique, ce qui montre un effet potentiel de la dynamique des gestes sur le traitement de concepts abstraits (Badets, Bidet-Ildei, & Pesenti, 2015, Volume 2 p 149). Par ailleurs, d'autres études ont montré que le contexte de réalisation d'une action (usuel vs non-usuel) influence la production du geste associé (Taylor & Zwaan, 2010) ainsi que les réseaux neuronaux impliqués lors de l'observation des actions (Brass, Schmitt, Spengler, & Gergely, 2007). En particulier l'interprétation d'actions non-usuelles solliciteraient en plus de l'activation du « système miroir », l'activation d'autres zones cérébrales (jonction temporo-pariétal, partie médiale du cortex pré-frontal, insula) davantage reliées à « un raisonnement moteur analytique » (“mentalizing system”, voir Van Overwalle & Baetens, 2009 pour une méta-analyse).

L'objectif de cette première partie sera donc de déterminer comment ces différentes caractéristiques sont impliquées dans le lien observation d'action-traitement des verbes d'action. Pour cela, nous proposons d'utiliser des paradigmes classiques d'amorçage dans lesquels nous demanderons à des participants adultes de juger des verbes d'action (tâche de décision sémantique par exemple) après avoir observé en amorce un mouvement humain naturel ou dans lequel une caractéristique aura été modifiée (cinématique du mouvement, orientation du mouvement ou contexte de l'action). Une première étude nous a permis de montrer que dans le cas d'une présentation en amorce d'un mouvement naturel (sans modification), nous obtenions un effet de facilitation sur les verbes congruents se manifestant par des temps de réponse plus courts (Beauprez & Bidet-Ildei, Soumisa). L'impact de la modification de chaque caractéristique sera donc évalué en analysant si cet effet de facilitation persiste, diminue ou disparaît en fonction des changements appliqués au mouvement présenté en amorce. Par ailleurs, ces expériences comportementales s'accompagneront d'enregistrements au niveau cérébral afin de déterminer si la manipulation de ces caractéristiques influence ou non les systèmes dévolus au lien action-langage.

Ce premier projet fait partie intégrante des objectifs de la thèse de Sophie-Anne Beauprez commencée en Septembre 2015. Les premières investigations (Beauprez & Bidet-Ildei, Soumisa) semblent montrer un effet déterminant du contexte de présentation de l'action avec une disparition de l'effet de facilitation lorsque l'action congruente est présentée dans un contexte non-usuel (par exemple arroser un ordinateur) plutôt que usuel (par exemple arroser des fleurs). Les effets de la cinématique et de l'orientation devraient être investigués courant

2017. Etant donné l'importance de l'orientation et de la cinématique dans le jugement des mouvements biologiques représentant des actions humaines (Voir Partie 1.I.2 p 37), nous pouvons nous attendre à obtenir des perturbations du lien action-langage lorsque l'on manipule ces caractéristiques pour qu'elles ne correspondent plus à celles observées lors de la production d'un mouvement humain (cinématique non biologique, orientation non canonique).

De manière intéressante, cette problématique nous a amené à développer un nouvel outil de présentation et de transformation de séquence animées représentant des mouvements humains : PLAViMoP (Point Light Actions Visualization and Modification Platform). Cet outil issu d'une collaboration entre le laboratoire CeRCA et l'Institut PPRIME associe un logiciel permettant de visualiser des séquences animées de mouvements ainsi qu'une application développée sous Matlab permettant de les modifier (modification de la cinématique, de l'orientation, ajout de masques...). Ce logiciel fait actuellement l'objet d'une déclaration de logiciel et devrait être disponible gratuitement sur internet d'ici la fin de l'année 2017.

II. Les origines du lien action-langage

Comme présenté précédemment (Voir Partie 3.III p 94), une autre question importante de la littérature concerne l'apparition du lien entre action et langage. En effet, pour rendre compte du lien existant entre l'action et le langage, certains auteurs proposent une théorie associationniste basée sur une construction progressive du lien à force d'associations répétées entre le mot et l'action (Pulvermüller, Hauk, et al., 2005) alors que d'autres auteurs défendent plutôt une théorie évolutionniste qui envisage le lien comme la manifestation d'une évolution entre un système de reconnaissance des actions déjà présent chez le singe et le système langagier des êtres humains (Rizzolatti & Craighero, 2004). Ces deux conceptions théoriques nous mènent à des prédictions différentes sur la manière dont le lien action-langage serait acquis au cours du développement typique. Pour la théorie associationniste, la force du lien dépend directement du nombre d'associations rencontrées par l'individu au cours de sa vie. On peut donc raisonnablement penser que plus l'enfant grandit et plus il aura l'occasion d'effectuer des associations entre les verbes d'action et les actions qu'ils représentent et donc plus la force du lien augmentera. Pour la théorie évolutionniste, au contraire, le lien devrait exister d'emblée puisque les capacités langagières dériveraient directement des capacités d'observation et de compréhension des actions présentes à la naissance.

A ce jour, quelques expériences se sont intéressées à la manière dont le lien action-langage se crée en évaluant notamment comment des adultes apprenaient de nouveaux verbes d'action (Fargier et al., 2012). Chez l'enfant, peu d'expériences ont testé l'implication du système sensori-moteur lors du traitement des verbes d'action (James & Maouene, 2009; James & Swain, 2011). Notons que ces expériences ont permis de démontrer que dès 4 ans le système sensori-moteur des enfants est recruté lors du traitement de verbes d'action (James & Maouene, 2009) et que ce recrutement est dépendant de l'expérience sensori-motrice de l'action, la simple observation n'étant pas suffisante pour créer le lien langage-action (James & Swain, 2011). Cependant, ces études ne se sont pas réellement intéressées à l'évolution du lien action-langage au cours du développement et n'ont pas testé à proprement parler le lien existant entre l'observation des actions et le traitement des verbes d'action. L'objectif de cette seconde partie sera donc d'étudier à quel moment le lien entre observation d'action et traitement des verbes d'action apparaît chez l'enfant et comment ce lien évolue au cours du développement typique.

Pour réaliser cet objectif, nous étudierons l'évolution du lien action-langage chez différents groupes d'enfants âgés de 3 à 12 ans et chez l'adulte. Les enfants étant très jeunes, nous voudrions limiter le recours à des analyses de temps de réaction qui peuvent être très variables d'un sujet à l'autre. Nous nous proposons donc d'investiguer le lien action-langage à travers l'enregistrement de mouvements oculaires (utilisation du Tobii 1750) sur une image représentant un corps humain après la présentation orale d'un verbe d'action en amorce. Cette procédure, complètement implicite, nous permettra d'étudier la création du lien tout en évitant l'utilisation de consignes complexes qui pourraient être plus ou moins bien comprises par les enfants. Etant donnée la littérature démontrant le respect de la somatotopie lors du traitement de verbes d'action chez l'adulte (Hauk et al., 2004), nous nous attendons à pouvoir objectiver le lien langage-action par l'enregistrement d'une première fixation sur le segment corporel majoritairement impliqué dans la réalisation de l'action (par exemple la main si on présente en amorce le verbe « découper » ou la bouche si on présente le verbe « sourire »). Ce second objectif fait également parti de la thèse de Sophie-Anne Beauprez. Des premières expérimentations sont actuellement en cours chez l'adulte et un pré-test du matériel verbal a été effectué chez les enfants de petite section de maternelle afin d'évaluer les verbes d'action maîtrisés.

Par ailleurs, une autre manière de tester la distinction des modèles associationniste et évolutionniste est d'investiguer le rôle des associations entre action et langage dans l'existence et la force des activations motrices reliées au traitement des verbes appris. En effet, dans la

conception associationniste, seules des associations répétées entre action et langage pourront engendrer petit à petit la co-activation des systèmes moteurs et langagiers. Ainsi, seul un apprentissage associant des nouveaux verbes d'action et des actions pourra conduire à une activation du système moteur lors du traitement de ces nouveaux verbes. De plus on peut s'attendre à ce que la force de l'activation dépende directement du nombre d'associations réalisées. Au contraire, dans la conception évolutionniste, les associations entre langage et action ne seraient pas nécessaire à l'apparition du lien puisqu'il existerait d'emblée. Ainsi, un apprentissage de nouveaux verbes d'action par pures inférences langagières devrait permettre d'activer le système moteur. Dans le cadre du groupe « cognition incarnée » que j'ai créé en Septembre 2013 et qui associe 5 équipes du CeRCA associant des spécialistes dans le domaine sensori-moteur, langagier et social, nous souhaitons tester cette hypothèse en comparant les activations motrices reliées au traitement de verbes d'action suivant le type d'apprentissage effectué (par association verbe-action ou par inférence). Actuellement, une première étape est en cours, consistant à trouver une méthodologie comportementale fiable de mesure des activations motrices pour des verbes d'actions connus.

III. Lien action-langage et cognition sociale

Comme nous l'avons vu précédemment (Voir Partie 3.III. 2 p 91), beaucoup de travaux expérimentaux soutiennent clairement l'implication du système miroir lors du traitement de verbes d'action (voir Aziz-Zadeh & Ivry, 2009; Fischer & Zwaan, 2008; Jirak et al., 2010; Pulvermüller, Hauk, et al., 2005; Willems & Hagoort, 2007 pour des revues). Dans cette conception, la compréhension des verbes d'action solliciterait le « système miroir » de la même manière que la production ou l'observation des actions ce qui suggère que la capacité à comprendre les actions des autres et la capacité à comprendre les mots d'action seraient sous-tendues par les mêmes structures neurophysiologiques. Dans ce contexte, les capacités langagières seraient donc directement liées aux capacités d'observation et d'imitation des êtres humains (e.g., Fadiga & Craighero, 2006). Cela suggère que des populations présentant un déficit d'observation ou d'imitation des actions devraient également présenter un déficit spécifique dans la compréhension des verbes d'action.

Dans ce contexte, l'étude de populations présentant des troubles autistiques pourrait être particulièrement enrichissante. L'autisme est un trouble neurodéveloppemental caractérisé par des déficits dans la communication sociale, des comportements répétitifs et/ou stéréotypés et

des intérêts restreints (voir définition du DSM 5). Plusieurs études montrent également que ces populations présenteraient une activation atypique du système miroir (Martineau, Andersson, Barthelemy, Cottier, & Destrieux, 2010; Martineau, Cochin, Magne, & Barthelemy, 2008; Somogyi, Kiraly, Gergely, & Nadel, 2013) et des difficultés dans la reconnaissance des mouvements humains (see Pavlova, 2012 for a review). Récemment, il a été montré que les adultes présentant des troubles autistiques auraient également des activations cérébrales atypiques et des performances amoindries lors du jugement de verbes d'action (Moseley et al., 2013). Cependant, la spécificité du déficit de traitement des verbes d'action ainsi que les mécanismes entrant en jeu dans ce déficit n'ont pas encore été étudiés.

