



UNIVERSITÉ DE NANTES

Unité de Formation et de Recherche de Médecine et des Techniques Médicales

Année Universitaire 2017/2018

Mémoire

pour l'obtention du

Certificat de Capacité en Orthophonie

**Perspectives thérapeutiques issues
de l'exploitation des neurones miroirs
en prise en charge orthophonique
de l'aphasie post-AVC**

présenté par *Amandine LISIACK*

Née le 28/06/1991

Président du Jury : Monsieur MAZOUÉ Aurélien – Orthophoniste, chargé de cours

Directeur du Mémoire : Monsieur CHERAUD Yvonnick – Maître de conférence

Co-directrice du mémoire : Madame WEISZ Justine – Orthophoniste

Membre du jury : Madame TERPEREAU Juliette – Orthophoniste, chargée de cours

Remerciements

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidée dans la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de mémoire, Yvonnick Chéraud, pour ses précieux conseils, ses encouragements, sa gentillesse et le temps qu'il m'a consacré. Je sors grandie de ce travail et plus que jamais intéressée par la recherche.

Je désire aussi remercier sincèrement ma co-directrice, Justine Weisz pour son accueil et le partage de sa vision de l'orthophonie. Ma riche expérience à ses côtés marquera à jamais ma pratique.

Merci à l'ensemble des orthophonistes qui m'ont accueillie en stage tout au long de ma formation, et plus spécifiquement à la sympathique équipe du MPR Côte d'amour qui m'a beaucoup appris.

Je voudrais également remercier mes camarades de promotion, amis et proches, qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de mes études.

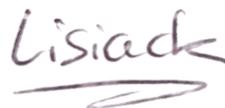
Engagement de non-plagiat

« Par délibération du Conseil en date du 7 Mars 1962, la Faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation ».

Je soussignée Amandine LISIACK déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes ses formes de support, y compris l'Internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Fait à Nantes, le : 22/05/2018

Signature :

The image shows a handwritten signature in dark ink. The name 'Lisiack' is written in a cursive, slightly slanted style. Below the name, there is a horizontal flourish or underline that starts under the 'L' and ends under the 'k'.

SOMMAIRE

ABRÉVIATIONS

AVANT-PROPOS.....1

1 INTRODUCTION GENERALE : PRESENTATION DU CADRE DE RECHERCHE.....3

1.1 Cadre sémiologique de la recherche : l'aphasie post-AVC.....3

1.1.1 Déficit du niveau linguistique.....3

1.1.2 Description sémiologique et grands principes.....4

1.1.3 Déficit phonologique vs sémantique.....6

1.1.4 Étiologie vasculaire et perspectives.....6

1.2 Rizzolatti, et la découverte des neurones miroirs chez le singe8

1.2.1 Du neurone aux neurones miroirs8

1.2.2 Aire F5 et Mirror Neuron System (MNS).....9

1.2.3 Premiers éléments de définition du MNS9

1.3 Neurones miroirs chez l'homme.....10

1.3.1 Apports de la neuroimagerie.....11

1.3.2 MNS : système plastique en jeu dans l'imitation et l'apprentissage.....12

1.3.3 MNS : un « langage » neuronal commun14

1.4 Perspectives thérapeutiques issues de l'exploitation du MNS.....16

1.4.1 Perspectives thérapeutiques en psychopathologie16

1.4.2 Perspectives thérapeutiques en réhabilitation motrice17

1.4.2.1 "Action Observation Therapy" (AOT) et facilitation17

1.4.2.2 Traitement des hémiparésies et des hémiplégies18

1.4.2.3 Traitement des douleurs fantômes et SDRC.....19

1.4.2.4 Traitement des paralysies faciales périphériques.....19

2 PROBLEMATIQUE : EXPLOITATION DES NEURONES MIROIRS EN REHABILITATION DE L'APHASIE POST-AVC.....21

2.1 Neurones miroirs , action orales et articulatoires21

2.1.1 Données de l'imagerie neurofonctionnelle21

2.1.2 Données des études électrophysiologiques.....	22
2.1.3 Perspectives thérapeutiques du MNS sur la parole.....	23
2.2 Intrication des systèmes linguistique et moteur.....	24
2.2.1 Arguments anthropologique, phylogénétique et développemental	24
2.2.2 Arguments des études expérimentales.....	26
2.2.2.1 <i>Lien entre la main et la bouche</i>	26
2.2.2.2 <i>Le lien entre l'action et le langage</i>	28
2.3 Stimulation linguistique via AOT	30
2.3.1 IMITATE : l'observation du langage en facilite la production ?.....	30
2.3.2 Observation d'actions et stimulation de la production lexicale.....	31
2.3.2.1 <i>Contribution de l'équipe de Rizzolatti</i>	31
2.3.2.2 <i>Contribution de l'équipe québécoise de Routhier</i>	34
2.3.3 Observation d'actions et stimulation linguistique générale.....	35
 3 QUESTIONNEMENTS ET PERSPECTIVES : LES APPORTS DE LA RECHERCHE EXPERIMENTALE.....	 40
3.1 Limites de la recherche sur l'exploitation des neurones miroirs en réhabilitation de l'aphasie post-AVC.....	40
3.1.1 Champ de recherche marginal.....	40
3.1.2 Exclusivité d'un profil aphasique d'origine phonologique ?.....	40
3.1.3 Exclusivité d'un déficit : l'anomie verbale ?.....	41
3.1.4 AOT vs réhabilitation orthophonique classique	42
3.2 Intérêt de la recherche sur l'exploitation des neurones miroirs en réhabilitation de l'aphasie post-AVC.....	43
3.2.1 Synthèse sur les besoins expérimentaux futurs	43
3.2.2 Application clinique et orthophonique de l'AOT.....	44
3.3 Nouvelles implications théoriques sur le langage	45
3.3.1 <i>Motor Theory of Speech Perception</i>	45
3.3.2 <i>Embodied cognition theory</i>	47
 CONCLUSION.....	 50
 TABLE DES ANNEXES.....	 I
 BIBLIOGRAPHIE	

ABRÉVIATIONS

AOT :	<i>Action-observation therapy / Action-observation treatment /</i> Thérapie par observation d'actions / Traitement par observation d'actions
AVC :	Accident vasculaire cérébral
B44 :	Aire 44 de Brodmann gauche ou aire de Broca de gauche
EEG :	Électroencéphalographie
HAS :	Haute Autorité de Santé
HD :	Hémisphère droit
HG :	Hémisphère gauche
IFG :	Gyrus frontal inférieur
INF :	Imagerie neurofonctionnelle
IRMf :	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
MEG :	Magnétoencéphalographie
MNS :	<i>Mirror neuron system /</i> Système des neurones miroirs
MSDs :	<i>Motor Speech Disorders</i>
MSH :	<i>Mirror System Hypothesis</i>
MT :	<i>Motor Theory of Speech Perception /</i> Théorie motrice de la perception de la parole
PEMs :	Potentiels évoqués moteurs
PFP :	Paralysie faciale périphérique
SDRC :	Syndrome douloureux régional complexe
SNC :	Système nerveux central
STS :	Sulcus temporal supérieur
TSA :	Troubles du spectre autistique
vPM :	Cortex prémoteur ventral

AVANT-PROPOS

L'aphasie post-AVC est un trouble neurologique acquis causé par une lésion vasculaire. À l'heure actuelle, sa prise en charge en orthophonie repose sur des modèles linguistiques et de neuropsychologie cognitive traditionnels. La découverte de l'existence des neurones miroirs dans l'aire BA44 de l'homme, appelée aire de Broca, ouvre de nouveaux horizons. L'aire de Broca est traditionnellement définie comme l'aire motrice de la production de la parole. Située dans le gyrus frontal inférieur (IFG*) de l'hémisphère gauche, elle est particulièrement affectée lors d'un AVC sylvien gauche. L'aphasie est une des conséquences fonctionnelles courantes de la souffrance de BA44, zone clé des neurones miroirs. Dans quelles mesures, la stimulation du système miroir pourrait-elle constituer une nouvelle approche en réhabilitation des troubles acquis du langage ? À ce jour, la recherche sur les neurones miroirs s'est particulièrement intéressée à leur exploitation en neuroréhabilitation des troubles moteurs. Ce mémoire de recherche bibliographique a pour objectif de s'intéresser aux **perspectives thérapeutiques issues de l'exploitation des neurones miroirs en prise en charge de l'aphasie post-AVC**.

Notre travail se propose de rendre compte de l'état de l'art au travers d'un prisme inédit dans la recherche : l'interprétation orthophonique. Les études portant sur les neurones miroirs sont principalement menées par des chercheurs en neuropsychologie cognitive et en neurosciences. Rares sont les publications orthophoniques qui les évoquent. Ainsi, nous proposons une revue qualitative dont la méthodologie de recherche est présentée en annexe (Annexe : méthodologie p.VII). Les publications récentes sont privilégiées, et nous accordons un intérêt à rendre compte des travaux d'une pluralité de chercheurs et de points de vue. Enfin nous écartérons de notre recherche la modalité écrite des troubles acquis du langage pour se concentrer sur la modalité orale.

Une première partie introductive présentera le cadre de la problématique. L'enjeu est d'apporter les différents éléments nécessaires à la compréhension de notre recherche. Après une description des troubles aphasiques acquis et des enjeux de leur réhabilitation, nous présenterons les neurones miroirs et leurs propriétés fonctionnelles. Ensuite, un tour d'horizon des différentes perspectives thérapeutiques en psychopathologie et en réhabilitation motrice permettra d'introduire les liens entre les neurones miroirs, l'orthophonie et l'aphasiologie. La deuxième partie du mémoire expliquera le lien entre l'action et le langage. Nous

convoquerons pour cela des arguments issus d'études anthropologiques, électrophysiologiques, comportementales et de la neuroimagerie. Enfin, nous proposerons une critique constructive des différents protocoles de recherche qui apprécient l'effet d'une stimulation du système sensorimoteur et de ses représentations sur le langage. La troisième et dernière partie de notre travail soumettra une synthèse des limites et des intérêts des études consultées. Nous envisagerons d'une part les besoins expérimentaux futurs et d'autre part l'application clinique des protocoles de recherche sur les neurones miroirs en orthophonie. Enfin, nous rendrons compte des nouvelles implications théoriques pour le langage que sous-tend la recherche sur les neurones miroirs et l'aphasie.

L'aphasie est sans doute la pathologie du sujet adulte la plus fréquemment rencontrée en rééducation orthophonique. Notre projet de mémoire s'inscrit dans une thématique de recherche contemporaine et majeure dans le champ des neurosciences. Il a pour ambition d'envisager de nouvelles approches thérapeutiques en orthophonie et de présenter de nouvelles hypothèses théoriques.

1 INTRODUCTION GENERALE : PRESENTATION DU CADRE DE RECHERCHE

1.1 Cadre sémiologique de la recherche : l'aphasie post-AVC

Notre recherche porte sur l'aphasie d'origine post-AVC. Elle se définit comme « l'ensemble des troubles de la communication par le langage secondaires à des lésions cérébrales acquises entraînant une rupture du code linguistique » (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Monod-Broca et Hamonet, 2007). Elle peut affecter les modalités écrite ou orale mais nous avons choisi de nous restreindre à cette dernière. En effet, le langage écrit relève d'un processus de transcodage et inclut d'autres niveaux de traitement (Guérin, 2007). L'histoire de l'aphasiologie elle-même a d'abord privilégié l'oral sur l'écrit. En clinique, les plaintes sur des dysfonctionnements du langage oral sont prédominantes. Enfin, notre choix s'explique aussi par la littérature sur les neurones miroirs, qui privilégie quasi exclusivement la modalité orale.

1.1.1 *Déficit du niveau linguistique*

En premier lieu, l'aphasie est à différencier des troubles de l'articulation, qui concernent les altérations des mouvements élémentaires de l'appareil bucco-phonatoire, et des troubles de la parole. Ces derniers ne relèvent pas du niveau linguistique. Ainsi, les troubles aphasiques se distinguent de l'apraxie bucco-faciale*, de l'apraxie de la parole*, de la dysarthrie*, ou encore de l'anarthrie*. L'aphasie ne constitue pas un dysfonctionnement des organes de la parole et ne relève pas d'un déficit de la réalisation motrice du langage comme les *Motors Speech Disorders* (MSDs) (Duffy, 2013). Deuxièmement, l'aphasie se distingue des troubles supralinguistiques du discours, qui affectent plus globalement la communication. Ce sont des altérations secondaires du langage et du discours qui relèvent d'autres fonctions cognitives (Daviet, Muller, Stuit, Darrigand et Mazaux, 2007). Bien sûr, les troubles peuvent s'associer, mais isolément, **l'aphasie est un trouble de la production et/ou de la compréhension purement linguistique ; par opposition aux déficits moteurs, praxiques, arthriques, ou de la communication.**

L'aphasie, au singulier, désigne en vérité des aphasies car elle regroupe une pluralité de signes sémiologiques et de tableaux cliniques (Mazaux, Nespoulous, Pradat-Diehl et Brun,

2007). Les signes peuvent concerner de manière plus ou moins dissociée les versants réceptif et expressif, avec des degrés d'atteintes variables. Aussi, l'approche linguistique en aphasiologie a permis de distinguer différents niveaux d'atteintes, à savoir : phonologique, sémantique, lexical et syntaxique (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010). L'analyse de la fluence est un critère diagnostique majeur en clinique. Aussi appelée débit verbal, elle est appréciée par « le nombre moyen de mots émis consécutivement dans une même émission » (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010). La fluence peut être réduite, ce qui correspond à une baisse voire un anéantissement de l'incitation verbale. Les tableaux cliniques sont alors dits logopéniques, non fluents voire mutiques. À l'inverse elle peut être pathologiquement majorée. Les profils sont alors fluents voire logorrhéiques (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010). L'analyse du niveau lexical est elle aussi primordiale. **Son altération en production, appelé anomie, est le symptôme qui prévaut dans tous les types d'aphasie** (Marangolo *et al.*, 2010 ; Routhier, Bier et Macoire, 2015). L'anomie est le « noyau du tableau symptomatologique de l'aphasie » (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010). Il s'agit d'un manque du mot qui se manifeste par des interruptions du discours et qui peut aller jusqu'à un mutisme total dans les cas d'anomie massive. Le discours apparaît comme réduit du point de vue qualitatif et quantitatif. L'anomie peut donner lieu à des déviations linguistiques telles que des paraphasies, des conduites d'approches, des néologismes, et des productions relevant du jargon (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Mazaux, Nespoulous, Pradat-Diehl et Brun, 2007). Enfin, au niveau syntaxique les perturbations aphasiques peuvent se manifester par la production d'énoncés agrammaticaux et/ou dyssyntaxiques. En réception, le déficit est généralement majoré par un effet de longueur et de complexité du discours (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Mazaux, Nespoulous, Pradat-Diehl et Brun, 2007).

1.1.2 Description sémiologique et grands principes

Grâce à une évaluation rigoureuse du langage par des tests orthophoniques et des données sur la topographie lésionnelle, un diagnostic orthophonique du sujet aphasique peut être réalisé. La classification clinique des aphasies a beaucoup évolué depuis la naissance de l'aphasiologie. Aujourd'hui, la dichotomie classique opposant l'aphasie de Broca* et l'aphasie de Wernicke* est désuète. Dans la pratique, les cas d'école sont rares et l'étiquetage à un tableau phasique est souvent réducteur. L'imagerie neurofonctionnelle (INF) sur l'aphasie est

fondatrice des représentations neuroanatomiques actuelles du langage. Elle fait voler en éclat le modèle bipolaire du localisationniste* opposant un pôle postérieur réceptif (*i.e.* l'aire de Wernicke) et un pôle antérieur productif (*i.e.* l'aire de Broca) au profit d'une conception dynamique du langage. La notion de *centres du langage* ne fait plus sens ; ils sont toujours impliqués mais n'enferment plus à eux seuls le langage (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Guérin, 2007).

La notion de fluence introduite par l'école de Boston dans les années 1960 est celle qui prime désormais pour les différents acteurs intervenant auprès de personnes aphasiques, et ce à l'échelle internationale (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010). On distingue donc les aphasies non fluentes (ou réduites) des aphasies fluentes. Au sein des aphasies non fluentes, l'aphasie de type Broca*¹ est la forme prototypique. On trouve aussi l'aphasie transcorticale motrice*, l'aphasie transcorticale mixte et l'aphasie globale. Parmi les aphasies fluentes, se distinguent les aphasies avec et sans trouble de la compréhension. Les aphasies fluentes avec trouble de la compréhension sont les aphasies de type Wernicke*, transcorticales sensorielles* ou mixtes. Quant aux aphasies fluentes sans trouble de la compréhension, elles regroupent les aphasies de conduction* et les aphasies anomiques (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Mazaux, Nespoulous, Pradat-Diehl et Brun, 2007).

Aujourd'hui, l'approche classique de prise en soin des troubles aphasiques acquis est empreinte de la révolution cognitiviste. Articulée avec les progrès de l'INF, elle fonde des modèles connexionnistes qui se suppléent aux modèles localisationnistes*. **Le langage n'est plus rattaché à des centres du langage exclusifs, mais repensé en un réseau, dynamique et flexible.** Les fonctions cognitives et la cognition se décomposent en différents systèmes de traitements, eux mêmes constitués de différentes unités fonctionnelles en interconnexion. Ces connexions peuvent être renforcées ou modifiées par l'apprentissage et la stimulation thérapeutique (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Lambert, 2008 ; Sauzéon, 2007).

Les objectifs orthophoniques généraux en prise en charge de l'aphasie sont de rétablir autant que possible les capacités de communication du patient et d'optimiser la fonctionnalité de ses échanges. Trois grandes démarches se distinguent : la restauration, la réorganisation, la compensation. La restauration vise le rétablissement des aptitudes. La réorganisation vise

1 Les termes signalés par le signe * sont définis dans le glossaire

plutôt l'exploitation des aptitudes résiduelles pour rétablir un fonctionnement comparable au fonctionnement pré-AVC. Quant à la compensation, elle repose sur la mise en place de stratégies palliatives voire d'aménagement de l'environnement (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

1.1.3 *Déficit phonologique vs sémantique*

D'après le connexionnisme, les différents troubles phasiques peuvent avoir une cause phonologique et/ou sémantique. **L'information lexicale est encodée par des traits phonologiques, sémantiques** (et orthographiques mais ceux-ci nous intéressent peu ici) **et tous sont connectés**. L'atteinte phonologique est le trouble le plus caractéristique de l'aphasie. Il s'agit d'une altération des représentations phonologiques de la forme des mots. Lorsque le trouble langagier est d'ordre sémantique l'atteinte relève d'un déficit d'accès et/ou du stock lui-même (*i.e.* que les représentations sémantiques du sens des mots sont altérées) (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Lambert, 2008 ; Mazaux, Nespoulous, Pradat-Diehl et Brun, 2007 ; Tran, 2007).

Le traitement des troubles phonologiques en production recouvre essentiellement des techniques de facilitation avec indiçage puis estompage progressif. Il s'agit pour l'orthophoniste d'amorcer chez le patient la récupération de la forme phonologique des mots qu'il souhaite produire, en lui donnant différents indices (phonologiques, sémantiques, orthographiques). Les déficits de compréhension d'origine phonologique sont pris en charge par des entraînements de discrimination auditifs et une approche métaphonologique. Quant aux thérapies sémantiques, elles sont de nature verbale et non verbale. Le patient peut être stimulé par des tâches de catégorisation, de classement, d'appariement, de recherche d'intrus, d'évocation *etc.* L'objectif est de restructurer les représentations conceptuelles en manipulant les traits sémantiques qui les composent (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Lambert, 2008 ; Routhier *et al.*, 2015; Tran, 2007).

1.1.4 *Étiologie vasculaire et perspectives*

La principale étiologie de l'aphasie est vasculaire. Elle a principalement pour origine les AVC de l'artère sylvienne gauche. L'aphasiologie a d'ailleurs étudié principalement les aphasie post-AVC pendant des décennies (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Peskine et Pradat-Diehl, 2007). Les étiologies non vasculaires regroupent des pathologies

neurodégénératives, inflammatoires comme la sclérose en plaques, tumorales, infectieuses ou encore traumatiques (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Peskine et Pradat-Diehl, 2007). Dans un contexte non vasculaire, l'aphasie est particulièrement associée à d'autres troubles et ne constitue parfois pas l'atteinte majeure.

Notre travail porte sur les perspectives thérapeutiques issues de l'exploitation des neurones miroirs des aphasies post-AVC car il s'agit de l'étiologie prévalente et parce qu'elle induit des atteintes plus pures que les autres origines. L'atteinte linguistique peut être isolée (Peskine et Pradat-Diehl, 2007). En effet, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit l'AVC comme la « survenue *brutale* d'un déficit d'une fonction cérébrale, le plus souvent *focal*, parfois global, sans autre cause apparente que vasculaire » (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010). Les perspectives thérapeutiques exposées par notre recherche s'adressent aux aphasies issues d'AVC ischémiques* et hémorragiques* sans distinction ; aucune publication consultée ne les oppose. En outre, notre intérêt pour l'étiologie vasculaire s'explique parce que les possibilités de récupération et de réhabilitation sont plus évidentes que dans d'autres étiologies, notamment dégénératives. Après un AVC s'observe un phénomène de récupération spontanée dont le degré est relatif à l'ampleur de la lésion, aux capacités antérieures du sujet *etc.* Avec la réhabilitation de l'afflux sanguin le cerveau est en mesure de se réorganiser pour compenser le déficit lésionnel. **L'objectif de la neuroréhabilitation est d'ailleurs de se saisir des possibilités de plasticité cérébrale pour rétablir un langage aussi fonctionnel que possible.** Aussi, en tant que trouble de survenue brutale, l'aphasie post-AVC permet de déterminer un *avant* et un *après*. Il est donc possible d'apprécier les effets d'une stimulation. « Les patients victimes de lésions vasculaires sont des candidats privilégiés pour les études sur les troubles du langage » (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Enfin, notre intérêt pour l'aphasie post-AVC est de s'inscrire dans une préoccupation de santé publique. Avec 150 000 nouvelles victimes chaque année en France, l'AVC est la première cause neurologique d'hospitalisation et représente la première cause de handicap acquis de l'adulte. L'aphasie se retrouve dans environ 1/3 des cas de lésions vasculaires (Daviet *et al.*, 2007; Flowers *et al.*, 2017). La prise en charge des AVC est devenue une priorité de santé pour la Haute Autorité de Santé (HAS). Suite au plan de 2010-2014 dont l'objectif était de diminuer la mortalité et le handicap post-AVC, la campagne de 2017 pour l'amélioration de la prise en charge des AVC constitue la quatrième campagne nationale

(Haute Autorité de Santé, 2016). En orthophonie, la prise en charge des patients en post-hospitalisation liée à un AVC sera valorisée au 1er janvier 2019. L'avenant n°16 de la convention nationale des orthophonistes prévoit en effet une mise en place d'un forfait de rémunération complémentaire en complément des actes de rééducation habituels (Fédération nationale de orthophonistes [FNO], 2017). Notre travail sur les neurones miroirs et l'aphasie post-AVC a pour objectif de contribuer humblement à la recherche sur de nouvelles approches thérapeutiques de l'aphasie.