Dans le présent projet nous proposons donc de mener plusieurs expériences visant à étudier les mécanismes à l'œuvre dans le jugement de verbes d'action chez les personnes avec autisme. Ce projet a une visée théorique dans le sens où il nous permettra d'apporter des arguments sur la question des origines du lien action-langage et également une visée neuropsychologique puisqu'il permettra de faire avancer les connaissances sur le fonctionnement des personnes avec autisme. A terme, il pourra permettre de proposer de nouvelles techniques de remédiation pour cette population.

Pour réaliser cet objectif, nous proposons dans un premier temps de tester l'existence d'un lien action-langage chez les personnes souffrant d'autisme. Pour cela, nous utiliserons un paradigme classique de préférence visuelle couplé à la présentation auditive de mots d'action congruents et non-congruents et de mots neutres. En fonction de l'âge des patients et des déficits intellectuels éventuellement associés, des techniques d'enregistrement des mouvements oculaires comparables à celles proposées pour évaluer le lien action-langage chez l'enfant pourraient également être utilisées. Le lien action-langage se manifestant classiquement par un effet de facilitation lorsque l'amorce et le verbe sont congruents, nous nous attendons à observer une diminution de cet effet de congruence chez les personnes souffrant d'autisme. Dans un deuxième temps, l'utilisation des enregistrements oculaires pourrait nous permettre d'évaluer l'effet de somatotopie du lien action-langage dans cette population. De manière globale, l'idée est que si le lien action-langage se base sur le système miroir, nous pouvons nous attendre à un déficit de ce lien chez les personnes avec autisme qui pourrait se manifester entre autre par une disparition de l'activation automatique des représentations sensorimotrices reliées au traitement d'un verbe d'action (Moseley, Mohr, et al., 2013) et ceci alors que le sens des verbes peut être évoqué de manière explicite. En outre, la force du lien devrait être directement reliée à l'importance des symptômes autistiques mesurée par des échelles classiques type ADI

(Autism Diagnostic Interview) et ADOS (Autism Diagnostic Observation Schedule) ainsi que par des échelles plus spécifiques telles que la GRAM (Grille Régulation-Adaptation-Modulation) ou la BECS (Batterie d'Évaluation Cognitive et Socio-émotionnelle). Ce projet a eu l'approbation du centre Ressources Autisme de Poitiers et devrait débuter au cours de l'année 2017-2018.

L'évaluation des liens action-langage et cognition sociale pourra également passer par une comparaison des liens action-langage chez les hommes et les femmes. En effet, plusieurs études ont montré que les femmes ont des capacités plus importantes que les hommes en ce qui concerne l'interprétation des comportements sociaux (Sokolov et al., 2011) en lien avec un système miroir plus développé (Cheng et al., 2009). Ainsi, si l'efficacité du lien action-langage est reliée aux capacités du système miroir, nous pouvons nous attendre à obtenir un lien action-langage plus important chez les femmes que chez les hommes. Des expériences comportementales comparant les effets de facilitation pour des stimuli congruents sont envisagées ainsi que des mesures d'activations cérébrales. Cette partie du projet devrait faire l'objet d'une collaboration avec Marina Pavlova (Cognitive and Social Neuroscience Unit, Eberhard Karls University of Tuebingen) une collègue allemande spécialisée dans l'étude des différences homme-femme lors de l'observation des mouvements humains. Un accord de principe a déjà été donné et ces travaux devraient pouvoir débuter d'ici 2018. Une demande d'ANR Franco-Allemande va être déposée dans ce sens en Mars 2017.

IV. Quelles utilisations du lien action-langage dans la rééducation ?

Plusieurs travaux ont d'ores et déjà montré l'intérêt du lien existant entre l'action et le langage dans la rééducation (Bonifazi et al., 2013; Marangolo et al., 2010, 2012; Marangolo & Caltagirone, 2014). Cependant, jusqu'à présent, les travaux réalisés se sont concentrés sur l'intérêt de l'observation d'action pour la rééducation de troubles du langage. Hors, comme nous l'avons présenté précédemment, le lien action-langage est réciproque (Beauprez & Bidet-Ildei, Soumisa; Bidet-Ildei, Sparrow, et al., 2011; Liepelt et al., 2012) et si l'action peut être utile dans la rééducation de troubles du langage, nous pouvons penser également qu'une rééducation par le traitement de verbes d'action pourrait être utile dans la rééducation de troubles moteurs en stimulant l'activation des représentations sensori-motrices. Ceci pourrait

être d'autant plus important à intégrer dans des prises en charge que nous avons montré qu'une immobilisation de seulement 24H du bras entraîne déjà des conséquences sur le traitement des verbes d'action en lien avec le bras (Bidet-Ildei et al., In press). Dans le cadre des stages de Master IRHPM (Ingénierie de la Rééducation, du Handicap et de la Performance Motrice) de la Faculté des Sciences du Sport de l'Université de Poitiers, nous commençons à étudier cette question en analysant les bénéfices du traitement de verbes d'action sur la rééducation fonctionnelle de troubles moteurs centraux ou périphériques.

Par ailleurs, aujourd'hui en France, 6 à 8 % des enfants présenteraient des troubles des apprentissages se manifestant par des difficultés importantes dans un des domaines d'apprentissage (lecture, calcul) ne pouvant pas s'expliquer par des problèmes physiques, une déficience intellectuelle, un manque de stimulations ou des privations affectives. Parmi ces troubles, nous proposons de nous intéresser particulièrement aux troubles spécifiques touchant le langage et la motricité (dyslexie, dysphasie, dyspraxie). La compréhension de ces troubles a déjà donné lieu à de nombreux travaux expérimentaux (voir Hill, 2001 pour des revues; Reynolds et al., 2015), mais, à notre connaissance, aucune recherche n'a porté sur l'investigation du lien observation d'action-traitement des verbes d'action chez ces populations. L'objectif de cette dernière partie sera d'évaluer dans quelle mesure les troubles spécifiques du langage ou de la motricité peuvent affecter le lien action-langage. Un deuxième objectif de cette partie sera également de voir si une remédiation basée sur la création explicite de ce lien pourrait être bénéfique à ces populations.

Pour cela, nous nous proposons dans un premier temps d'évaluer le lien action-langage chez des enfants présentant des troubles spécifiques du langage ou de la motricité. Si nous observons une manifestation atypique du lien ou une absence de lien chez l'une ou l'autre de ces populations, nous essaierons dans un second temps d'évaluer dans quelle mesure le suivi d'un programme explicite d'associations action-langage peut être bénéfique dans la création du lien. Ce projet est en cours d'élaboration et pourrait faire l'objet d'une collaboration avec l'équipe MOCOCO (Motor Control & Cognition) de l'Institut de Neurosciences Cognitives et Intégratives d'Aquitaine (INICIA, UMR 5287).

Enfin, de plus en plus de travaux ont montré que le fait de lier un mot avec une action pouvait avoir un effet bénéfique sur la mémoire (effet de « réalisation de l'action »). Ainsi, lorsque que durant la phase d'encodage on demande à des sujets sains ou à des patients souffrant

d'amnésie de réaliser un geste en lien avec l'objet qu'ils perçoivent, les performances de rétention sont augmentées ce qui suggère que la production d'action pourraient avoir un impact positif sur la rééducation de patients souffrant d'amnésie (Hainselin et al., 2014). De manière intéressante, il a été montré que l'effet bénéfique se retrouve également lorsque l'action produite en encodage n'est pas liée de manière sémantique au matériel à apprendre suggérant que l'activation du système moteur pourrait suffire pour améliorer les performances mnésiques (Brouillet, Milhau, Brouillet, & Servajean, 2016). Partant de ce principe, nous envisageons de tester si une simple, activation du système moteur par des tâches de rotation mentale de segments corporels (Meugnot, Almecija, & Toussaint, 2014) ou des tâches de jugement de mouvements biologiques (Bidet-Ildi et al., 2010) pourraient également présenter des bénéfices dans les capacités mnésiques. Cette question est actuellement en cours d'investigation dans le cadre d'une collaboration au sein du groupe « cognition incarnée » du CeRCA avec Lucette Toussaint et plusieurs membres de l'équipe Vieillesse du CeRCA.

Pour conclure, la compréhension des mécanismes sous-tendant la capacité des êtres humains à interpréter des actions a déjà engendré de très nombreux travaux expérimentaux. L'ensemble de ces travaux a permis de montrer l'importance de cette capacité qui apparaît dès la naissance et reste présente tout au long de la vie. Celle-ci serait étroitement liée à l'expérience motrice des individus tout en présentant certaines spécificités et en étant préservée (au moins en partie) même en dehors de toute expérience motrice. Par ailleurs, elle entretiendrait également des liens étroits avec des fonctions cognitives de plus haut niveau comme le langage, le traitement des nombres ou la mémoire et pourrait même pour certains auteurs être directement liée à l'apparition des capacités langagières. Globalement, il apparaît donc clairement que si la possibilité de se mouvoir reste déterminante chez l'homme, la capacité à interpréter les actions d'autrui pourrait également avoir un rôle déterminant et même éventuellement être replacée au centre des interactions entre sensorimotricité et cognition. Ainsi, la compréhension des mécanismes sous-tendant la perception des actions pourrait nous permettre de mieux comprendre le fonctionnement de l'Homme. Cependant, comme nous l'avons vu tout au long de ce document, elle demeure encore un mystère sous de nombreux aspects et reste pour moi un objet d'étude des plus motivants pour la suite de mes recherches.

Partie 5: Références

REFERENCES

- Alaerts, K., Nackaerts, E., Meyns, P., Swinnen, S. P., & Wenderoth, N. (2011). Action and emotion recognition from point light displays: an investigation of gender differences. *PLoS ONE*, *6*(6), e20989. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020989>
- Alaerts, K., Swinnen, S. P., & Wenderoth, N. (2009). Interaction of sound and sight during action perception: evidence for shared modality-dependent action representations. *Neuropsychologia*, *47*(12), 2593–2599. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.05.006>
- Andres, M., Finocchiaro, C., Buiatti, M., & Piazza, M. (2015). Contribution of motor representations to action verb processing. *Cognition*, *134*, 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.10.004>
- Andrews, P. W., Gangestad, S. W., & Matthews, D. (2002). Adaptationism--how to carry out an exaptationist program. *The Behavioral and Brain Sciences*, *25*(4), 489-504-553.
- Aravena, P., Courson, M., Frak, V., Cheylus, A., Paulignan, Y., Deprez, V., & Nazir, T. A. (2014). Action relevance in linguistic context drives word-induced motor activity. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 163. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00163>
- Aravena, P., Delevoeye-Turrell, Y., Deprez, V., Cheylus, A., Paulignan, Y., Frak, V., & Nazir, T. (2012). Grip force reveals the context sensitivity of language-induced motor activity during “action words” processing: evidence from sentential negation. *PLoS ONE*, *7*(12), e50287. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050287>
- Atkinson, A. P., Dittrich, W. H., Gemmell, A. J., & Young, A. W. (2004). Emotion perception from dynamic and static body expressions in point-light and full-light displays. *Perception*, *33*(6), 717–746.
- Aziz-Zadeh, L., & Damasio, A. (2008). Embodied semantics for actions: findings from functional brain imaging. *Journal of Physiology Paris*, *102*(1–3), 35–39.
- Aziz-Zadeh, L., & Ivry, R. B. (2009). The human mirror neuron system and embodied representations. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *629*, 355–376.
- 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), 1818–1823.
- Badets, A., Bidet-Ildei, C., & Pesenti, M. (2015). Influence of biological kinematics on abstract concept processing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (Hove)*, *68*(3), 608–18. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.964737>
- 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.
- Bak, T. H., Yancopoulou, D., Nestor, P. J., Xuereb, J. H., Spillantini, M. G., Pulvermuller, F., & Hodges, J. R. (2006). Clinical, imaging and pathological correlates of a hereditary deficit in verb and action processing. *Brain*, *129*(Pt 2), 321–32.
- Bardi, L., Regolin, L., & Simion, F. (2011). Biological motion preference in humans at birth: role of dynamic and configural properties. *Developmental Science*, *14*(2), 353–359. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00985.x>
- Bardi, L., Regolin, L., & Simion, F. (2014). The first time ever I saw your feet: inversion effect in newborns’ sensitivity to biological motion. *Developmental Psychology*, *50*(4), 986–993. <https://doi.org/10.1037/a0034678>
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral Brain Sciences*, *22*(4), 577–609–60.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617–45. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>