1.2 Rizzolatti, et la découverte des neurones miroirs chez le singe

1.2.1 Du neurone aux neurones miroirs

En 1906, Ramon y Cajal découvre l'« unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux » (Purves *et al.*, 2011, chp1) : le neurone. Cette cellule est au cœur du fonctionnement cérébral et permet la transmission des informations via la neurotransmission. Un neurone ne fonctionne jamais seul. Il est intégré dans des circuits neuronaux organisés en systèmes. La fonction d'un circuit dépend du sens dans lequel l'information circule : du système nerveux central (SNC) vers les organes, ou des organes vers le SNC. Ainsi trois types de neurones interviennent dans la construction de ces circuits : les neurones afférents, qui reçoivent une information pour la transmettre au SNC, les neurones efférents qui émettent une information depuis le SNC et les interneurones qui font la jonction entre les deux. Les différents circuits de notre organisme sont regroupés en systèmes neuronaux tels que le système sensoriel, le système moteur et les systèmes associatifs, qui régissent les fonctions cérébrales complexes telles que la mémoire ou le langage (Purves *et al.*, 2011, chp1).

Moins de 100 ans après la découverte du neurone, des études sur le cerveau du singe mettent en évidence un type de neurone au fonctionnement inédit : les neurones miroirs. Leur découverte est attribuée au professeur italien Rizzolatti et son équipe à la fin des années 1990. Il s'agit de neurones sensorimoteurs impliqués à la fois dans le traitement des afférences et des efférences. Plus précisément, les neurones miroirs du singe s'activent lorsque l'animal exécute une action, mais aussi lorsque l'animal observe l'action être effectuée par un congénère. **Que le macaque exécute lui-même une action, ou qu'il la voit être effectuée par un autre, un type de neurones s'active de la même manière, en *miroir*, entre l'agent et l'observateur**

(Arbib, 2008 ; Boulenger, 2006 ; Rizzolatti et Arbib, 1998 ; Rizzolatti et Cattaneo, 2009 ; Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2016 ; Small, Buccino et Solodkin, 2012).

1.2.2 Aire F5 et Mirror Neuron System (MNS)

En 1998 les chercheurs formulent la "*Mirror System Hypothesis*" (MSH) (Arbib et Rizzolatti, 1998). Il s'agit de l'hypothèse de l'existence des neurones miroirs, et du fait qu'il fonctionnent en un système organisé : le "*Mirror Neuron System*" (MNS) (Cattaneo et Rizzolatti, 2009 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). Chez les singes, la première zone du cerveau identifiée comme comportant des neurones miroirs est l'aire F5 gauche, au niveau du gyrus frontal inférieur (IFG). Il s'agit de la partie latérale du cortex prémoteur ventral (vPM) (Figure 1 p.IX) (Casile, 2013 ; Mathon, 2013 ; Rizzolatti et Arbib, 1998 ; Rizzolatti et Cattaneo, 2009 ; Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2016 ; Small, *et al.*, 2012). Environ 17% des neurones de cette zone auraient des propriétés miroirs (Gallese *et al.*, 1996, cités par Dinstein, Thomas, Behrmann et Heeger, 2008 et par Molenberghs, Cunnington et Mattingley, 2011). Les études successives exploitant des techniques d'IRMf ont ensuite montré la présence des neurones miroirs au niveau du lobe pariétal inférieur et plus précisément sur sa partie antérieure. Jusqu'alors, les aires motrices du cortex n'avaient jamais été envisagées comme pouvant avoir une valeur sensitive. Au contraire, comme leur nom l'indiquent elles sont rattachées à des fonctions motrices et exclusivement efférentes. **L'existence du MNS remet en cause la dichotomie traditionnelle opposant les systèmes sensoriel et moteur, par sa bidirectionnalité. La notion de « miroir » efface la frontière classiquement établie entre ce qui relève du perceptif et ce qui relève du moteur** (Boulenger, 2006 ; Chen et Yuan, 2008 ; Pulvermüller, 2005 ; Pulvermüller *et al.*, 2014 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008 ; Small *et al.*, 2012).

1.2.3 Premiers éléments de définition du MNS

Les publications de 1988 (Rizzolatti et Gentilucci, 1988 et Rizzolatti *et al.*, 1988, cités par Rizzolatti et Sinigaglia, 2008) affirment que les neurones miroirs sont organisés de manière à former des réseaux miroirs plus ou moins spécifiques à des types d'actions. **Ils ne codent pas des « mouvements particuliers » mais des « actes moteurs », c'est-à-dire un ensemble de mouvements coordonnés vers une finalité spécifique** (Rizzolatti et Sinigaglia,

2008). Autrement dit, les réseaux miroirs du MNS interprètent un ensemble de mouvements physiques en un type d'action défini. Rizzolatti et Sinigaglia (2008) mettent en évidence deux degrés de congruence possibles : des neurones miroirs «strictement congruents » et les neurones miroirs « congruents au sens large ». Les neurones « strictement congruents » sont minoritaires dans le MNS. Ils sont dits stricts car ils sont recrutés dans le contexte spécifique d'une action particulière. À l'inverse, les neurones « congruents au sens large » constituent la majorité des neurones miroirs. Ils sont doués de généralisation et sont moins sélectifs que les précédents. Ils codent un type d'action et peuvent être recrutés dans le cadre d'actions non similaires mais dont la finalité est proche. Se distinguent par exemple les neurones miroirs spécifiques de l'action de « tenir », de ceux de l'action de « saisir », de ceux du fait de « mordre » (Boulenger, 2006 ; Gallese *et al.*, 1996, cités par Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008).

Les premiers travaux comparant l'activité corticale entre des contextes d'exécution et d'observation d'actions, les neurones miroirs ont de prime abord été définis comme étant visuomoteurs. Cependant, une étude a permis de mettre en évidence leur caractère bimodal. Certains répondent aussi à des stimulations auditives. Si par exemple un singe entend le bruit d'une cacahuète être décortiquée, le pattern moteur de l'action de « décortiquer » du MNS est recruté (Kohler *et al.*, 2002, cités par Rizzolatti et Craighero, 2004 et par Small *et al.*, 2012).

L'articulation entre la notion de congruence et le possible caractère bimodal du MNS suggère qu'il **code davantage le sens global d'une action, plutôt que les différents paramètres cinétiques ou acoustiques qui permettent d'en construire une représentation. D'après de nombreux auteurs, le MNS dispose d'un « vocabulaire d'actes moteurs »** (Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). **Il s'agit d'un répertoire de patterns sensorimoteurs lesquels codent à un niveau abstrait la finalité des actions et non des *input* sensoriels** (Aziz-Zadeh, Wilson, Rizzolatti et Iacoboni, 2006 ; Boulenger, 2006 ; Buccino, 2014 ; Chen et Yuan ; 2008 ; Fogassi et Ferrari, 2007 ; Gallese, 2008 ; Marangolo *et al.*, 2012 ; Marangolo et Caltagirone, 2013 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008).

1.3 Neurones miroirs chez l'homme

La recherche en neuroscience donne souvent lieu à des expérimentations sur les singes. Bien que l'ancêtre commun entre l'*Homo Sapiens Sapiens* et les singes soit vieux de 30

millions d'années, les primates sont nos plus proches parents dans le règne animal. Leur génétique et leur anatomie est relativement proche de la nôtre. Lorsque l'équipe de Rizzolatti fait la découverte des neurones miroirs chez le singe, elle étend la MSH au cerveau à l'*Homo Sapiens Sapiens* et fait l'hypothèse de l'existence d'un MNS chez l'homme.

1.3.1 *Apports de la neuroimagerie*

La première preuve de l'existence de neurones aux propriétés miroirs revient à l'équipe de Fadiga en 1995 (Fadiga *et al.*, 1995 ; Rizzolatti et Arbib, 1998 ; Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Sale et Franceschini, 2012). Pour comparer l'activité neuronale humaine entre un contexte d'exécution d'action et un contexte d'observation, les chercheurs ont eu recours à deux techniques de neuroimagerie, la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) et les potentiels évoqués moteurs* (PEMs). Les résultats montrent que, comme chez le singe, certains neurones ont la particularité d'être recrutés aussi bien si l'action est produite que si elle est observée. Il s'agit de l'"*observation-execution matching mechanism*" (Fogassi et Ferrari, 2007 ; Murakami, Restle et Ziemann, 2011 ; Small, Buccino et Solodkin, 2013). Par la suite, d'autres techniques de neuroimagerie ont confirmé les résultats de Fadiga (1995). La MSH chez l'homme est confirmée par des études en magnétoencéphalographie* (MEG) (Hari *et al.*, 1998, cités par Gentilucci et Corballis, 2006), en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle* (IRMf) (Iacoboni *et al.*, 1999 cités par Gentilucci et Corballis, 2006), et avec électroencéphalographie* (EEG) (Muthukumaraswamy *et al.*, 2004 cités par Gentilucci et Corballis, 2006). Certains chercheurs ont beau se montrer très critiques vis-à-vis des hypothèses de l'équipe de Rizzolatti, ils ne remettent pour autant nullement en cause l'existence d'un MNS chez l'homme (Hickok, 2015 ; Mikulan Reynaldo et Ibáñez, 2014).

Les études exploitant l'IRMf ont aussi permis de fournir des données quant à la localisation du MNS de l'homme. La première région aux propriétés miroirs identifiée est la *pars opercularis* gauche (partie operculaire), aussi appelée aire de Broca ou aire BA44² de Brodmann. La *pars opercularis* est l'une des trois zones qui compose l'IFG. Ce dernier se situe dans le lobe frontal, au dessus de la scissure de Sylvius et se rattache à l'aire prémotrice (vPM) (Figure 2 p.X). Les études s'intéressant à l'organisation spatiale du MNS se sont multipliées et ont mis en évidence une activité miroir dans de nombreuses régions cérébrales. Des neurones miroirs sont localisés dans la partie inférieure du lobe pariétal, plus précisément

2 Nous utiliserons préférentiellement BA44 pour désigner la *pars opercularis*.

au niveau de l'aire BA40, dans le sulcus temporal supérieur (STS) (Figure 2 p.X), dans le cortex visuel primaire, dans le cervelet et dans une partie du système limbique* (Aziz-Zadeh, Koski, Zaidel, Mazziotta et Iacoboni, 2006 ; Bonifazi *et al.*, 2013 ; Rizzolatti et Craighero, 2004; Ertelt et Binkofski, 2012 ; Buccino, 2014). En 2011, une méta-analyse sur 125 études en IRMf recense les différentes zones corticales aux propriétés miroirs (Figure 3 p.XI) (Molenberghs *et al.*, 2011). Selon les auteurs, les résultats des études antérieures, qui latéralisent préférentiellement le MNS à gauche sont biaisés. En conséquence, l'hypothèse formulée par l'équipe de Corballis selon laquelle le MNS est exclusivement gauche est rejetée (Corballis *et al.*, 2002, cités par Aziz-Zadeh, Koski, Zaidel, Mazziotta et Iacoboni, 2006). En effet, les études proposent des stimulations qui mettent principalement en jeu la main dominante droite, rattachée à l'hémisphère gauche (HG). Ainsi, l'activité cérébrale gauche constatée serait plus le reflet de la latéralisation de l'action observée que de celle du MNS lui-même. Il n'existe pas à notre connaissance de méta-analyse qui étudierait la latéralisation de l'activation du MNS lors de tâches linguistiques. Néanmoins, plusieurs auteurs formulent l'hypothèse que les neurones miroirs du langage seraient plutôt latéralisés dans l'HG. Cette spéculation est fondée sur les données d'IRMf qui localisent les neurones miroirs aux propriétés auditives au niveau de BA44 gauche, du cortex auditif primaire gauche (BA41) ainsi qu'à hauteur de BA22 qui correspond à l'aire dite de Wernicke (Figure 2 p.X) (Gazzola *et al.*, 2005 cités par Aziz-Zadeh, Koski, Zaidel, Mazziotta et Iacoboni, 2006 ; Kohler *et al.*, 2002 ; Molenberghs *et al.*, 2011, Pizzamiglio *et al.*, 2005, cités par Boulenger, 2006 ; Watkins et Paus, 2004).