REFERENCES

- Beardsworth, T., & Buckner, T. (1981). The ability to recognize oneself from a video recording of one's movements without seeing one's body. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18(1), 19–22.
- Beauchamp, M. S., Lee, K. E., Haxby, J. V., & Martin, A. (2003). fMRI responses to video and point-light displays of moving humans and manipulable objects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(7), 991–1001. <https://doi.org/10.1162/089892903770007380>
- Beauprez, S.-A., & Bidet-Ildei, C. (Soumisa). Perceiving a biological human movement facilitates action word processing. *Current Psychology*.
- Beauprez, S.-A., & Bidet-Ildei, C. (Soumisa). Usual or unusual actions: How action context modulates the action-language relationship. *Acta Psychologica (Amst)*.
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06013.x>
- Bidet-Ildei, C., & Bouquet, C. A. (2014). Motor Knowledge Modulates Attentional Processing during Action Judgment. *Athens Journal of Social Sciences*, 2, 249–262.
- Bidet-Ildei, C., Chauvin, A., & Coello, Y. (2010). Observing or producing a motor action improves later perception of biological motion: Evidence for a gender effect. *Acta Psychologica (Amst)*, 134(2), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.02.002>
- Bidet-Ildei, C., Gimenes, M., Toussaint, L., Almecija, Y., & Badets, A. (2016). Sentence plausibility influences the link between action words and the perception of biological human movements. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-016-0776-z>
- Bidet-Ildei, C., Kitromilides, E., Orliaguet, J. P., Pavlova, M., & Gentaz, E. (2014). Preference for Point-Light Human Biological Motion in Newborns: Contribution of Translational Displacement. *Developmental Psychology*, 50(1), 113–120. <https://doi.org/10.1037/a0032956>
- Bidet-Ildei, C., Kitromilides-Salerio, E., Orliaguet, J. P., & Badets, A. (2011). Perceptual Judgements of Handwriting and Pointing Movements: Influence of Kinematics Rules. In A. M. Columbus (Ed.), *Advances in Psychology Research* (Vol. 77, pp. 307–316). New York: Nova Publisher.
- Bidet-Ildei, C., Meary, D., & Orliaguet, J. P. (2008). Visual preference for isochronic movement does not necessarily emerge from movement kinematics: a challenge for the motor simulation theory. *Neuroscience Letters*, 430(3), 236–40. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.10.040>
- Bidet-Ildei, C., Méary, D., & Orliaguet, J.-P. (2006). Visual perception of elliptic movements in 7-to-11 year old children: Evidence of motor-perceptual interactions. *Current Psychology Letters*, 2(19).
- Bidet-Ildei, C., Meugnot, A., Beauprez, S.-A., Gimenes, M., & Toussaint, L. (In press). Short-term upper limb immobilization affects action-word understanding. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory & Cognition*.
- Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J. P., & Coello, Y. (2011). Rôle des représentations motrices dans la perception visuelle des mouvements humains. *L'Année Psychologique*, 111(2), 409–445. <https://doi.org/10.4074/S0003503311002065>
- Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J. P., Sokolov, A. N., & Pavlova, M. (2006). Perception of elliptic biological motion. *Perception*, 35(8), 1137–47.
- Bidet-Ildei, C., Sparrow, L., & Coello, Y. (2011). Reading action word affects the visual perception of biological motion. *Acta Psychologica (Amst)*, 137(3), 330–4. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.04.001>

REFERENCES

- Bidet-Ildei, C., Tamamiya, Y., & Hiraki, K. (2013). Observation and action priming in anticipative tasks implying biological movements. *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne De Psychologie Expérimentale*, *67*(4), 253–259. <https://doi.org/10.1037/a0034333>
- Bidet-Ildei, C., & Toussaint, L. (2015). Are judgments for action verbs and point-light human actions equivalent? *Cognitive Processing*, *16*(1), 57–67. <https://doi.org/10.1007/s10339-014-0634-0>
- Bischoff, M., Zentgraf, K., Lorey, B., Pilgramm, S., Balsler, N., Baumgartner, E., ... Munzert, J. (2012). Motor familiarity: brain activation when watching kinematic displays of one's own movements. *Neuropsychologia*, *50*(8), 2085–2092. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.05.009>
- Bischoff, M., Zentgraf, K., Pilgramm, S., Krueger, B., Balsler, N., Sauerbier, I., ... Munzert, J. (2015). Anticipating action effects with different attention foci is reflected in brain activation. *Perceptual and Motor Skills*, *120*(1), 36–56. <https://doi.org/10.2466/22.24.PMS.120v10x7>
- Blake, R. (1993). Cats perceive biological motion. *Psychological Science*, *4*, 54–57.
- Blake, R., & Shiffrar, M. (2007). Perception of human motion. *Annual Review of Psychology*, *58*, 47–73.
- Bonda, E., Petrides, M., Ostry, D., & Evans, A. (1996). Specific involvement of human parietal systems and the amygdala in the perception of biological motion. *Journal of Neuroscience*, *16*(11), 3737–44.
- Bonifazi, S., Tomaiuolo, F., Altoè, G., Ceravolo, M. G., Provinciali, L., & Marangolo, P. (2013). Action observation as a useful approach for enhancing recovery of verb production: new evidence from aphasia. *European Journal of Physical Rehabilitation Medicine*, *49*, 473–481.
- Borroni, P., Gorini, A., Riva, G., Bouchard, S., & Cerri, G. (2011). Mirroring avatars: dissociation of action and intention in human motor resonance. *The European Journal of Neuroscience*, *34*(4), 662–669. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07779.x>
- Bottari, D., Troje, N. F., Ley, P., Hense, M., Kekunnaya, R., & Röder, B. (2015). The neural development of the biological motion processing system does not rely on early visual input. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *71*, 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.07.029>
- Boulenger, V., Mechtouff, L., Thobois, S., Broussolle, E., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2008). Word processing in Parkinson's disease is impaired for action verbs but not for concrete nouns. *Neuropsychologia*, *46*(2), 743–56. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.007>
- Boulenger, V., Roy, A. C., Paulignan, Y., Deprez, V., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2006). Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(10), 1607–15.
- Boulenger, V., Silber, B. Y., Roy, A. C., Paulignan, Y., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2008). Subliminal display of action words interferes with motor planning: a combined EEG and kinematic study. *Journal of Physiology Paris*, *102*(1–3), 130–6.
- Boutin, A., Fries, U., Panzer, S., Shea, C. H., & Blandin, Y. (2010). Role of action observation and action in sequence learning and coding. *Acta Psychologica*, *135*(2), 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.07.005>
- Brass, M., Schmitt, R. M., Spengler, S., & Gergely, G. (2007). Investigating action understanding: inferential processes versus action simulation. *Current Biology*, *17*(24), 2117–2121. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.057>

REFERENCES

- Brouillet, D., Milhau, A., Brouillet, T., & Servajean, P. (2016). Effect of an unrelated fluent action on word recognition: A case of motor discrepancy. *Psychonomic Bulletin & Review*. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1160-0>
- Buccino, G., Riggio, L., Melli, G., Binkofski, F., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (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.
- Caggiano, V., Fogassi, L., Rizzolatti, G., Casile, A., Giese, M. A., & Thier, P. (2012). Mirror neurons encode the subjective value of an observed action. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(29), 11848–11853. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205553109>
- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grezes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cerebral Cortex*, *15*(8), 1243–9.
- Calvo-Merino, B., Grezes, J., Glaser, D. E., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2006). Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Current Biology*, *16*(19), 1905–10.
- Caramazza, A., Anzellotti, S., Strnad, L., & Lingnau, A. (2014). Embodied cognition and mirror neurons: a critical assessment. *Annual Review of Neuroscience*, *37*, 1–15. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071013-013950>
- Cardona, J. F., Gershanik, O., Gelormini-Lezama, C., Houck, A. L., Cardona, S., Kargieman, L., ... Ibanez, A. (2013). Action-verb processing in Parkinson's disease: new pathways for motor-language coupling. *Brain Structure & Function*, *218*(6), 1355–73. <https://doi.org/10.1007/s00429-013-0510-1>
- Cardona, J. F., Kargieman, L., Sinay, V., Gershanik, O., Gelormini, C., Amoruso, L., ... Ibáñez, A. (2014). How embodied is action language? Neurological evidence from motor diseases. *Cognition*, *131*(2), 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.02.001>
- Casile, A., & Giese, M. A. (2005). Critical features for the recognition of biological motion. *Journal of Vision*, *5*(4), 348–360. <https://doi.org/10.1167/5.4.6>
- Casile, A., & Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Current Biology*, *16*(1), 69–74.
- Catmur, C., Walsh, V., & Heyes, C. (2007). Sensorimotor learning configures the human mirror system. *Current Biology*, *17*(17), 1527–31.
- Cattaneo, L., & Rizzolatti, G. (2009). The mirror neuron system. *Archives of Neurology*, *66*(5), 557–560. <https://doi.org/10.1001/archneurol.2009.41>
- Chaminade, T., Meary, D., Orliaguet, J. P., & Decety, J. (2001). Is perceptual anticipation a motor simulation? A PET study. *Neuroreport*, *12*(17), 3669–74.
- Chang, D. H., & Troje, N. F. (2009). Characterizing global and local mechanisms in biological motion perception. *Journal of Vision*, *9*(5), 8 1-10.
- Chary, C., Meary, D., Orliaguet, J. P., David, D., Moreaud, O., & Kandel, S. (2004). Influence of motor disorders on the visual perception of human movements in a case of peripheral dysgraphia. *Neurocase*, *10*(3), 223–32.
- Chen, W., & Yuan, T. F. (2008). Mirror neuron system as the joint from action to language. *Neuroscience Bulletin*, *24*(4), 259–64.
- Cheng, Y., Chou, K. H., Decety, J., Chen, I. Y., Hung, D., Tzeng, O. J., & Lin, C. P. (2009). Sex differences in the neuroanatomy of human mirror-neuron system: a voxel-based morphometric investigation. *Neuroscience*, *158*(2), 713–20.
- Cheng, Y., Lee, P. L., Yang, C. Y., Lin, C. P., Hung, D., & Decety, J. (2008). Gender differences in the mu rhythm of the human mirror-neuron system. *PLoS ONE*, *3*(5), e2113.