1.3.2 MNS : système plastique en jeu dans l'imitation et l'apprentissage

La découverte des neurones miroirs a naturellement invité les chercheurs à s'intéresser à l'imitation. Selon les théories classiques en neuropsychologie, la faculté d'imitation repose sur un processus associatif faisant le lien entre l'information reçue et l'information à exécuter, c'est-à-dire entre les systèmes sensoriel et moteur (Welford, 1968 et Massaro, 1990, cités par Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). Différentes études fournissent des données probantes en faveur de l'implication du MNS dans l'imitation (Heiser, Iacobini, Maeda, Marcus et Mazziotta, 2003 ; Rizzolatti et Cattaneo, 2009 ; Iacobini *et al.*, 2001, cités par Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). De ce fait, les partisans de la MSH reconsidèrent non seulement l'importance des

processus associatifs, mais affirment le rôle majeur des neurones miroirs dans l'imitation. Par définition le MNS *re-produit* en nous, en miroir, l'action de l'autre. Du fait de sa bidirectionnalité, il serait le système par excellence de l'imitation et en constitue le substrat neuronal (Arbib, 2005 ; Boulenger, 2006 ; Casile, Caggiano et Ferrari 2011 ; Cook, Bird, Catmur, Press et Heyes, 2014 ; Iacobini, 2009 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008 ; Rizzolatti, Cattaneo, Fabbri-Destro et Rozzi, 2014 ; Cook, Bird, Catmur, Press et Heyes, 2014). Le MNS est un système beaucoup plus rapide que tout autre processus. **Il suggère que les informations perçues sont directement codées en actes moteurs potentiels. Dès la réception du stimulus, le codage moteur est immédiat et simultané. Même sans mouvement moteur, le « cerveau agit »** (Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). On comprend ainsi comment les chercheurs ont entrevu un intérêt thérapeutique aux neurones miroirs en neuroréhabilitation motrice.

L'imitation est au cœur du développement psychomoteur et des apprentissages. En imitant les plus grands, les enfants apprennent à marcher, à utiliser une fourchette, à produire des sons, à parler *etc* (Behme, 2014 ; Boulenger, 2006 ; Casile *et al.*, 2011 ; Dumas, 2010 ; Grabski et Sato, 2014 ; Simpson *et al.*, 2014). Imiter, c'est *ap-prendre*, c'est-à-dire se saisir de l'exécution de l'autre pour *la prendre* et *la faire sienne*. Les propriétés bidirectionnelles du MNS répondent a priori parfaitement à cette dynamique d'appropriation (Rizzolatti et Cattaneo, 2009). Néanmoins, un paradoxe se dessine: si le MNS s'appuie sur le recrutement de patterns déjà existants lors de l'observation, comment expliquer qu'il puisse jouer un rôle dans l'apprentissage puisque par définition les patterns à recruter n'existent pas encore ? Autrement dit, comment envisager que le MNS puisse nous permettre de constituer notre répertoire moteur s'il repose sur la sollicitation de ce dernier ? Ce paradoxe est d'ailleurs relevé par les chercheurs les plus sceptiques quant aux théories sur le MNS (Hickok, 2015). Des travaux ont pourtant précocement répondu en proposant un cadre expérimental opposant des sujets experts à des sujets naïfs, dans l'observation de disciplines spécifiques telles que la danse ou la musique (Calvo-Merino *et al.*, 2005, cités par Boulenger, 2006 et par Rizzolatti et Sinigaglia, 2008 ; Haslinger *et al.*, 2006 ; Bangert *et al.*, 2006, cités par Molenberghs *et al.*, 2011). Les résultats conjoignent aux mêmes conclusions. L'observation d'un danseur ou d'un pianiste induit un recrutement chez tous les sujets, qu'ils soient experts ou non de cette discipline. Cependant, l'intensité de l'activité cérébrale est variable selon les deux groupes. Plus encore, **le degré d'activation du MNS est fonction du degré d'expertise et du**

répertoire moteur du sujet.

La variabilité du degré de résonance d'un individu à l'autre, suggère que **le MNS est plastique**. Dans une certaine mesure, notre MNS nous est propre puisqu'il est le reflet de nos expériences et de nos apprentissages (Casile *et al.*, 2011). Comme tout autre neurone, les neurones miroirs sont des candidats aux phénomènes plastiques tels que la neurogenèse*, la synaptogenèse* et la plasticité synaptique (Gili *et al.*, 2016 ; Small *et al.*, 2012 ; Small *et al.*, 2013). Toutes leurs propriétés fonctionnelles réunies, les neurones miroirs laissent entrevoir une formidable potentialité en réhabilitation des lésions vasculaires cérébrales.

1.3.3 MNS : un « langage » neuronal commun

Le MNS permet de *re-produire* et d'*ap-prendre* et apparaît ainsi comme le système de l'*inter-action*. **Grâce aux neurones miroirs, les actions des autres se réfléchissent et se manifestent dans notre propre substrat neuronal. Ils induisent une *inter-action*** (Bonini, 2016). Les actions des autres sont *incorporées*, au sens littéral du terme. Elles prennent forme en nous. Jeannerod (1994, cité par Rizzolatti et Arbib, 1998, par Boulenger, 2006 et par Rizzolatti et Sinigaglia, 2008) parle à ce titre d'une « représentation implicite des actions » de l'autre. La simple observation d'une action induit en moi une représentation motrice qui correspond à celle qui serait survenue si je n'avais pas été l'observateur mais l'agent de l'action. **Ce partage d'une activité neuronale commune est considérée comme une première forme de communication ; un « langage » neuronal commun.** Rizzolatti et Sinigaglia (2008) parlent du recrutement miroir comme d'une « communication au sens large ».

Le MNS peut être considéré comme un langage car il constitue un codage à un niveau abstrait. Les actions observées ou effectuées sont codées du point de vue de leur finalité (Casile *et al.*, 2011 ; Cook *et al.*, 2014 ; Gallese, 2008 ; Di Pellegrino *et al.*, 1992 et Gallese *et al.*, 1996, cités par Sale et Franceschini, 2012 ; Small *et al.*, 2012 ; Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Rizzolatti et Fogassi, 2014). «Qu'[on] le veuille ou non, les mouvements [de l'autre] acquièrent pour nous une signification immédiate » (Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). L'étude d'Umiltà et collaborateurs (2001, cités par Small *et al.*, 2012), apporte un argument intéressant en faveur de l'idée que les neurones miroirs nous donnent un accès direct à l'intention motrice de l'autre. L'équipe de chercheurs montre que même lorsque l'action est présentée partiellement, l'activation corticale en miroir est similaire à une situation où le

stimulus est intégralement perçu. Que l'action soit partielle ou complète, le même pattern sensorimoteur est recruté, dans un même degré de résonance. Dans quelles limites le MNS nous donne-t-il accès au sens des actions qui nous entourent ? Est-il recruté lorsque l'agent de l'action n'appartient pas à notre espèce ? Existe-t-il un langage neuronal inter-espèce ? Pour répondre à cette question, Buccino et collaborateurs (2004) proposent un paradigme expérimental très intéressant. Dans ce dernier, des hommes et des femmes sont confrontés à l'observation d'actions alimentaire et communicative, effectuées par trois agents de trois espèces différentes : un autre homme, un chien, un singe. Grâce à l'IRMf les auteurs comparent l'activité cérébrale des sujets lors des différents stimuli (Figure 4 p.XII). Ainsi, l'observation de l'action alimentaire recrute les mêmes zones corticales quelle que soit l'espèce de l'agent. L'observation des actions communicatives quant à elle induit des activations différentes selon l'espèce. BA44, est fortement recrutée lorsque les sujets observent un autre homme qui articule. Elle l'est plus faiblement face à un singe qui claque les lèvres et elle n'est pas sollicitée devant un chien qui aboie. En effet, contrairement à l'action alimentaire qui est relativement proche d'une espèce à l'autre, les actions communicatives se manifestent différemment. Claquer des lèvres et aboyer ne fait pas partie de notre « vocabulaire d'actes » et ne recrute donc a priori pas notre MNS (Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). L'ensemble de ces données apportent des éléments en faveur de l'hypothèse selon laquelle le MNS est un système de codage du sens et non des différents paramètres contextuels de l'action. Si le sens de l'action fait partie du patrimoine moteur de l'observant alors le MNS est d'autant plus recruté. Même si l'observation d'un chien qui aboie n'active pas nos neurones miroirs, cela ne sous-entend pas que nous ne sommes pas capables d'accéder au sens de cet acte. En effet, contrairement à ce qu'affirment certains auteurs critiques (Hickok, 2015), les études sur les neurones miroirs ne revendiquent pas la prépondérance absolue cognitive du MNS. **Le MNS n'est pas le système de compréhension exclusif. Il n'est qu'une modalité de compréhension. Grâce au MNS nous avons un accès direct à une représentation sensorimotrice, mais il ne faut pas négliger l'accès au sens des choses par un processus plus indirect relevant d'une construction mentale et cognitive** (De la Rosa et Bühlhoff, 2014 ; Gallese et Sinigaglia, 2014 ; Glenberg, 2015b ; Kemmerer, 2014 ; Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Rizzolatti et Fogassi, 2004 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008 ; Rizzolatti, 2014 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2016).

1.4 Perspectives thérapeutiques issues de l'exploitation du MNS

1.4.1 *Perspectives thérapeutiques en psychopathologie*

Selon le neuroscientifique de renom Ramachandran, célèbre pour sa « Thérapie miroir » et pour avoir vulgarisé les théories du MNS en cognition sociale : « la découverte des neurones miroirs est à la psychologie ce qu'est celle de l'ADN à la biologie : les neurones miroirs fournissent un système unifié et contribuent à la compréhension de nombreuses facultés cognitives, jusqu'alors mystérieuses et inaccessibles aux expérimentations actuelles »³ (Ramachandran, 2000, cité par Glenberg, 2015a). D'après ce chercheur, **les neurones miroirs sont les neurones du rapport à l'autre. Ils constituent un système interpersonnel et d'interaction avec nos semblables**. Plus encore, si notre enveloppe corporelle et ses récepteurs n'existaient pas nous ne serions pas en simple *résonance* avec l'autre, mais dans la plus grande *confusion*. En effet, nous ne ferions probablement pas la part des choses entre nos propres actions et celles des autres. La conscience de notre corps et le système sensoriel qui la rend possible, induit un feed-back nous permettant d'établir une frontière entre soi et les autres (Ramachandran, 2009 ; Ramachandran, 2011 ; Case, Pineda et Ramachandran, 2015). Pour de nombreux auteurs, **le MNS serait au cœur de l'intersubjectivité et à l'origine de la faculté d'empathie*** (Case *et al.*, 2015 ; Chen et Yuan, 2008 ; Dinstein *et al.*, 2008 ; Gazzola, Aziz-Zadeh et Keysers, 2006 ; Iacobini et Dapretto, 2006 ; Sale et Franceschini, 2012 ; Stern et Gallese, 2015 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2016). Du latin *ex*, « qui vient de » et *movere*, « mouvement », l'émotion est une mise en mouvement et ne s'oppose pas, comme on pourrait le penser de prime abord au système moteur (Rizzolatti et Sinigaglia, 2016). Des études montrent des processus miroirs lors de l'observation d'émotions d'autres sujets dans l'insula, un lobe cortical reconnu pour son rôle dans les processus émotionnels (Wicker *et al.*, 2003, cités par Rizzolatti et Sinigaglia, 2016). Situé dans la scissure de Sylvius, sous l'IFG, il est d'ailleurs anatomiquement très proche de BA44 (Figure 2 p.X). Certains parlent même de système miroir limbique (Mathon, 2013 ; Rizzolatti et Cattaneo, 2009). **La découverte des neurones miroirs donne une nouvelle dimension à la célèbre théorie des sciences cognitives : la Théorie de l'esprit*** (Buccino, 2014 ; Iacobini et Dapretto, 2006 ; Mathon, 2013 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2016). Les neurones miroirs en constitueraient le substrat neuronal. Ils nous dotent d'une « capacité à se représenter les états

3 Traduction librement proposée

mentaux d'autrui » (Boulenger, 2006), et permettent une « résonance émotionnelle » avec l'autre (Rizzolatti et Sinigaglia, 2008).

L'articulation des neurones miroirs à la cognition sociale a ouvert de nombreuses perspectives en psychopathologie. Les troubles du spectre autistique (TSA) et la schizophrénie sont les deux atteintes neuropsychiatriques particulièrement étudiées au regard du MNS. Plusieurs auteurs proposent l'hypothèse selon laquelle elles seraient dues à un dysfonctionnement du MNS (Brown et Brüne, 2014 ; Williams *et al.*, 2001, cités Disntein *et al.*, 2008 ; Iacobini et Dapretto, 2006 ; Mathon, 2013 ; Hadjikhani *et al.*, cités par Rizzolatti et Cattaneo, 2009 ; Rizzolatti *et al.*, 2013). Une étude montre par exemple chez des enfants porteurs de TSA, un défaut d'activation du MNS et de BA44 lors de l'observation d'émotions chez un tiers (Iacobini et Dapretto, 2006). Une autre identifie une minceur anormale de la substance grise des zones relevant du MNS (Hadjikhani *et al.*, 2006, cités par Mathon, 2013). Des observations similaires existent sur la schizophrénie et posent le déficit du mécanisme miroir comme étant à l'origine de certains symptômes (Chen et Yuan, 2008 ; Kato *et al.*, 2011 et Enticott *et al.*, 2008, cités par Mathon, 2013).

1.4.2 Perspectives thérapeutiques en réhabilitation motrice

1.4.2.1 "Action Observation Therapy" (AOT) et facilitation

Il existe une hétérogénéité dans la terminologie des approches thérapeutiques exploitant les propriétés fonctionnelles des neurones miroirs. Certains auteurs parlent de "Mirror Therapy", d' "Action-Observation Therapy" (AOT) ou encore d' "Action-Observation Treatment" (Boulenger, 2006 ; Buccino, 2014 ; Case *et al.*, 2015 ; Ertelt et Binkofski, 2012 ; Small *et al.*, 2012 ; Sale et Franceschini., 2012 ; Small *et al.*, 2013). Pourtant le principe de stimulation est le même : il repose sur l'observation d'actions. Selon les protocoles expérimentaux et thérapeutiques, les actions peuvent être présentées réellement par l'observation d'une tierce personne ou virtuellement par le visionnage de clips vidéos. En réhabilitation motrice, l'enjeu thérapeutique est de stimuler le MNS en activant directement des patterns sensorimoteurs dont l'exécution est altérée. Cette approche novatrice s'oppose aux techniques thérapeutiques classiques de type *bottom-up* (*i.e.* de bas vers le haut) qui aspirent à réorganiser le cerveau par l'exécution concrète et les exercices physiques. À l'inverse l'AOT est de type *top-down* (*i.e.* du haut vers le bas) car elle vise directement la stimulation des aires corticales motrices et prémotrices (Arya, 2016). **Selon plusieurs auteurs, l'avenir de la**

neuroréhabilitation motrice se trouve dans l'intérêt de combiner ces deux approches (Ertelt et Binkofski, 2012 ; Mathon, 2013 ; Sale et Franceschini, 2012 ; Varley, 2011).

Les mécanismes de récupération et de réorganisation cérébrales via AOT reposent sur le principe de facilitation synaptique. Le temps d'observation initie un mécanisme plastique de l'activité synaptique. Sur le plan neurophysiologique, les neurones miroirs concernés par la stimulation vont décharger des potentiels d'action. Lors de l'exécution subséquente, ces mêmes neurones sont recrutés et déchargent un nouveau train de potentiels d'action. Lorsque deux trains de potentiels d'action surviennent entre deux neurones, la force synaptique s'accroît ; l'interaction entre les cellules est renforcée (Purves *et al.*, 2011, chp8). Ainsi, la sollicitation du MNS par l'observation d'une action en facilite la production motrice (Ertel et Binkofski, 2012). Différentes études montrent qu'à l'inverse, lorsque l'acte observé diffère de l'action à réaliser, la production motrice n'est non seulement pas facilitée, mais elle est parasitée (Brass *et al.*, 2000 et Castielle *et al.*, 2002, cités par Boulenger, 2006 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2016).

1.4.2.2 *Traitement des hémiparésies et des hémiplegies*

Ces dernières années, des études sur des cohortes de plus en plus importantes ont présenté l'efficacité significative de l'AOT en rééducation de l'hémiplégie et de l'hémiparésie post-AVC, y compris pour des cas sévères (Arya, 2016 ; Garrisson, Winstein et Aziz-Zadeh, 2010 ; Lebon, Guillot, Collet et Papaxanthis, 2015). Des études avec IRMf sur plusieurs dizaines de sujets ont mis en évidence un **phénomène plastique de récupération au niveau cortical** (Simis *et al.*, 2013, cités par Arya, 2016 ; Michielsen *et al.*, 2011, cités par Sale et Franceschini, 2012). Aussi, des expérimentations avec EEG et MEG montrent une **activation croissante des muscles des membres paralysés stimulés par AOT**, sur toute la durée du traitement (Arya, 2016). Enfin, deux études comportementales sur des cohortes de 28 puis 102 sujets témoignent d'une amélioration significative de la qualité des gestes des patients hémiplégiques ayant été stimulés par AOT (Franceschini *et al.*, 2010 et 2012, cités par Sale et Franceschini, 2012). Une expérimentation montre sur 8 sujets que l'AOT, combinée à l'entraînement physique, accroît les effets de la réhabilitation motrice, en permettant la formation de nouveaux souvenirs moteurs (Celnik *et al.*, 2008, cités par Sale et Franceschini, 2012).

Malgré ces résultats très encourageants, l'AOT est encore source de controverses. En France par exemple, l'HAS mentionne la thérapie miroir sans être en mesure de pouvoir la

recommander officiellement. D'après elle, le maintien dans le temps des effets bénéfiques de l'AOT fait débat (Sionneau *et al.*, 2011 cités par Haute Autorité de Santé, 2012). Une revue récente indique que la difficulté d'application de cette dernière en clinique tient à l'absence d'harmonisation des protocoles expérimentaux, notamment en termes d'intensité et de durée (Berquin, Thomas, Behrmann et Heeger, 2015). La tâche des recherches futures sera de proposer des modalités de stimulation optimales et de les établir scientifiquement (Sale et Franceschini, 2012).

1.4.2.3 *Traitement des douleurs fantômes et SDRC*

Les neurones miroirs sont surtout connus du grand public pour leur exploitation dans le cadre du traitement des membres fantômes. Ces derniers désignent des membres amputés dont le sujet ressent toujours l'existence. Les sensations peuvent être très douloureuses. En 1996, Ramachandran et son équipe développe la thérapie miroir (Arya, 2016 ; Buccino, 2014). Elle entre aujourd'hui, quoi-qu'encore marginalement, dans le traitement des syndromes douloureux complexes (SDRC). Les douleurs des membres fantômes et des SDRC s'expliqueraient par un conflit entre les afférences et les efférences (*i.e.* entre les informations sensorielles et l'intention motrice). Dans le cas d'une amputation, la discordance est due au fait que malgré la disparition du membre, le territoire cortical qui lui est dédié demeure et se trouve parasité par les zones adjacentes. Ces inférences créent des discordances et provoquent des douleurs aiguës. **La thérapie miroir se propose de rétablir une harmonie en bernant le cerveau par une expérience de réalité virtuelle.** Un miroir est placé sur un plan sagittal opposant le membre amputé au membre controlatéral. Le patient est invité à mobiliser son membre sain tout en observant dans le miroir le reflet créé. Le côté sain est ainsi dédoublé et le patient a l'illusion de deux membres intègres de telles sortes que l'intention motrice n'entre plus en discordance avec le feed-back visuel. Au contraire la nouvelle afférence visuelle va permettre de réintégrer le membre absent ou lésé au schéma corporel. Les neurones miroirs recrutés dans les actions du membre amputé sont activés et les inférences des zones adjacentes amoindries. Ce traitement est d'ailleurs parfois appelé "*Mirror visual feedback*" (Buccino, 2014 ; Berquin *et al.*, 2015).

1.4.2.4 *Traitement des paralysies faciales périphériques*

Directement dans le champ des compétences orthophoniques, la thérapie miroir est récemment investie dans le traitement des paralysies faciales périphériques (PFP).

L'exploitation de cet « effet miroir » est notamment due en France à deux orthophonistes : Blanchin (Blanchin, Martin et Labbe, 2013) et Martin (2015). Le principe de réhabilitation du visage repose sur le même principe d'illusion visuelle et de dédoublement. Le sujet fait face à un écran sur lequel est projeté son visage, comme dans un miroir. L'hémiface saine du patient est dédoublée de manière à recomposer un visage sain et fonctionnel. Ainsi lors des exercices pratiques, le sujet observe son visage reconstitué en temps réel (Figure 5 p.XII) (Blanchin, Martin et Labbe., 2013 ; Martin, 2015). D'un point de vue psychologique, cette stimulation a pour vertu de permettre un feed-back visuel positif. Les patients ne sont pas confrontés à leur déficit mais au contraire, l'intégrité de leur visage est virtuellement rétablie (Martin, 2015). Les traitements expérimentaux des PFP par « effet miroir » sont encore très peu nombreux. Notre revue n'a mis en évidence qu'une seule étude sur le sujet dont les résultats sont très encourageants. Les 13 participants ayant bénéficié du protocole visant à recruter le MNS ont vu une amélioration significative de leur côté paralysé en termes d'amplitude de mouvement, de tonicité et de symétrie, par rapport aux sujets stimulés par une prise en charge orthophonique classique (Blanchin, Martin et Labbe, 2013).

2 PROBLEMATIQUE : EXPLOITATION DES NEURONES MIROIRS EN REHABILITATION DE L'APHASIE POST-AVC

La dynamique de notre revue vers des mouvements de plus en plus fins et de plus en plus élaborés ne suit pas rigoureusement une logique chronologique. Elle propose une perspective orthophonique aux différents travaux sur le MNS. Après les actions du corps, celles de ses membres, celles de la face, nous allons désormais nous intéresser à la bouche, et à la parole puis au langage. Malgré son niveau d'abstraction, grâce aux neurones miroirs, ce dernier est beaucoup intriqué au système moteur qu'on ne l'imagine.