REFERENCES

- Cheng, Y., Tzeng, O. J., Decety, J., Imada, T., & Hsieh, J. C. (2006). Gender differences in the human mirror system: a magnetoencephalography study. *Neuroreport*, *17*(11), 1115–1119.
- Chouchourelou, A., Matsuka, T., Harber, K., & Shiffrar, M. (2006). The visual analysis of emotional actions. *Social Neuroscience*, *1*, 63–74.
- Clarke, T. J., Bradshaw, M. F., Field, D. T., Hampson, S. E., & Rose, D. (2005). The perception of emotion from body movement in point-light displays of interpersonal dialogue. *Perception*, *34*(10), 1171–80.
- Coello, Y., & Bartolo, A. (2014). Contribution of the motor system to language perception and comprehension: Evidence, controversy and new research avenues for the future. In *Language and action in cognitive neuroscience* (Y. Coello & A. Bartolo, pp. 321–354). Hove: Psychology Press.
- Coello, Y., & Bidet-Ildei, C. (2012). Motor representation and language in space, object, and movement perception. In Y. Coello & A. Bartolo (Eds.), *Language and action in cognitive neuroscience*. London: Psychology Press.
- Corballis, M. C. (2002). *From hand to mouth: The origins of language*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Craighero, L., Jacono, M., & Mele, S. (2016). Resonating with the ghost of a hand: A TMS experiment. *Neuropsychologia*, *84*, 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.02.014>
- Cutting, J. E., & Kozlowski, L. (1977). Recognizing friends by their walk : Gait perception without familiarity cues. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *9*, 353–356.
- Cutting, J. E., Moore, C., & Morrison, R. (1988). Masking the motions of human gait. *Perception & Psychophysics*, *44*(4), 339–47.
- Damasio, A. . (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason and the Human Brain*. New York: Putnam. Retrieved from https://bdgrdemocracy.files.wordpress.com/2014/04/descartes-error_antonio-damasio.pdf
- Daniele, A., Barbier, A., Di Giuda, D., Vita, M. G., Piccininni, C., Spinelli, P., ... Gainotti, G. (2013). Selective impairment of action-verb naming and comprehension in progressive supranuclear palsy. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *49*(4), 948–960. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.03.024>
- Davila, A., Schouten, B., & Verfaillie, K. (2014). Perceiving the direction of articulatory motion in point-light actions. *PloS One*, *9*(12), e115117. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115117>
- de'Sperati, C., & Viviani, P. (1997). The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements. *Journal of Neuroscience*, *17*(10), 3932–45.
- de Vega, M., Leon, I., Hernandez, J. A., Valdes, M., Padron, I., & Ferstl, E. C. (2014). Action Sentences Activate Sensory Motor Regions in the Brain Independent of Their Status of Reality. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*, 1363–1376. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00559
- 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 Language*, *112*, 77–84.
- Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., ... Fazio, F. (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), 2153–2157.

REFERENCES

- Descartes, R., & Khodoss, F. (2004). *Méditations métaphysiques*. Paris: PUF.
- Downing, P. E., Peelen, M. V., Wiggett, A. J., & Tew, B. D. (2006). The role of the extrastriate body area in action perception. *Social Neuroscience*, *1*(1), 52–62. <https://doi.org/10.1080/17470910600668854>
- Fahn, S., & Elton, R. L. (1987). Unified Parkinson's Disease Rating Scale. In S. Fahn, C. D. Marsden, M. Goldstein, & D. B. Calne (Eds.), *Recent developments in Parkinson's disease* (Vol. 2, pp. 153–163). Florham Park, NJ: Macmillan Healthcare Information.
- Fargier, R., Paulignan, Y., Boulenger, V., Monaghan, P., Reboul, A., & Nazir, T. A. (2012). Learning to associate novel words with motor actions: language-induced motor activity following short training. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *48*(7), 888–899. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.07.003>
- Fernandino, L., Conant, L. L., Binder, J. R., Blindauer, K., Hiner, B., Spangler, K., & Desai, R. H. (2013a). Parkinson's disease disrupts both automatic and controlled processing of action verbs. *Brain Language*, *127*(1), 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.07.008>
- Fernandino, L., Conant, L. L., Binder, J. R., Blindauer, K., Hiner, B., Spangler, K., & Desai, R. H. (2013b). Where is the action? Action sentence processing in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, *51*(8), 1510–1517. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.04.008>
- 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 (Colchester)*, *61*(6), 825–50.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol*, *47*(6), 381–91.
- Fodor, J. A. (1983). *The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology*. Cambridge, Mass: A Bradford Book / MIT Press.
- Fraiman, D., Saunier, G., Martins, E. F., & Vargas, C. D. (2014). Biological motion coding in the brain: analysis of visually driven EEG functional networks. *PloS One*, *9*(1), e84612. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084612>
- Freddi, S., Esteban, J., & Dru, V. (2015). Emotions and language about motion: Differentiating affective dominance with syntax from valence with semantics. *Consciousness and Cognition*, *38*, 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.09.010>
- Gazzola, V., & Keysers, C. (2009). The observation and execution of actions share motor and somatosensory voxels in all tested subjects: single-subject analyses of unsmoothed fMRI data. *Cerebral Cortex*, *19*(6), 1239–55.
- Giblin, G., Farrow, D., Reid, M., Ball, K., & Abernethy, B. (2016). Does perceptual or motor experience influence the perception of global and joint-specific kinematic changes in complex movement patterns? *Attention, Perception & Psychophysics*, *78*(6), 1781–1793. <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1167-7>
- Giese, M. A., & Poggio, T. (2003). Neural mechanisms for the recognition of biological movements. *Nature Review Neuroscience*, *4*(3), 179–92.
- Giese, M. A., Thornton, I., & Edelman, S. (2008). Metrics of the perception of body movement. *Journal of Vision*, *8*(9), 13 1-18.
- Goldfield, B. A. (2000). Nouns before verbs in comprehension vs. production: the view from pragmatics. *Journal of Child Language*, *27*(3), 501–520.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*(1), 20–25.
- Graf, M., Reitzner, B., Corves, C., Casile, A., Giese, M., & Prinz, W. (2007). Predicting point-light actions in real-time. *Neuroimage*, *36 Suppl 2*, T22-32.

REFERENCES

- Grézès, J., & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis. *Human Brain Mapping, 12*(1), 1–19.
- Grézès, J., Fonlupt, P., Bertenthal, B., Delon-Martin, C., Segebarth, C., & Decety, J. (2001). Does perception of biological motion rely on specific brain regions? *Neuroimage, 13*(5), 775–85.
- Grézès, J., Fonlupt, P., & Decety, J. (2000). Equivalence fonctionnelle: mythe cognitif ou réalité neurologique? *Psychologie Française, 45*(4), 319–332.
- Grossman, E., Battelli, L., & Pascual-Leone, A. (2005). Repetitive TMS over posterior STS disrupts perception of biological motion. *Vision Research, 45*(22), 2847–53.
- Grossman, E., & Blake, R. (2002). Brain Areas Active during Visual Perception of Biological Motion. *Neuron, 35*(6), 1167–75.
- Grossman, E., Donnelly, M., Price, R., Pickens, D., Morgan, V., Neighbor, G., & Blake, R. (2000). Brain areas involved in perception of biological motion. *Journal of Cognitive Neuroscience, 12*(5), 711–720.
- Grossman, E., Jardine, N. L., & Pyles, J. A. (2010). fMR-Adaptation Reveals Invariant Coding of Biological Motion on the Human STS. *Frontiers in Human Neuroscience, 4*, 15. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.015.2010>
- Grossman, M., Anderson, C., Khan, A., Avants, B., Elman, L., & McCluskey, L. (2008). Impaired action knowledge in amyotrophic lateral sclerosis. *Neurology, 71*(18), 1396–1401. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000319701.50168.8c>
- Hainselin, M., Quinette, P., Juskenaite, A., Desgranges, B., Martinaud, O., de La Sayette, V., ... Eustache, F. (2014). Just do it! How performing an action enhances remembering in transient global amnesia. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior, 50*, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.10.007>
- Hamker, F. H. (2003). The reentry hypothesis: linking eye movements to visual perception. *Journal of Vision, 3*(11), 808–16.
- Hauk, O., Coutout, C., Holden, A., & Chen, Y. (2012). The time-course of single-word reading: evidence from fast behavioral and brain responses. *NeuroImage, 60*(2), 1462–1477. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.01.061>
- Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermuller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron, 41*(2), 301–7.
- Hauk, O., & Pulvermuller, F. (2004). Neurophysiological distinction of action words in the fronto-central cortex. *Human Brain Mapping, 21*(3), 191–201.
- Hauk, O., Shtyrov, Y., & Pulvermuller, 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.
- Hauk, O., & Tschentscher, N. (2013). The Body of Evidence: What Can Neuroscience Tell Us about Embodied Semantics? *Frontiers in Psychology, 4*, 50. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00050>
- Havas, V., Gabarrós, A., Juncadella, M., Rifa-Ros, X., Plans, G., Acebes, J. J., ... Rodríguez-Fornells, A. (2015). Electrical stimulation mapping of nouns and verbs in Broca's area. *Brain and Language, 145–146*, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.04.005>
- Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory*. New York: Wiley.
- Herman, L. M., Morrel-Samuels, P., & Pack, A. A. (1990). Bottlenosed dolphin and human recognition of veridical and degraded video displays of an artificial gestural language. *Journal of Experimental Psychology: General, 119*(2), 215–30.

REFERENCES

- Hill, E. L. (2001). Non-specific nature of specific language impairment: a review of the literature with regard to concomitant motor impairments. *International Journal of Language and Communication Disorders*, 36(2), 149–71.
- Hirai, M., Senju, A., Fukushima, H., & Hiraki, K. (2005). Active processing of biological motion perception: an ERP study. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 23(2–3), 387–96.
- Hiris, E. (2007). Detection of biological and nonbiological motion. *Journal of Vision*, 7(12), 41–16.
- Hommel, B., Musseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behavioral Brain Sciences*, 24(5), 849–78–937.
- Hostetter, A. B., & Alibali, M. W. (2008). Visible embodiment: gestures as simulated action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15(3), 495–514.
- Iacoboni, M., & Dapretto, M. (2006). The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(12), 942–51.
- Iacoboni, M., & Mazziotta, J. C. (2007). Mirror neuron system: basic findings and clinical applications. *Annals of Neurology*, 62(3), 213–8.
- Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (2005). Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS Biology*, 3(3), e79.
- Ibanez, A., Cardona, J. F., Dos Santos, Y. V., Blenkmann, A., Aravena, P., Roca, M., ... Bekinschtein, T. (2013). Motor-language coupling: direct evidence from early Parkinson's disease and intracranial cortical recordings. *Cortex*, 49(4), 968–84. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.02.014>
- Jahshan, C., Wynn, J. K., Mathis, K. I., & Green, M. F. (2015). The neurophysiology of biological motion perception in schizophrenia. *Brain and Behavior*, 5(1), 75–84. <https://doi.org/10.1002/brb3.303>
- James, K. H., & Maouene, J. (2009). Auditory verb perception recruits motor systems in the developing brain: an fMRI investigation. *Developmental Science*, 12(6), F26–34. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00919.x>
- James, K. H., & Swain, S. N. (2011). Only self-generated actions create sensori-motor systems in the developing brain. *Developmental Science*, 14(4), 673–8. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01011.x>
- Jastorff, J., & Orban, G. A. (2009). Human functional magnetic resonance imaging reveals separation and integration of shape and motion cues in biological motion processing. *Journal of Neuroscience*, 29(22), 7315–29.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, 14(1 Pt 2), S103–9.
- Jellema, T., & Perrett, D. I. (2003). Cells in monkey STS responsive to articulated body motions and consequent static posture: a case of implied motion? *Neuropsychologia*, 41(13), 1728–37.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2010.06.020>
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, 14, 201–211.
- Johnson, M. H. (2006). Biological motion: a perceptual life detector? *Current Biology*, 16(10), R376–7.