2.1 Neurones miroirs , action orales et articulaires

2.1.1 *Données de l'imagerie neurofonctionnelle*

Une des premières publications sur le MNS et les actions de la bouche est celle de Buccino et collaborateurs (Buccino *et al.*, 2001). Les auteurs ont comparé, l'activité corticale de 12 sujets sains lors de l'observation d'actions de trois effecteurs différents : le pied, la main et la bouche. **Les données d'IRMf révèlent une caractéristique essentielle du MNS ; il est organisé somatotopiquement*. Cela indique qu'à chaque effecteur, correspond un territoire aux propriétés miroirs privilégié** (Figure 6 p.XIII) (Buccino *et al.*, 2001 ; Tettamanti *et al.*, 2005 ; Cappa et Pulvermüller, 2012).

Dans la continuité de cette recherche, Ferrari et collaborateurs (Ferrari, Gallese, Rizzolatti et Fogassi, 2003) étudient sur des singes la réponse des neurones miroirs sur des actions exclusivement orales. Les résultats des IRMf déterminent que plus de 80% des neurones miroirs de l'aire F5 du primate sont des «neurones miroirs transitifs de la bouche ». La plupart d'entre eux codent des actions alimentaires (*e.g.* mastiquer, lécher, croquer, sucer), mais environ 15% d'entre eux sont spécifiques des actions orales ayant une intention communicative. Comme vu précédemment, les singes peuvent communiquer avec leurs pairs en claquant la langue ou les lèvres (Ferrari *et al.*, 2003 ; Buccino *et al.*, 2004). En introduisant la dimension communicative du MNS, les travaux de l'équipe de Rizzolatti inaugurent d'une certaine manière la recherche sur le lien entre le MNS et le langage. L'expérimentation de l'équipe de Buccino (Buccino *et al.* 2004), déjà présentée, met en évidence chez l'homme le

recrutement du MNS face à l'observation de la parole. Même en modalité visuelle seule, BA44, traditionnelle présentée comme le centre de la production de la parole, est recrutée (Figure 4 p.XII). **Les différents travaux en neuroimagerie concluent unanimement à l'implication des neurones miroirs dans la parole humaine.** Cependant, ils divergent encore sur un point. Watkins et Paus (2004) observent un recrutement spécifique de BA44 dans l'HG, tandis que l'équipe de Mashal montrent une activation bilatérale du MNS (Mashal, Solodkin, Dick, Chen et Small, 2012).

2.1.2 *Données des études électrophysiologiques*

Des études électrophysiologiques ont investigué l'activité électrique de la langue et des lèvres lors de la perception de la parole. Les résultats convergent avec les études en INF et observent une activation des articulateurs *en miroir* avec celui qui parle. L'étude de l'équipe de Fadiga (Fadiga, Craighero, Buccino et Rizzolatti, 2002) s'est intéressée à la plus petite unité sonore de la parole, le phonème. Une dizaine de sujets sont invités à écouter différents stimuli. Les PEMs enregistrés montrent que l'activité motrice de la langue est beaucoup importante lors de l'écoute de mots comprenant un phonème lingual (*e.g.* [r]), plutôt que lors de mots comprenant un phonème labio-dental (*e.g.* [f]). Ainsi, les chercheurs concluent que la perception des sons de la parole active en miroir les zones motrices qui sont impliquées dans leur production. De surcroît, l'équipe italienne fait un constat majeur. Dans une situation contrôle où les sujets entendent des pseudo-mots* avec un phonème lingual, les PEMs linguaux sont moins amples que lors de l'écoute des mots. Les auteurs font l'hypothèse que **le recrutement du MNS est facilité par le contexte linguistique. Le matériel linguistique induirait chez les participants un degré de résonance supérieur** (Fadiga *et al.*, 2002).

L'étude de Watkins Strafella et Paus (2003) confirment les travaux précités en étudiant les PEMs des muscles des lèvres. Ceux-ci sont comparés aux PEMs de la main droite. L'activité électrique des lèvres augmente significativement par rapport à celle de la main lors de l'observation de l'articulation de la parole, et lors de l'écoute de mots. Les données de cette étude exposent deux conclusions. Premièrement **la réception de la parole recrute en miroir le cortex moteur. Secondement, le MNS répond aux stimulations verbales, aussi bien visuelles qu'auditives.** Plus récemment, une équipe japonaise propose une étude aux résultats similaires (Murakami *et al.*, 2011).

2.1.3 *Perspectives thérapeutiques du MNS sur la parole*

Puisque les études s'accordent à démontrer l'implication du MNS dans le cadre des actions oro-faciales et de la parole, il est pertinent de chercher à évaluer si l'observation de la parole peut en influencer la production. Cependant, peu d'études s'intéressent à cette question et encore moins dans une perspective thérapeutique.

Une équipe de chercheurs publie deux expérimentations successives ayant pour but d'apprécier si l'observation de la parole en facilite la production (Jarick et Jones, 2008 ; Jarick et Jones, 2009). Celles-ci sont menées auprès de sujets sans trouble neurologique. La première étude présente plusieurs biais méthodologiques et ne vérifie pas l'hypothèse expérimentale (Jarick et Jones, 2008). La seconde, repense le protocole et les résultats sont beaucoup plus encourageants (Jarick et Jones, 2009). Les participants observent par vidéos des locuteurs produire des syllabes ou différents gestes oraux et sont invités à les reproduire oralement ou à les identifier en cliquant manuellement sur un bouton. Les résultats indiquent une rapidité de traitement significative lorsque les sujets répondent par la modalité verbale plutôt que manuelle. Les auteurs en concluent à un principe de facilitation neurobiologique. **Grâce au recrutement des neurones miroirs lors de l'observation de la production de syllabes, leur production s'en trouve amorcée.** En outre, Jarick et Jones (2009) constatent que cette facilitation est d'autant plus grande que la syllabe observée est antérieure et donc visible. Par exemple, la reproduction de la syllabe [ba] (effectuée par les lèvres) s'effectue dans un délai plus rapide que celle de la syllabe [ga] (effectuée par la base de langue).

Ces travaux ouvrent des perspectives thérapeutiques certaines pour la prise en charge des troubles acquis de l'articulation et de la parole tels que l'apraxie bucco-faciale* et les *Motor Speech Disorders* (MSDs). Les MSDs désignent les troubles neurologiques affectant la planification, la programmation, le contrôle ou l'exécution de la parole. Ils regroupent l'apraxie de la parole*; la dysarthrie* et l'anarthrie*, qui peuvent d'ailleurs être associées à une aphasie (Duffy, 2013 ; Pinto et Sato, 2016, chp.20). À notre connaissance, une seule étude porte sur l'exploitation du MNS dans le traitement des troubles arthriques acquis. Il s'agit d'un mémoire de fin d'études en logopédie non publié, sur la dysarthrie hypokinétique (Baruffa, 2013). L'objectif de l'auteur est d'apprécier si l'observation de syllabes peut améliorer la parole d'une personne dysarthrique. Les effets de la stimulation sont évalués par un test d'intelligibilité en double aveugle et par la mesure de paramètres cinématiques* dont l'amplitude des mouvements labiaux et le degré d'aperture labiale. Malheureusement, les

résultats ne vérifient pas les hypothèses expérimentales, mais plusieurs limites méthodologiques peuvent être mises en évidence. Tout d'abord, l'étude porte sur 13 sujets dont 12 sans trouble neurologique, et 1 dysarthrique. L'auteur attend des effets chez les deux types de participants. La pertinence de stimuler une parole fonctionnelle chez des sujets sains se pose. Peut-on réellement attendre une modification de certains paramètres articulatoires chez des sujets sans déficit d'intelligibilité ? Aussi, le protocole expérimental ne repose pas sur une stimulation intensive et répétitive. Au contraire, une seule session est proposée. Pourtant, l'importance de l'intensivité des stimulations en neuroréhabilitation n'est plus à démontrer (Bhogal, Teasell, Speechley et Albert, 2003 ; Marangolo *et al.*, 2012). De plus, les personnes dysarthriques sont des sujets très fatigables, dont la qualité de la parole peut fluctuer. Il aurait donc été intéressant de construire un protocole avec de multiples évaluations. Enfin, l'outil de mesure présente lui-même des limites. Il s'agit pourtant d'un procédé original : la « Codamotion ». Il s'agit d'une technique en 3D d'analyse du mouvement qui enregistre le déplacement de différents capteurs disposés sur le visage et qui les analyse informatiquement. Pour mesurer l'évolution de l'aperture labiale, l'auteur a donc disposé les capteurs autour des lèvres. Comme le souligne Baruffa (2013), les capteurs pourraient avoir constitué une gêne physique qui biaise les résultats. L'hypothèse expérimentale de facilitation de la parole par l'observation n'est vérifiée ni chez les sujets sains, ni chez le patient dysarthrique. Néanmoins, cette étude inaugure l'intérêt des neurones miroirs en neuroréhabilitation de la parole et du langage en orthophonie.

2.2 Intrication des systèmes linguistique et moteur

2.2.1 *Arguments anthropologique, phylogénétique et développemental*

La parole est une manifestation motrice du langage et est par nature sensorimotrice. Elle repose sur un système d'exécution motrice et peut être mesurée par des paramètres physiques (*e.g.* acoustiques, anatomiques, et cinématiques*) (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010 ; Pinto et Sato, 2016, chp.6). Bien que le langage soit une des fonctions les plus élaborées et complexes de notre système cognitif (Lambert, 2008), il ne peut être isolé du système moteur. Action et langage ne sont pas deux modules indépendants, bien au contraire. Cet antagonisme traditionnel entre l'action et le langage est tributaire du dualisme opposant le

corps et l'esprit et de l'héritage des modèles anatomo-fonctionnels et localisationnistes* du XIXème siècle (Pinto et Sato, 2016, chp11 ; Pulvermüller, 2005 ; Pulvermüller *et al.*, 2014 ; Varley, 2011). Celui-ci apparaît aujourd'hui dépassé. Le langage est tout sauf désincarné puisqu'il se réalise par des actes moteurs. Le langage oral suppose l'acte de parler, et le langage écrit suppose celui d'écrire.

Depuis la découverte des neurones miroirs, le lien entre le système moteur et le langage est plus que jamais revendiqué. Avec la MSH l'équipe de Rizzolatti donne une nouvelle dimension à la "*Gestural theory*" (Corballis, 2009). Il s'agit de l'hypothèse d'une origine motrice du langage, héritée des travaux du philosophe Condillac. Elle propose un **principe de filiation entre l'action et le langage**. L'émergence du langage chez l'*Homo Sapiens Sapiens*, il y a 170 000 ans environ, aurait une origine gestuelle (Arbib, 2013 ; Cook *et al.*, 2014 ; Corballis, 2009 ; Gentilucci et Corballis, 2006 ; MacNeilage, 1997 et Paget, 1963, cités par Rizzolatti et Arbib, 1998 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008). Cette théorie phylogénétique de l'évolution de la communication gestuelle vers la communication verbale explique que les premières formes d'échange étaient principalement basées sur des gestes. Le passage à la bipédie et la naissance de l'*Homo erectus* a permis une libération des membres supérieurs permettant le développement des gestes brachiaux et manuels. Puis des gestes faciaux et oropharyngolaryngés se sont affinés pour libérer les mains de la communication et les consacrer à de nouvelles activités plus élaborées. La communication verbale et le code des cris sont nés et permettent d'échanger avec des pairs à distance sans même les voir. Il s'agit là d'une première forme de langage que Corballis appelle « protolangage » (Arbib, 2005 ; Corballis, 2009 ; Daviet *et al.*, 2007 ; Gentilucci et Corballis, 2006 ; Kühn et Brass, 2008 ; Rizzolatti et Arbib, 1998). La filiation entre les gestes et le langage expliquerait pourquoi dans toutes les cultures humaines, sans exception, le langage oral s'accompagne de gestes co-verbaux essentiellement manuels et faciaux. Il s'agirait là de la résultante anthropologique de notre communication proprement gestuelle (Boulenger, 2006).

Sur le plan anatomique, la proximité entre la main et la bouche se confirme. Chez le singe, la zone corticale F5 se compose de deux parties : une partie dorsale principalement impliquée dans les mouvements des mains et une partie ventrale surtout rattachée aux mouvements oraux (*i.e.* aux mouvements de la bouche et du larynx) (Gentilucci *et al.*, 1988, cités par Ferrari *et al.*, 2003 ; Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Sale et Franceschini, 2012). Les auteurs établissent une relative homologie anatomique et fonctionnelle entre la zone F5

gauche du singe et l'aire B44 gauche de l'homme (Figure 1 p.IX). Bien sûr, F5 n'est pas plus l'ancêtre de BA44 que le singe n'est l'ancêtre de l'homme, mais ces deux zones sont anthropologiquement parentes. **Bien que traditionnellement associée à la production du langage, l'aire de Broca contient aussi des représentations sensorimotrices de la main** (Arbib, 2005 ; Rizzolatti et Arbib, 1998 ; Uozimi *et al.* 2004, cités par Boulenger, 2006 ; Cappa et Pulvermüller, 2012 ; Rizzolatti et Craighero, 2004). L'Homunculus de Penfield et Ramussen montre à quel point les aires de la main et de la bouche sont voisines (Penfield et Ramussen 1950, cités par Pulvermüller, 2005).

À l'échelle de l'humanité, la latéralisation privilégiée du langage dans l'HG pourrait être la résultante d'une latéralisation manuelle préférentiellement droite (Rizzolatti et Arbib, 1998). À l'échelle de l'individu, le développement du système moteur n'est pas sans conséquence sur celui du langage. L'acquisition des compétences psychomotrices et la mise en place du langage oral sont intrinsèquement corrélées (Goldwin-Meadow, 1998 cité par Boulenger, 2006 ; Bullinger, 2007 ; Grabski et Sato, 2014 ; Pulvermüller, 2005 ; Pulvermüller *et al.*, 2014). « **Une co-structuration des systèmes sensoriels et moteurs de la parole est postulée dès les premières années de vie, notamment du fait de mécanismes exploratoires, imitatifs et d'apprentissage sensorimoteur lors des phases de babillage et d'acquisition des premiers mots chez l'enfant** » (Grabski et Sato, 2014). Enfin, chez le sujet adulte l'intrication entre le langage et le système moteur manuel persiste : « la production de geste affecte la production linguistique », comme nous allons le présenter (Boulenger, 2006).

2.2.2 *Arguments des études expérimentales*

2.2.2.1 *Lien entre la main et la bouche*

Plusieurs études explorent l'influence réciproque du système moteur, et plus spécifiquement les gestes manuels, sur la parole. Dès 1996, une étude (Rausher *et al.*, 1996, cités par Boulenger, 2006) montre que, soumis à l'interdiction de produire des mouvements des mains lors d'un récit oral, les sujets présentent une fluence plus réduite que dans la situation où ils n'ont pas de contrainte motrice. En 2001, Gentilucci et son équipe (cités par Rizzolatti et Craighero, 2004) débutent une série d'études qui contribuent largement à l'état des connaissances actuelles sur les neurones miroirs. L'objectif des chercheurs est d'éprouver l'hypothèse de la **connexion étroite entre la main et les organes de la parole**. Dans une première expérimentation, les participants sont invités à saisir des objets soit petits soit grands

tout en ouvrant simultanément la bouche. L'analyse de différents paramètres cinématiques dont l'amplitude du mouvement des mains et le degré d'aperture des lèvres permet de mettre en évidence un phénomène de corrélation : plus les objets à saisir sont grands et plus l'aperture labiale est grande. Les auteurs ont rajouté une dimension vocale à leur étude, en demandant aux participants non plus d'ouvrir la bouche, mais de produire une syllabe précise, lors de la saisie manuelle d'objets. Les résultats confirment les observations précédentes. Grâce à une analyse spectrographique*, les auteurs objectivent que l'intensité de la production verbale est positivement corrélée à la taille de l'objet saisi. Autrement dit, plus l'objet saisi est large, et plus la syllabe est prononcée avec une voix forte, et inversement. Les deux gestes s'influencent mutuellement (Gentilucci *et al.*, 2001, cités par Rizzolatti et Craighero, 2004).

Par la suite, Bernardis et Gentilucci (2006) demandent à 28 participants de prononcer des mots en exécutant des actions manuelles. Une dimension linguistique apparaît mais les productions sont toujours évaluées sur un plan acoustique. Les auteurs s'intéressent à **l'influence de la stimulation du système moteur sur la parole**, et non encore sur le langage. Les résultats confirment ceux de 2001 (Gentilucci *et al.*, 2001). Le geste renforce la parole et la parole inhibe le geste. L'action manuelle amplifie la phonation et inversement la phonation atténue l'amplitude des mouvements des mains. Selon les auteurs, cela s'explique tout d'abord, par le fait que le développement de la communication orale s'est fait au détriment de l'échange non verbal. *L'Homo erectus* a en partie libéré ses mains de la communication pour les consacrer à d'autres activités. En outre, l'amplification de la voix, lorsqu'elle est accompagnée de gestes, s'explique par le fait que l'usage des mains nous sert généralement à illustrer et à renforcer notre message. L'intervention des mains vient soutenir l'information verbale qui doit être entendue par notre interlocuteur. Plusieurs études successives plus récentes d'une équipe grecque viendront confirmer les résultats de l'équipe italienne (Vainio, Tiainen, Tiippana, et Vainio, 2014 ; Vainio, Tiainen, Tiippana, Komeilipoor, et Vainio, 2015 ; Tiainen *et al.*, 2016 ; Tiainen, Tiippana, Vainio, Komeilipoor et Vainio, 2017).

Quel lien établir entre ces travaux et le MNS ? Dans la deuxième partie de leur expérimentation, Bernardis et Gentilucci (2006) montrent que **ce jeu d'influence entre action et parole s'observe aussi dans une situation où les gestes ne sont plus produits par celui qui parle, mais par quelqu'un d'autre**. L'étude ouvre ainsi une perspective nouvelle. Grâce au MNS, la stimulation du système moteur par l'observation d'actions des mains, pourrait influencer les productions orales. Notre revue n'a pu mettre en évidence aucune

expérimentation testant cette hypothèse. Outre la parole, qu'en est-il du langage ? Est-il possible d'influencer les compétences langagières en stimulant le système moteur via les neurones miroirs ?

2.2.2.2 *Le lien entre l'action et le langage*

Une étude s'intéresse à l'intérêt de la stimulation du système moteur sur les troubles aphasiques (Meizer *et al.*, 2011). L'expérimentation porte sur 20 sujets atteints d'une aphasie non fluente. L'objectif des chercheurs est d'évaluer les capacités linguistiques des patients dans deux contextes moteurs différents que sont la station assise et la station debout. Les résultats montrent que l'accès au stock lexical, et plus spécifiquement la capacité d'autocorrection en tâche de dénomination orale, est significativement meilleure lorsque les sujets sont debout plutôt qu'assis. Cette publication envisage ainsi, les **perspectives thérapeutiques d'une stimulation du système moteur dans la récupération des troubles du langage oral acquis** (Meizer *et al.*, 2011).

Plusieurs auteurs formulent l'hypothèse selon laquelle **la gestualité et le langage ne formeraient qu'un seul et même système avec un substrat neuronal commun** (Ahlsén, 2008 ; Bonifazi *et al.*, 2013 ; Gallese et Lakoff, 2005). Sur ce sujet, la publication de Pulvermüller (2005) apparaît comme une revue de référence très largement citée dans la littérature. D'après Pulvermüller, **les mots d'actions et les actions elles-mêmes sont étroitement intriqués. La représentation conceptuelle du verbe n'est pas si abstraite que ce que l'on pourrait penser de prime abord. Elle est incarnée dans sa représentation sensorimotrice**. Plus encore, Pulvermüller (2005) montre que les représentations sémantiques des verbes recrutent de manière somatotopique* le cortex sensorimoteur. Lorsqu'un sujet produit un verbe évoquant la jambe, le cortex moteur des représentations de la jambe est recruté. Si le verbe évoque la main ou le visage, les représentations sensorimotrices de la main et du visage seront respectivement recrutées (Figure 7 p.XIV). En somme, le chercheur met en évidence une **activation simultanée des aires du langage, et du programme sensorimoteur du verbe évoqué**. Dans cette perspective, lui et son équipe formulent l'hypothèse de l'existence d'une **somatotopie* sémantique ; le sens des mots est incarné par des représentations sensorimotrices** (voir paragraphe 3.3.2) (Hauk, Johnsrude et Pulvermüller, 2004 ; Pulvermüller, 2005).

La notion de somatotopie* sémantique nourrit la "*Gestural theory*" et renforce les théories anthropologiques, phylogénétiques et développementales mentionnées plus haut (voir

paragraphe 2.2.1). Cependant, quel est le lien avec la MSH ? L'articulation de l'hypothèse d'un réseau sémantique multimodal et des propriétés fonctionnelles des neurones miroirs laisse entrevoir une approche thérapeutique inédite en réhabilitation de l'aphasie. En effet, selon de nombreux auteurs, l'activation de la représentation sémantique d'un mot d'action via la stimulation motrice (*i.e.* par exécution ou l'observation d'action) en faciliterait l'accès par la modalité verbale. L'AOT aurait une portée plus large qu'en réhabilitation motrice et pourrait être utilisée en réhabilitation des troubles aphasiques pour stimuler l'accès au stock lexical verbal. **L'intérêt de l'AOT en aphasiologie repose sur la multimodalité. Plutôt qu'une thérapie traditionnelle de l'aphasie qui cible de manière isolée le déficit linguistique, une thérapie qui exploite les neurones miroirs pourrait permettre une stimulation plus globale** (Chen et Yuan, 2008 ; Lee, Fowler, Rodney, Cherney et Small, 2010 ; Mathon, 2013 ; Meinzer *et al.*, 2011; Pulvermüller et Berthier, 2008). Cette approche sensorimotrice rejoint les théories de Duffy qui dès 1995 (cité par Small *et al.*, 2012) suggérait l'intérêt de l'imitation et de l'approche visuomotrice dans la prise en charge de l'aphasie.