REFERENCES

- Jokisch, D., Daum, I., Suchan, B., & Troje, N. F. (2005). Structural encoding and recognition of biological motion: evidence from event-related potentials and source analysis. *Behavioral Brain Research, 157*(2), 195–204.
- Kandel, S., Orliaguet, J. P., & Viviani, P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting: the role of implicit motor competence. *Perception & Psychophysics, 62*(4), 706–16.
- Kaschak, M. P., Madden, C. J., Therriault, D. J., Yaxley, R. H., Aveyard, M., Blanchard, A. A., & Zwaan, R. A. (2005). Perception of motion affects language processing. *Cognition, 94*(3), B79-89.
- Keysers, C., & Fadiga, L. (2008). The mirror neuron system: new frontiers. *Social Neuroscience, 3*(3–4), 193–8.
- Khader, P. H., Jost, K., Mertens, M., Bien, S., & Rosler, F. (2010). Neural correlates of generating visual nouns and motor verbs in a minimal phrase context. *Brain Research, 1318*, 122–32.
- Kiefer, M., Sim, E. J., Liebich, S., Hauk, O., & Tanaka, J. (2007). Experience-dependent plasticity of conceptual representations in human sensory-motor areas. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*(3), 525–42. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.3.525>
- Klepp, A., Niccolai, V., Buccino, G., Schnitzler, A., & Biermann-Ruben, K. (2015). Language-motor interference reflected in MEG beta oscillations. *NeuroImage, 109*, 438–448. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.12.077>
- Klepp, A., Weessler, H., Niccolai, V., Terhalle, A., Geisler, H., Schnitzler, A., & Biermann-Ruben, K. (2014). Neuromagnetic hand and foot motor sources recruited during action verb processing. *Brain and Language, 128*(1), 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.12.001>
- Knoblich, G., & Prinz, W. (2005). Linking perception and action: An ideomotor approach. In M. J. H.-J. Freund M.Hallett, & R. C.Leiguarda (Hrsg. . (Ed.), *Higher-order motor disorders* (Vol. S. 79-104). Oxford,: UK: Oxford University Press.
- Kozlowski, L., & Cutting, J. E. (1977). Recognizing the sex of a walker from dynamic point-light displays. *Perception & Psychophysics, 21*, 575–580.
- Krüger, S., Sokolov, A. N., Enck, P., Krägeloh-Mann, I., & Pavlova, M. A. (2013). Emotion through locomotion: gender impact. *PloS One, 8*(11), e81716. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081716>
- Kuipers, J.-R., van Koningsbruggen, M., & Thierry, G. (2013). Semantic priming in the motor cortex: evidence from combined repetitive transcranial magnetic stimulation and event-related potential. *Neuroreport, 24*(12), 646–651. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3283631467>
- La Scaleia, B., Zago, M., Moscatelli, A., Lacquaniti, F., & Viviani, P. (2014). Implied dynamics biases the visual perception of velocity. *PloS One, 9*(3), e93020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093020>
- Lange, J., & Lappe, M. (2006). A model of biological motion perception from configural form cues. *Journal of Neuroscience, 26*(11), 2894–906.
- Lange, J., Pavlidou, A., & Schnitzler, A. (2015). Lateralized modulation of beta-band power in sensorimotor areas during action observation. *Frontiers in Integrative Neuroscience, 9*, 43. <https://doi.org/10.3389/fnint.2015.00043>
- Lepage, J. F., & Theoret, H. (2007). The mirror neuron system: grasping others' actions from birth? *Dev Sci, 10*(5), 513–23.
- Liepelt, R., Dolk, T., & Prinz, W. (2012). Bidirectional semantic interference between action and speech. *Psychological Research, 76*(4), 446–55. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0390-z>

REFERENCES

- Lingnau, A., & Petris, S. (2013). Action understanding within and outside the motor system: the role of task difficulty. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *23*(6), 1342–1350. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs112>
- Loula, F., Prasad, S., Harber, K., & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, *31*(1), 210–20.
- Lu, H. (2010). Structural processing in biological motion perception. *Journal of Vision*, *10*(12), 13. <https://doi.org/10.1167/10.12.13>
- Lubrano, V., Filleron, T., Démonet, J.-F., & Roux, F.-E. (2014). Anatomical correlates for category-specific naming of objects and actions: a brain stimulation mapping study. *Human Brain Mapping*, *35*(2), 429–443. <https://doi.org/10.1002/hbm.22189>
- Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (2005). *Detection Theory: A User's Guide (2nd edition)*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.004>
- Marangolo, P., Bonifazi, S., Tomaiuolo, F., Craighero, L., Coccia, M., Altoe, G., ... Cantagallo, A. (2010). Improving language without words: first evidence from aphasia. *Neuropsychologia*, *48*(13), 3824–33. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.025>
- Marangolo, P., & Caltagirone, C. (2014). Options to enhance recovery from aphasia by means of non-invasive brain stimulation and action observation therapy. *Expert Review of Neurotherapeutics*, *14*(1), 75–91. <https://doi.org/10.1586/14737175.2014.864555>
- Marangolo, P., Cipollari, S., Fiori, V., Razzano, C., & Caltagirone, C. (2012). Walking but not barking improves verb recovery: implications for action observation treatment in aphasia rehabilitation. *PLoS One*, *7*(6), e38610. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038610>
- Martel, L., Bidet-Ildei, C., & Coello, Y. (2011). Anticipating the terminal position of an observed action: Effect of kinematic, structural, and identity information. *Visual Cognition*, *19*(6), 785–98.
- Martin, A., Wiggs, C. L., Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1996). Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature*, *379*(6566), 649–652. <https://doi.org/10.1038/379649a0>
- Masselink, J., & Lappe, M. (2015). Translation and articulation in biological motion perception. *Journal of Vision*, *15*(11), 10. <https://doi.org/10.1167/15.11.10>
- Méary, D., Chary, C., Palluel-Germain, R., & Orliaguet, J. P. (2005). Visual perception of writing and pointing movements. *Perception*, *34*(9), 1061–7.
- Meary, D., Kitromilides, E., Mazens, K., Graff, C., & Gentaz, E. (2007). Four-day-old human neonates look longer at non-biological motions of a single point-of-light. *PloS ONE*, *2*(1), e186. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000186>
- Meister, I. G., Boroojerdi, B., Foltys, H., Sparing, R., Huber, W., & Töpper, R. (2003). Motor cortex hand area and speech: implications for the development of language. *Neuropsychologia*, *41*(4), 401–406.
- Meister, I. G., & Iacoboni, M. (2007). No language-specific activation during linguistic processing of observed actions. *PLoS ONE*, *2*(9), e891.
- Meteyard, L., Cuadrado, S. R., Bahrami, B., & Vigliocco, G. (2012). Coming of age: a review of embodiment and the neuroscience of semantics. *Cortex*, *48*(7), 788–804. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.11.002>

REFERENCES

- Meugnot, A., Almecija, Y., & Toussaint, L. (2014). The embodied nature of motor imagery processes highlighted by short-term limb immobilization. *Exp Psychol*, *61*(3), 180–6. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000237>
- Michels, L., Kleiser, R., de Lussanet, M. H. E., Seitz, R. J., & Lappe, M. (2009). Brain activity for peripheral biological motion in the posterior superior temporal gyrus and the fusiform gyrus: Dependence on visual hemifield and view orientation. *NeuroImage*, *45*(1), 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.10.063>
- Mollo, G., Pulvermüller, F., & Hauk, O. (2015). Movement priming of EEG/MEG brain responses for action-words characterizes the link between language and action. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *74*, 262–276. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.021>
- Moody, C. L., & Gennari, S. P. (2010). Effects of implied physical effort in sensory-motor and pre-frontal cortex during language comprehension. *Neuroimage*, *49*(1), 782–93. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.07.065>
- Moody-Triantis, C., Humphreys, G. F., & Gennari, S. P. (2014). Hand specific representations in language comprehension. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 360. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00360>
- Moran, A., Bramham, J., Collet, C., Guillot, A., & MacIntyre, T. E. (2015). Motor imagery in clinical disorders: importance and implications. *Frontiers in Psychiatry*, *6*, 23. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2015.00023>
- Moreno, I., de Vega, M., & Leon, I. (2013). Understanding action language modulates oscillatory mu and beta rhythms in the same way as observing actions. *Brain Cognition*, *82*(3), 236–42. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.04.010>
- Moreno, I., de Vega, M., Leon, I., Bastiaansen, M., Glen Lewis, A., & Magyari, L. (2015). Brain dynamics in the comprehension of action-related language. A time-frequency analysis of mu rhythms. *Neuroimage*, *109*, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.01.018>
- Moseley, R. L., Mohr, B., Lombardo, M. V., Baron-Cohen, S., Hauk, O., & Pulvermüller, F. (2013). Brain and behavioural correlates of action semantic deficits in autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00725>
- Moseley, R. L., Pulvermüller, F., & Shtyrov, Y. (2013). Sensorimotor semantics on the spot: brain activity dissociates between conceptual categories within 150 ms. *Scientific Reports*, *3*, 1928. <https://doi.org/10.1038/srep01928>
- Omori, E., Watanabe, S. (1996). Discrimination of johansson's stimuli in pigeons. *International Journal of Comparative Psychology*, *9*, 92.
- Oram, M. W., & Perrett, D. I. (1994). Responses of Anterior Superior Temporal Polysensory (STPa) Neurons to “Biological Motion” Stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *6*(2), 99–116. <https://doi.org/10.1162/jocn.1994.6.2.99>
- O'Regan, J. K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 939–1031.
- Papeo, L., Pascual-Leone, A., & Caramazza, A. (2013). Disrupting the brain to validate hypotheses on the neurobiology of language. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 148. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00148>
- 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004508>
- Parron, C., Deruelle, C., & Fagot, J. (2007). Processing of biological motion point-light displays by baboons (*Papio papio*). *Journal of Experimental Psychology. Animal Behavior Processes*, *33*(4), 381–391. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.33.4.381>

REFERENCES

- Pavlidou, A., Schnitzler, A., & Lange, J. (2014a). Distinct spatio-temporal profiles of beta-oscillations within visual and sensorimotor areas during action recognition as revealed by MEG. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *54*, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.02.007>
- Pavlidou, A., Schnitzler, A., & Lange, J. (2014b). Interactions between visual and motor areas during the recognition of plausible actions as revealed by magnetoencephalography. *Human Brain Mapping*, *35*(2), 581–592. <https://doi.org/10.1002/hbm.22207>
- Pavlova, M. (2012). Biological motion processing as a hallmark of social cognition. *Cerebral Cortex*, *22*(5), 981–95. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr156>
- Pavlova, M., Bidet-Ildei, C., Sokolov, A. N., Braun, C., & Krageloh-Mann, I. (2009). Neuromagnetic response to body motion and brain connectivity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(5), 837–46.
- Pavlova, M., Birbaumer, N., & Sokolov, A. (2006). Attentional modulation of cortical neuromagnetic gamma response to biological movement. *Cerebral Cortex*, *16*(3), 321–7.
- Pavlova, M., Lutzenberger, W., Sokolov, A., & Birbaumer, N. (2004). Dissociable cortical processing of recognizable and non-recognizable biological movement: analysing gamma MEG activity. *Cerebral Cortex*, *14*(2), 181–8.
- Pavlova, M., & Sokolov, A. (2000). Orientation specificity in biological motion perception. *Perception and Psychophysics*, *62*(5), 889–99.
- Pavlova, M., Sokolov, A. N., & Bidet-Ildei, C. (2015). Sex Differences in the Neuromagnetic Cortical Response to Biological Motion. *Cerebral Cortex*, pp. 3468–3474.
- Pavlova, M., Staudt, M., Sokolov, A., Birbaumer, N., & Krageloh-Mann, I. (2003). Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions. *Brain*, *126*(Pt 3), 692–701.
- Peelen, M. V., Wiggett, A. J., & Downing, P. E. (2006). Patterns of fMRI activity dissociate overlapping functional brain areas that respond to biological motion. *Neuron*, *49*(6), 815–822. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.02.004>
- Pelphrey, K. A., Morris, J. P., Michelich, C. R., Allison, T., & McCarthy, G. (2005). Functional anatomy of biological motion perception in posterior temporal cortex: an fMRI study of eye, mouth and hand movements. *Cerebral Cortex*, *15*(12), 1866–76.
- Peran, P., Demonet, J. F., Pernet, C., & Cardebat, D. (2004). Verb and noun generation tasks in Huntington's disease. *Movement Disorder*, *19*(5), 565–71.
- Peuskens, H., Vanrie, J., Verfaillie, K., & Orban, G. A. (2005). Specificity of regions processing biological motion. *European Journal of Neuroscience*, *21*(10), 2864–75.
- Platon, S. (383AD). Phédon de Platon (texte français uniquement). Retrieved September 14, 2016, from <http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/platon/phedonfr.htm>
- Postle, N., Ashton, R., McFarland, K., & de Zubicaray, G. I. (2013). No specific role for the manual motor system in processing the meanings of words related to the hand. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00011>
- Postle, N., McMahan, 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.
- Pozzo, T., Papaxanthis, C., Petit, J. L., Schweighofer, N., & Stucchi, N. (2006). Kinematic features of movement tunes perception and action coupling. *Behavioral Brain Research*, *169*(1), 75–82.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, *9*(2), 129–154.

REFERENCES

- Puce, A., & Perrett, D. (2003). Electrophysiology and brain imaging of biological motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 358(1431), 435–45.
- Pulvermüller, F. (1996). Hebb's concept of cell assemblies and the psychophysiology of word processing. *Psychophysiology*, 33(4), 317–333.
- Pulvermüller, F. (1999). Words in the brain's language. *The Behavioral and Brain Sciences*, 22(2), 253-279-336.
- Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Review Neuroscience*, 6(7), 576–82.
- Pulvermüller, F. (2013a). How neurons make meaning: brain mechanisms for embodied and abstract-symbolic semantics. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(9), 458–70. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.06.004>
- Pulvermüller, F. (2013b). Semantic embodiment, disembodiment or misembodiment? In search of meaning in modules and neuron circuits. *Brain and Language*, 127(1), 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.05.015>
- 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), 793–797. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.03900.x>
- Pulvermüller, F., Lutzenberger, W., & Preissl, H. (1999). Nouns and verbs in the intact brain: evidence from event-related potentials and high-frequency cortical responses. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 9(5), 497–506.
- Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., & Hauk, O. (2009). Understanding in an instant: neurophysiological evidence for mechanistic language circuits in the brain. *Brain and Language*, 110(2), 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2008.12.001>
- Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., & Ilmoniemi, R. (2005). Brain signatures of meaning access in action word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(6), 884–892. <https://doi.org/10.1162/0898929054021111>
- Repetto, C., Colombo, B., Cipresso, P., & Riva, G. (2013). The effects of rTMS over the primary motor cortex: the link between action and language. *Neuropsychologia*, 51(1), 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.001>
- Reynolds, J. E., Thornton, A. L., Elliott, C., Williams, J., Lay, B. S., & Licari, M. K. (2015). A systematic review of mirror neuron system function in developmental coordination disorder: Imitation, motor imagery, and neuroimaging evidence. *Research in Developmental Disabilities*, 47, 234–283. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.09.015>
- Rizzolatti, G. (2005). The mirror neuron system and its function in humans. *Anatomy and Embryology (Berl)*, 210(5–6), 419–21.
- Rizzolatti, G., & Arbib, M. A. (1998). Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*, 21(5), 188–94.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169–92.
- Rizzolatti, G., & Fabbri-Destro, M. (2008). The mirror system and its role in social cognition. *Current Opinion in Neurobiology*, 18(2), 179–84.
- Rizzolatti, G., & Sinigaglia, C. (2010). The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. *Nature Reviews. Neuroscience*, 11(4), 264–274. <https://doi.org/10.1038/nrn2805>
- Runeson, S. (1974). Constant velocity--not perceived as such. *Psychological Research*, 37(1), 3–23.
- Runeson, S., & Frykholm, G. (1981). Visual perception of lifted weight. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 7(4), 733–40.

REFERENCES

- Sale, P., & Franceschini, M. (2012). Action observation and mirror neuron network: a tool for motor stroke rehabilitation. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 48(2), 313–8.
- Saunier, G., Martins, E. F., Dias, E. C., de Oliveira, J. M., Pozzo, T., & Vargas, C. D. (2013). Electrophysiological correlates of biological motion permanence in humans. *Behavioural Brain Research*, 236(1), 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.08.038>
- Saygin, A. P. (2007). Superior temporal and premotor brain areas necessary for biological motion perception. *Brain*, 130(Pt 9), 2452–61.
- Saygin, A. P., Wilson, S. M., Hagler, D. J., Jr., Bates, E., & Sereno, M. I. (2004). Point-light biological motion perception activates human premotor cortex. *Journal of Neuroscience*, 24(27), 6181–8.
- Schluessel, V., Kortekamp, N., Cortes, J. A. O., Klein, A., & Bleckmann, H. (2015). Perception and discrimination of movement and biological motion patterns in fish. *Animal Cognition*, 18(5), 1077–1091. <https://doi.org/10.1007/s10071-015-0876-y>
- Schubotz, R. I. (2007). Prediction of external events with our motor system: towards a new framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(5), 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.02.006>
- Schütz-Bosbach, S., & Prinz, W. (2007). Perceptual resonance: action-induced modulation of perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(8), 349–55.
- Servos, P., Osu, R., Santi, A., & Kawato, M. (2002). The neural substrates of biological motion perception: an fMRI study. *Cerebral Cortex*, 12(7), 772–82.
- Seyal, M., Mull, B., Bhullar, N., Ahmad, T., & Gage, B. (1999). Anticipation and execution of a simple reading task enhance corticospinal excitability. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 110(3), 424–429.
- Shiffrar, M., & Freyd, J. J. (1990). Apparent motion of the human body. *Psychological Science*, 1, 257–264.
- Simion, F., Regolin, L., & Bulf, H. (2008). A predisposition for biological motion in the newborn baby. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(2), 809–13.
- Sokolov, A. A., Erb, M., Gharabaghi, A., Grodd, W., Tatagiba, M. S., & Pavlova, M. A. (2012). Biological motion processing: the left cerebellum communicates with the right superior temporal sulcus. *NeuroImage*, 59(3), 2824–2830. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.039>
- Sokolov, A. A., Erb, M., Grodd, W., & Pavlova, M. A. (2014). Structural loop between the cerebellum and the superior temporal sulcus: evidence from diffusion tensor imaging. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 24(3), 626–632. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs346>
- Sokolov, A. A., Gharabaghi, A., Tatagiba, M. S., & Pavlova, M. (2010). Cerebellar engagement in an action observation network. *Cerebral Cortex*, 20(2), 486–91.
- Sokolov, A. A., Krüger, S., Enck, P., Krägeloh-Mann, I., & Pavlova, M. A. (2011). Gender affects body language reading. *Frontiers in Psychology*, 2, 16. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00016>
- Springer, A., Huttenlocher, A., & Prinz, W. (2012). Language-induced modulation during the prediction of others' actions. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-012-0411-6>
- Springer, A., & Prinz, W. (2010). Action semantics modulate action prediction. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (Colchester)*, 1–18.

REFERENCES

- Stadler, W., Springer, A., Parkinson, J., & Prinz, W. (2012). Movement kinematics affect action prediction: comparing human to non-human point-light actions. *Psychological Research*, 76(4), 395–406. <https://doi.org/10.1007/s00426-012-0431-2>
- Taylor, L. J., & Zwaan, R. A. (2008). Motor resonance and linguistic focus. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(6), 896–904.
- Taylor, L. J., & Zwaan, R. A. (2010). Grasping spheres, not planets. *Cognition*, 115(1), 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.11.006>
- Tettamanti, M., Buccino, G., Saccuman, M. C., Gallese, V., Danna, M., Scifo, P., ... Perani, D. (2005). Listening to action-related sentences activates fronto-parietal motor circuits. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(2), 273–81.
- Theusner, S., de Lussanet, M., & Lappe, M. (2014). Action recognition by motion detection in posture space. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 34(3), 909–921. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2900-13.2014>
- Thurman, S. M., Giese, M. A., & Grossman, E. (2010). Perceptual and computational analysis of critical features for biological motion. *Journal of Vision*, 10(12), 15. <https://doi.org/10.1167/10.12.15>
- Thurman, S. M., & Grossman, E. (2008). Temporal “Bubbles” reveal key features for point-light biological motion perception. *Journal of Vision*, 8(3), 28 1-11.
- Tokimura, H., Tokimura, Y., Oliviero, A., Asakura, T., & Rothwell, J. C. (1996). Speech-induced changes in corticospinal excitability. *Annals of Neurology*, 40(4), 628–634. <https://doi.org/10.1002/ana.410400413>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.01.015>
- Toni, I., de Lange, F. P., Noordzij, M. L., & Hagoort, P. (2008). Language beyond action. *Journal of Physiology Paris*, 102(1–3), 71–9.
- Troyer, M., Curley, L. B., Miller, L. E., Saygin, A. P., & Bergen, B. K. (2014). Action verbs are processed differently in metaphorical and literal sentences depending on the semantic match of visual primes. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 982. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00982>
- Ulloa, E. R., & Pineda, J. A. (2007). Recognition of point-light biological motion: mu rhythms and mirror neuron activity. *Behavioral Brain Research*, 183(2), 188–94.
- Urgesi, C., Candidi, M., & Avenanti, A. (2014). Neuroanatomical substrates of action perception and understanding: an anatomic likelihood estimation meta-analysis of lesion-symptom mapping studies in brain injured patients. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00344>
- Vaina, L. M., Solomon, J., Chowdhury, S., Sinha, P., & Belliveau, J. W. (2001). Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(20), 11656–61.
- Vallortigara, G., Regolin, L., & Marconato, F. (2005). Visually inexperienced chicks exhibit spontaneous preference for biological motion patterns. *PLoS Biology*, 3(7), e208.
- van Kemenade, B. M., Muggleton, N., Walsh, V., & Saygin, A. P. (2012). Effects of TMS over premotor and superior temporal cortices on biological motion perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(4), 896–904. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00194
- Van Overwalle, F., & Baetens, K. (2009). Understanding others’ actions and goals by mirror and mentalizing systems: a meta-analysis. *Neuroimage*, 48(3), 564–84. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.06.009>

REFERENCES

- Vannuscorps, G., & Caramazza, A. (2016). Typical action perception and interpretation without motor simulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(1), 86–91. <https://doi.org/10.1073/pnas.1516978112>
- Varela, F., Thompson, E., Rosch, E., & Havelange, V. (1999). *L'inscription corporelle de l'esprit : Sciences cognitives et expérience humaine*. Paris: Seuil.
- Virji-Babul, N., Cheung, T., Weeks, D., Herdman, A. T., & Cheyne, D. (2007). Magnetoencephalographic analysis of cortical activity in adults with and without Down syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 51(Pt 12), 982–987. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2007.00999.x>
- Virji-Babul, N., Moiseev, A., Cheung, T., Weeks, D., Cheyne, D., & Ribary, U. (2008). Changes in mu rhythm during action observation and execution in adults with Down syndrome: implications for action representation. *Neuroscience Letters*, 436(2), 177–80.
- Viviani, P. (2002). Motor competence in the perception of dynamic events. In *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (NY: Oxford University Press, pp. 406–442). W. Prinz. & B. Hommel (eds.).
- Viviani, P., Baud-Bovy, G., & Redolfi, M. (1997). Perceiving and tracking kinesthetic stimuli: further evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 23(4), 1232–52.
- Viviani, P., & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 21(1), 32–53.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1989). The effect of movement velocity on form perception: geometric illusions in dynamic displays. *Perception & Psychophysics*, 46(3), 266–74.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1992). Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 603–23.
- Weast, J. A., Walton, A., Chandler, B. C., Shockley, K., & Riley, M. A. (2014). Essential kinematic information, athletic experience, and affordance perception for others. *Psychonomic Bulletin & Review*, 21(3), 823–829. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0539-4>
- Willems, R. M., & Casasanto, D. (2011). Flexibility in embodied language understanding. *Frontiers in Psychology*, 2, 116. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00116>
- Willems, R. M., & Hagoort, P. (2007). Neural evidence for the interplay between language, gesture, and action: a review. *Brain Language*, 101(3), 278–89.
- Willems, R. M., Labruna, L., D'Esposito, M., Ivry, R., & Casasanto, D. (2011). A functional role for the motor system in language understanding: evidence from theta-burst transcranial magnetic stimulation. *Psychological Science*, 22(7), 849–854. <https://doi.org/10.1177/0956797611412387>
- 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. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21386>
- Wilson, A. D., & Golonka, S. (2013). Embodied Cognition is Not What you Think it is. *Frontiers in Psychology*, 4, 58. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00058>
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–36.
- Wilson, M., & Knoblich, G. (2005). The case for motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychological Bulletin*, 131(3), 460–73.

REFERENCES

- Wolff, C. (1728). *Discursus praeliminaris de philosophia in genere*. Retrieved from http://data.bnf.fr/13748037/christian_wolff_discursus_praeliminaris_de_philosophia_in_genere/
- Wolff, C., Feuerhahn, W., Goubet, J.-F., Rohrbasser, J.-M., & Arnaud, T. (2006). *Discours préliminaire sur la philosophie en général*. Paris: Librairie Philosophique Vrin.
- Yang, J. (2014). Influences of motor contexts on the semantic processing of action-related language. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 14*(3), 912–922. <https://doi.org/10.3758/s13415-014-0258-y>
- York, C., Olm, C., Boller, A., McCluskey, L., Elman, L., Haley, J., ... Grossman, M. (2014). Action verb comprehension in amyotrophic lateral sclerosis and Parkinson's disease. *Journal of Neurology, 261*(6), 1073–1079. <https://doi.org/10.1007/s00415-014-7314-y>
- Zarr, N., Ferguson, R., & Glenberg, A. M. (2013). Language comprehension warps the mirror neuron system. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 870. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00870>
- Zwaan, R. A. (2014). Embodiment and language comprehension: reframing the discussion. *Trends in Cognitive Sciences, 18*(5), 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.02.008>
- 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., Taylor, L. J., & de Boer, M. (2010). Motor resonance as a function of narrative time: further tests of the linguistic focus hypothesis. *Brain and Language, 112*(3), 143–9. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2008.11.004>

Table des Illustrations

- Figure 1 : Illustration de la technique du « point-light display ». La partie A montre deux images statiques représentant un acteur en train de réaliser un mouvement de marche (en haut) et un mouvement de course (en bas). Les ronds représentent les diodes lumineuses placées sur les différentes articulations de l'acteur (tête, épaules, coudes, poignets, hanches, genoux, chevilles). La partie B représente les mêmes mouvements mais en faisant apparaître uniquement les diodes lumineuses. Adapté de « Visual perception of biological motion and a model for its analysis » de Johansson, 1973, *Perception & Psychophysics*, p 202. Copyright 1973 par The Psychonomic Society..... 19
- Figure 2 : En haut : Exemples des stimuli utilisés pour la tâche de discrimination des mouvements de course. Les points rouges représentent le mouvement de course alors que les points blancs représentent le masque. Les flèches rouges indiquent la direction de la course. Les panels A et B représentent le mouvement de course avec un masque constitué de 11 points alors que les panels C et D représentent le mouvement de course avec un masque constitué de 220 points. Pendant la tâche, les flèches n'étaient pas présentes, tous les points étaient blancs et les stimuli étaient présentés de manière dynamique durant 600 ms. En bas : Nombre moyen de jugements corrects en fonction du nombre de points constituant le masque. Adapté de « Observing or producing a motor action improves later perception of biological motion: Evidence for a gender effect » de Bidet-Ildei, Chauvin & Coello, 2010, *Acta Psychologica*, p 217-218. Copyright 2010 par Elsevier. 20
- Figure 3 : En haut : Représentation schématique de la procédure expérimentale. Les sujets voyaient sur un écran une séquence animée représentant un mouvement de pointage associé à différentes cinématiques (voir en haut à droite). Le mouvement s'arrêtait à 60% de la trajectoire et la tâche des sujets était de déterminer la position finale de la cible. En bas : Moyenne et erreur standard de l'erreur spatiale (en mm) entre la position donnée par le sujet et la position réelle de la cible en fonction de la cinématique du mouvement. Adaptée de « Anticipating the terminal position of an observed action: Effect of kinematic, structural, and identity information » de Martel, Bidet-Ildei & Coello, 2011, *Visual Cognition*, p 788. Copyright 2011 par Psychology Press. 22
- Figure 4: Schéma représentant les différentes structures cérébrales impliquées lors de la perception visuelle des mouvements biologiques. PMC représente le cortex pré-moteur, IFG le gyrus frontal inférieur, IPL le lobule pariétal inférieur et STS le sillon temporal supérieur. Dans la figure, l'amygdale est indiquée en pointillés car elle n'est pas visible sur la face externe du cerveau. Cette illustration s'inspire de l'article de Iacobini & Dapretto 2006. L'image du cerveau a été modifiée à partir d'une image récupérée sur le site internet suivant : <http://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Enc%C3%A9phale/1001411>. Dessin Michel Saemann - Archives Larousse. 24
- Figure 5 : A gauche : Procédure utilisée dans la tâche. Les sujets voyaient une séquence animée représentant un ensemble de points et devaient déterminer si oui ou non il y avait un marcheur inclu dans la séquence. Lors de la tâche, le marcheur était également représenté sous la forme d'une séquence animée de points. A droite) résultats obtenus dans la tâche de détection chez les sujets présentant une lésion périvertriculaire et chez les sujets contrôle. Adapté de « Neuromagnetic response to body motions and brain connectivity » de Pavlova, Bidet-Ildei, Sokolov, Braun & Krageloh-Mann, 2009, *Journal of Cognitive Neuroscience*, p 838-840. Copyright 2009 par MIT Press Journals. 26
- Figure 6 : Amplitude de la moyenne quadratique observée dans le cortex frontal droit (à gauche) et le cortex temporal droit (à droite) pour les sujets contrôle et les sujets atteints de lésions périvertriculaires. Les graphiques A et B représentent la réponse corticale observée au cours du temps en femo-tesla lorsque le stimulus était présent (A) ou absent (B). Les rectangles indiquent les fenêtres temporelles d'intérêt. Les graphiques du bas montrent les différences significatives en termes d'amplitude entre 276 et 340 ms dans le lobe frontal et entre 180 et 244 ms dans le lobe temporal. Adapté de « Neuromagnetic response to body motions and brain connectivity » de Pavlova, Bidet-Ildei, Sokolov, Braun & Krageloh-Mann, 2009, *Journal of Cognitive Neuroscience*, p 838-840. Copyright 2009 par MIT Press Journals..... 27
- Figure 7 : Modèle hiérarchique de Giese & Poggio (2003). Les cercles rouges indiquent approximativement la taille des champs récepteurs. Les différentes abréviations correspondent à des structures cérébrales que l'on retrouve chez l'homme et/ou chez le singe. V1 : cortex visuel primaire, V2 : Cortex visuel secondaire, V4/MT: aires visuelle de haut niveau, STS : sillon temporal supérieur, IT : Cortex temporal inférieur, KO : Région occipitale du mouvement, F5 : cortex pré-moteur chez le singe, FA : Aire de reconnaissance des visages, OF : Flux optique, RF : champ récepteur. Extrait de « Neural mechanisms for the recognition of

- biological movements » de Giese & Poggio, 2003, *Nature Review Neuroscience*, p 181. Copyright 2003 par Nature Publishing Group. 29
- Figure 8 : schéma représentant l'intervention d'une résonance motrice lorsque le sujet observe une action (partie gauche de la figure) et d'une résonance perceptive lorsque le sujet produit une action (partie droite de la figure). Reproduit de "Perceptual resonance: action-induced modulation of perception." de Schütz-Bosbach et Prinz, 2007, *Trends in Cognitive Sciences*, p. 350. Copyright 2007 par Springer. 31
- Figure 9 : A) Exemple de la tâche à effectuer dans l'expérience de Bidet-Ildei et al., 2010. A partir de la séquence animée de points les participants devaient déterminer si le mouvement de course représenté au centre se dirigeait vers la droite ou vers la gauche. B) Représentation des différents types d'amorçage proposé avant la réalisation de la tâche (neutre, moteur, visuel homme et visuel femme). C) Résultats obtenus sur la tâche de discrimination. Les Astérix représentent des différences significatives. Adapté de « Rôle des représentations motrices dans la perception visuelle des mouvements humains » de Bidet-Ildei, Orliaguet & Coello, 2011, p 427, *l'Année Psychologique*. Copyright 2011 par Armand Colin. 35
- Figure 10 : Stimuli (A) et résultats (B) obtenus dans l'expérience de Pavlova et al., 2003. Adapté de « Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions » Pavlova, Staudt, Sokolov, Birbaumer & Kraëgeloh-Mann, 2003, p 695-697, *Brain*. Copyright 2003 par Oxford University Press. 38
- Figure 11 : A) Photographie représentant la procédure expérimentale. Les nouveaux nés étaient assis sur un siège rigide face à deux écrans. Une caméra placée au centre des écrans permettait de filmer le regard des nouveaux nés. Sur chaque écran la séquence apparaissait pendant 1 minute avec une inversion de la position des séquences au bout de 30s. B) Extraits statiques des différentes séquences animées utilisées durant l'expérience. Reproduit de « Preference for Point-Light Human Biological Motion in Newborns: Contribution of Translational Displacement » de Bidet-ildei, Kitromilides, Orliaguet, Pavlova & Gentaz, 2014, p 115, *Developmental Psychology*. Copyright 2014 par American Psychological Association. 40
- Figure 12 : Résultats obtenus dans l'étude de Bidet-Ildei et al. 2014. Adapté de « Preference for Point-Light Human Biological Motion in Newborns: Contribution of Translational Displacement » de Bidet-ildei, Kitromilides, Orliaguet, Pavlova & Gentaz, 2014, p 115, *Developmental Psychology*. Copyright 2014 par American Psychological Association. 41
- Figure 13 : Procédure (A) et résultats (B) obtenus dans l'expérience de Lingnau & Petris (2013). La partie A représente le déroulement d'un essai pour la tâche perceptive (indiquer s'il y avait un point rouge durant la séquence). Les essais se déroulaient de la même manière mais la consigne changeait pour les deux autres tâches (tâche effecteur : indiquer si l'effecteur important dans le mouvement était le bras ou la jambe ; Détermination du but : indiquer si le mouvement perçu impliquait une balle ou non). Sur la partie B apparait le résultat du contraste (tâche impliquant le choix de l'effecteur ou du but de l'action > tâche impliquant le repérage d'un marqueur rouge dans la séquence de mouvement). RH : hémisphère droit, LH : hémisphère gauche, PMd : partie dorsale du cortex pré-moteur, IFG : Gyrus frontal inférieur, IPL : Lobe pariétal inférieur, aVLPFC : Cortex Pré-frontal ventro latéral antérieur, MTG : Gyrus temporal médial. Adapté de "Action Understanding Within and Outside the Motor System: The Role of Task Difficulty" de Lingnau & Petris, 2013, p1344-1346, *Cerebral Cortex*, Copyright 2013 par Oxford Journal. 43
- Figure 14 : Illustrations des différences significatives obtenues chez les hommes et les femmes lors de la perception de mouvements biologiques représentant un marcheur. RMS indique les différences entre l'activation obtenue pour les séquences animées représentant un marcheur et les séquences animées représentant un mouvement de marche mélangé. Adapté de « Sex differences in the neuromagnetic cortical response to biological motion » de Pavlova, Sokolov & Bidet-Ildei, 2015, *Cerebral Cortex*, p 3470-3471. Copyright 2015 par Oxford Journals. 47
- Figure 15 : Schéma représentant le modèle d'intervention conditionnelle du système moteur rendant compte du jugement de séquences animées représentant des mouvements humains chez les sujets sains. Les flèches pleines représentent des étapes systématiques alors que la flèche en pointillés représente une possibilité. La couleur verte représente les étapes intervenant au niveau du système moteur alors que la couleur bleue représente les étapes intervenant au niveau du système visuel. La couleur turquoise représente l'intervention des deux systèmes (visuel et moteur). 49
- Figure 16 : Résultats obtenus dans l'expérience de Hauk et collaborateurs (2004). A) Activations hémodynamique reliée aux mouvements de la langue, du doigt et du pied. B) Activations hémodynamiques reliées à la lecture de verbes d'action en lien avec le visage, le bras ou la jambe. C) Moyenne des activations (en unités arbitraires) observées dans chaque partie du cortex moteur de l'hémisphère gauche lors de la lecture des différentes catégories de verbes d'action. Adapté de « Somatotopic representation of action words in

- human motor and premotor cortex » de Hauk, Johnsrude & Pulvurmüller, 2004, *Neuron*, p301-307. Copyright 2004 par Cell Press. 55
- Figure 17 : Procédure (A) et Résultats (B) observés dans l'expérience 2 de Bidet-Ildei et al. (sous-presse). A) procédure utilisée. B) Moyennes et erreurs types des temps de mouvements mesurés en pré-test et post-test dans le groupe contrôle et le groupe immobilisé. C) Moyennes et erreur types de l'indice d'amélioration entre pré-test et post test pour le groupe contrôle et le groupe immobilisé. Adapté de « Short-term upper limb immobilization affects action-words understanding » de Bidet-Ildei, Meugnot, Beauprez, Gomenes & Toussaint..... 57
- Figure 18 : Procédure et résultats obtenus dans l'expérience de Boulenger et collaborateurs (2008). A) déroulement d'un essai. B) Résultats obtenus en fonction de la condition d'amorçage (« Consonants » lorsque le prime était constitué d'une suite de consonnes et « Identical » « lorsque le prime était identique à la cible). Les points blancs indiquent les performances pour les noms et les points noirs pour les verbes. Les astérisques indiquent la présence de différences significatives. Adapté de « Word processing in Parkinson's disease is impaired for action verbs but not for concrete nouns » de Boulenger, Mechtouff, Thobois, Broussolle, Jeannerod, 2008, *Neuropsychologia*, p 743-756. Copyright 2008 par Elsevier..... 59
- Figure 19 : Pourcentage de changement du signal obtenu dans la lecture des phrases et l'observation des actions en fonction des régions d'intérêts définies individuellement lors de l'observation des actions. Les barres représentent les erreurs standards. Les interactions entre la partie du corps sollicitée et les régions d'intérêt sont significatives pour tous les graphiques excepté le graphique B. Adapté de « Congruent embodied representations for visually presented actions and linguistic phrases describing actions » de Aziz-zadeh, Wilson, Rizzolatti & Iacobini, 2006, *Current Biology*, p 1818-1823. Copyright 2006 par Elsevier.... 63
- Figure 20 : Procédure et résultats de l'expérience de Khader et al. 2010. A) Procédure utilisée dans l'ensemble des essais. Dans l'exemple un nom doit être généré, le contexte étant donné par le sujet (souris) et le verbe (mange). B) résultats obtenus lors de la génération des noms et des verbes. Adapté de « Neural correlates of generating visual nouns and motor verbs in a minimal phrase context » de Khader, Jost, Mertens, Bien & Rösler, 2010, *Brain Research*, p 122-132. Copyright 2010 par Elsevier..... 64
- Figure 21 : Procédure utilisée dans l'expérience de Bidet-Ildei et al. (2011). A) Déroulement d'un essai. B) images statiques représentant les différentes vidéos utilisées au cours de l'expérience. Les images du haut représentent les vidéos contenant les actions humaines avec les points gris représentant l'action et les points blancs représentant le masque (dans l'expérience tous les points étaient blancs) et les images du bas représentent les vidéos ne contenant pas d'action humaines. Repris de « Reading action word affects the visual perception of biological movements » de Bidet-ildei, Sparow & Coello, 2011, *Acta Psychologica*, p 332. Copyright 2011 par Elsevier. 67
- Figure 22 : Résultats obtenus dans l'expérience de Bidet-Ildei et al. (2011) pour le pourcentage de bonnes réponses et le temps de réponse dans les différentes conditions. Les barres indiquent les erreurs standards et les accolades des différences significatives. Repris de « Reading action word affects the visual perception of biological movements » de Bidet-ildei, Sparow & Coello, 2011, *Acta Psychologica*, p 333. Copyright 2011 par Elsevier. 68
- Figure 23 : Procédure utilisée dans l'expérience de Bidet-Ildei & Toussaint (2015) pour la tâche de décision lexicale (A) et la tâche de décision de mouvement (B). Repris de « Are judgements for action verbs and point-light human actions equivalent? » de Bidet-Ildei, & Toussaint, 2015, *Cognitive Processing*, p 61. Copyright 2015 par Springer..... 69
- Figure 24 : Résultats obtenus dans l'expérience de Bidet-Ildei & Toussaint (2015). A) moyenne du pourcentage de bonnes réponses (a) et des temps de réponse (b) pour les pseudo-stimuli (pseudo-noms, pseudo-verbes et pseudo-action) et les stimuli valides (noms, verbes et actions). Les barres indiquent les erreurs standards et les astérisques des différences significatives. B) Corrélations obtenues entre les performances pour juger des mots (voir graph a pour verbes et graph b pour noms) et la performance pour juger des actions ainsi que concernant la performance pour juger de noms et des verbes (c). Adapté de « Are judgements for action verbs and point-light human actions equivalent? » de Bidet-Ildei, & Toussaint, 2015, *Cognitive Processing*, p 61-62. Copyright 2015 par Springer. 70
- Figure 25 : Résultats obtenus dans l'expérience de Bidet-Ildei et collaborateurs (2016) en ce qui concerne les capacités de détection (A) et les temps de réponse (B). Les barres représentent les erreurs standards. Reproduit de « Sentences plausibility influences the link between action words and the perception of biological movements » de Bidet-Ildei, Gimenes, Toussaint, Almecija & Badets, 2016, *Psychological Research*, Copyright 2016 par Springer. 76
- Figure 26 : Illustration des liens existant entre les zones du langage et les zones de la motricité. Les flèches indiquent des connexions cortico-corticales de longue distance. A1 : représente le cortex auditif primaire,

BPO : la partie operculaire de l'aire de Broca, BPT : la partie triangulaire de l'aire de Broca, M1 : le cortex moteur primaire, PFC : partie postérieur du cortex pré-frontal, PMC : le cortex pré-moteur, WB : Cortex auditif secondaire de l'aire de Wernicke, WPB : Régions auditives tertiaires de l'aire de Wernicke. Reproduit de « Brain mechanisms linking language and action” de F. Pulvurmüller, 2005, *Nature Reviews Neuroscience*, p 577 Copyright 2005 par Nature Publishing Group. 78