L'étude d'Arya et Pandian (2014) est peu citée dans la littérature. Néanmoins, elle est emblématique de différents aspects de l'état de la recherche sur l'exploitation des neurones miroirs en neuroréhabilitation de l'aphasie. Malgré sa date de publication relativement contemporaine, cette étude permet notamment d'illustrer que la recherche en est encore à ses débuts. La publication d'Arya et Pandian (2014) est une étude de cas unique consécutive à un protocole expérimental de neuroréhabilitation motrice du membre supérieur par thérapie miroir (Arya et Pandian, 2013, cités par Arya et Pandian, 2014). Les auteurs ont observé de manière impromptue des répercussions positives de la stimulation sur les compétences linguistiques. Le sujet de l'étude est atteint d'une hémiparésie droite et d'une aphasie chronique de type Broca*. Ce patient avait effectué une dizaine de séances d'orthophonie classique sans qu'aucune amélioration du langage n'ait pu être constatée. Pourtant, à l'issue du protocole intensif moteur de 45 séances pendant 3 mois (soit environ 3 à 4 séances par semaine), les productions langagières en conversation spontanée et en situations plus dirigées (*e.g.* en tâche de dénomination) sont meilleures. Selon les chercheurs, **la stimulation du MNS du membre supérieur et de BA44 via la thérapie miroir pourrait être à l'origine de cette diminution des troubles aphasiques**. Aucune prétention scientifique n'est faite de la part des auteurs. Ces derniers ont bien conscience que leurs observations demeurent subjectives. Le seul test évaluant le langage est d'ailleurs une échelle de communication

verbale soumise au jugement du testeur. Malgré le faible niveau de preuve scientifique, cette étude rappelle qu'en 2014 des études de cas sont encore légitimement publiées car trop peu d'études expérimentales le sont. L'enjeu pour les auteurs est de rendre compte de leurs observations et interprétatives et d'inviter à l'élaboration d'expérimentations rigoureuses permettant d'apprécier l'intérêt d'une stimulation exploitant les neurones miroirs en aphasiologie (Arya et Pandian, 2014).

2.3 Stimulation linguistique via AOT

2.3.1 *IMITATE : l'observation du langage en facilite la production ?*

L'étude de Lee (Lee *et al.*, 2010) est l'étude inaugurale sur l'exploitation des neurones miroirs en aphasiologie (Tableau 1 p.XX). Il s'agit d'une expérimentation randomisée contrôlée, évaluant un protocole de stimulation thérapeutique inédit auprès de 5 sujets aphasiques sévères. Aucune précision supplémentaire n'est faite de la part des auteurs sur les différents profils sémiologiques des participants, hormis que ceux-ci sont variés. Le protocole de stimulation s'intitule IMITATE pour "*Intensive Mouth Imitation and Talking for Aphasia Therapeutic Effect*". Il s'agit d'une stimulation informatisée par AOT qui vise à améliorer les compétences linguistiques des personnes aphasiques. Les auteurs testent si l'observation d'une personne qui produit des mots et des phrases en facilite la production. Malgré nos réserves sur certains éléments du protocole, celui-ci s'est voulu très complet. L'ambition des chercheurs est sans doute d'exploiter IMITATE en clinique, une fois validé sur le plan expérimental. Les stimuli sont présentés sur un écran aux participants par clips audio-visuels. L'intérêt d'un matériel informatisé est de proposer des stimuli homogènes pour tous les participants. Aussi, 2 636 mots et 405 phrases de longueur et de complexité variables ont été organisés de manière à constituer 12 niveaux de progression. D'ailleurs, les auteurs rendent compte avec précision de leurs critères de sélection et d'organisation des items (*e.g.* nombre de phonèmes, visibilité des phonèmes et articulateurs en jeu, fréquence, pertinence écologique). Les clips ont été enregistrés par 6 différents locuteurs, des deux sexes, d'âges variables et de différentes origines. L'étude fait montre d'un soin porté à la diversité ethnique des locuteurs. Celle-ci se veut garante d'une meilleure rigueur méthodologique mais cet aspect est critiquable. Lee et collaborateurs (2010) se fondent sur l'étude de Magnusson et Nusbaum (2008) qui défend

l'idée d'une influence des paramètres acoustiques de la parole du locuteur sur la perception de la parole. Plus les paramètres acoustiques du locuteur et de l'interlocuteur sont proches, plus ce dernier traitera rapidement le signal, et inversement. Selon Magnusson et Nusbaum (2008), la modalité visuelle de la parole prime sur son aspect moteur, mais les résultats de leur étude ne confirment pas leurs hypothèses expérimentales. Que le locuteur soit du même sexe ou du sexe opposé par exemple, la vitesse de traitement acoustique du message par l'interlocuteur n'est pas significativement différente. En définitive, l'intérêt porté à la diversité des locuteurs dans le protocole IMITATE est peu pertinent. De plus, le recours à des enregistrements sonores modifie inéluctablement le signal acoustique original. Enfin, comme évoqué plus haut, la théorie des neurones miroirs revendique depuis longtemps un principe d'universalité du mécanisme miroir entre les individus (voir paragraphe 1.3.3). Malheureusement, les résultats de l'expérimentation de Lee et collaborateurs (2010) n'ont pas encore été publiés.

2.3.2 Observation d'actions et stimulation de la production lexicale

2.3.2.1 Contribution de l'équipe de Rizzolatti

Avec l'étude de l'équipe de Marangolo (Marangolo *et al.*, 2010), l'AOT prend une nouvelle direction . **Désormais la recherche va exploiter l'observation des actions du corps et non seulement l'observation de la parole pour stimuler la récupération des troubles aphasiques.** L'objectif des chercheurs est d'apprécier si l'observation d'une action, en activant les représentations sensorimotrices, sollicite le système sémantique et facilite l'accès à la représentation verbale. Autrement dit, la stimulation du système moteur par le recrutement du MNS, peut-elle avoir un effet facilitateur sur l'accès au langage ? L'expérimentation porte sur 6 sujets aphasiques sans trouble associé, notamment praxique et arthrique (Tableau 1 p.XX). Contrairement à l'étude de Lee et collaborateurs (Lee *et al.*, 2010), le profil sémiologique des participants est communiqué avec précision. Un tableau récapitule les différents scores aux bilans orthophoniques et des images d'IRMf permettent une localisation des lésions vasculaires. Deux grands profils se distinguent : 4 sujets ont une aphasie chronique de type non fluente avec un déficit du système phonologique et 2 autres ont une aphasie chronique fluente caractérisée par un système sémantique déficitaire. Pour l'ensemble des participants, l'aphasie se manifeste principalement par un déficit d'accès au stock lexical. La chronicité des troubles aphasiques permet d'écarter l'éventuel biais d'une récupération spontanée. Le programme de stimulation est intensif. Il se compose de 3 séances

par jour (pour un total de 2h) pendant 2 semaines. Quatre temps d'évaluation sont prévus : en pré-test et en post-test, et deux mesures à 1 puis 2 mois de la stimulation visent à apprécier un éventuel maintien dans le temps des performances acquises. Le protocole consiste, pour les participants, à nommer une action observée sur vidéo. Les auteurs ont conçu 128 stimuli mettant en scène des actions plus ou moins fréquentes et dont la forme verbale est plus ou moins longue. Chaque jour, trois conditions de stimulation sont proposées. Dans la condition expérimentale, les sujets doivent simplement dénommer l'action. Les deux conditions contrôles intègrent quant à elles une étape d'exécution après le temps d'observation. Les sujets doivent soit reproduire l'action perçue, soit produire un autre geste, puis nommer l'action du clip. Les résultats de l'étude indiquent une amélioration significative des capacités de dénomination dans le cadre de l'observation simple et dans le cadre de l'observation suivie de la reproduction du stimulus (Figure 8 p.XV). Il n'existe d'ailleurs pas de différence significative des performances d'accès lexical entre ces deux conditions. Seule la condition de stimulation avec l'intégration d'un geste intermédiaire n'améliore pas la production de verbes. En effet, l'exécution d'une action sans rapport avec le stimulus constitue une interférence et vient désamorcer l'effet facilitateur de l'observation. Les auteurs en concluent que l'AOT peut constituer une modalité de stimulation très intéressante en aphasiologie (Marangolo *et al.*, 2010). Cependant, les résultats encourageants de l'étude ne s'observent pas chez tous les sujets et viennent opposer les deux tableaux aphasiques. Aucune amélioration n'est constatée chez les sujets avec une aphasie fluente d'origine sémantique. D'après les auteurs, cette dissociation s'explique par le fait que si le système sémantique est défaillant, l'effet de facilitation par le recrutement des représentations sensorimotrices sera inefficace. Ainsi, les chercheurs fournissent des premiers éléments quant aux modalités d'application d'une thérapie par observation d'actions ; **celle-ci ne serait efficace que pour des sujets n'ayant pas de déficit majeur du système sémantique. En définitive, l'AOT serait indiquée de manière privilégiée pour les troubles aphasiques acquis causés par une atteinte du système phonologique** (Marangolo *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2012 ; Marangolo et Caltagirone, 2013).

Encouragés par ces résultats, une nouvelle étude est rapidement publiée (Marangolo *et al.*, 2012). Celle-ci reprend les mêmes modalités de stimulation (*i.e.* stimuli audio-visuels observation d'actions, rythme et intensivité du protocole) mais avec de nouveaux items. Les nouveaux stimuli sont élaborés avec une plus grande précision. L'équipe de Marangolo

(Marangolo *et al.*, 2012) différencie ainsi des actions humaines qui mobilisent quatre types d'effecteurs (*i.e.* le corps, la main, le pied et la bouche), et des actions non humaines. Ces dernières comprennent des actions d'un agent vivant (*e.g.* aboyer pour un chien), et des actions d'un agent non vivant (*e.g.* imprimer pour une machine, pleuvoir pour la pluie). L'étude poursuit les travaux de l'équipe de Buccino (Buccino *et al.*, 2004) en créant des conditions expérimentales qui dissocient des actions qui appartiennent au répertoire moteur humain et des actions qui n'y appartiennent pas. Enfin, au vu des données précédentes (Marangolo *et al.*, 2010), seuls des patients avec une aphasie chronique de type non fluente d'origine phonologique participent (Tableau 1 p.XX). Les résultats montrent une **amélioration significative de la dénomination des actions humaines, par opposition aux actions non humaines** (Figure 9 p.XV). Ces performances se maintiennent dans le temps jusqu'à deux mois après la stimulation. De manière inédite par rapport à l'étude précédente (Marangolo *et al.*, 2010), les auteurs envisagent un éventuel effet de généralisation du traitement à d'autres aspects du langage oral. Ils utilisent pour cela des tests orthophoniques standardisés dont les résultats indiquent une amélioration qualitative (*i.e.* syntaxe plus complexe, meilleur accès au stock lexical) et quantitative (*i.e.* phrases plus longues et plus nombreuses) du langage pour 6 patients sur 7. Nous avons remarqué des données surprenantes. Une épreuve du BADA* qui teste l'accès au stock lexical verbal par une tâche de dénomination d'images, n'objectivent pas d'amélioration significative. Les auteurs ne commentent pas cet aspect. La généralisation des compétences aux items non traités reste encore à démontrer.

Une nouvelle étude dans la lignée des précédentes est réalisée auprès de de 6 sujets avec une aphasie chronique post-AVC (Bonifazi *et al.*, 2013). Les participants se répartissent à nouveau entre 4 aphasiques avec déficit phonologique et 2 avec déficit sémantique. Les chercheurs proposent quatre conditions de stimulation avant la dénomination : observation réelle, observation réelle puis exécution, observation virtuelle puis exécution, observation virtuelle puis exécution d'une autre action. Les observations réelles sont effectuées par un expérimentateur, et les observations virtuelles sont présentées par vidéo. Le programme d'AOT est intensif et s'organise en quatre sessions (de 30 à 45min) par jour, 5 jours par semaines, pendant 2 semaines consécutives (Tableau 1 p.XX) (Bonifazi *et al.*, 2013). Les résultats montrent un effet significatif de l'AOT sur les 4 patients avec une aphasie d'origine phonologique et corroborent les conclusions des études antérieures (Marangolo *et al.*, 2010 ;

Marangolo *et al.*, 2012). Aucune différence significative ne s'observe selon si l'action est présentée réellement ou virtuellement. En adéquation avec les résultats cités plus haut (Marangolo *et al.*, 2010), la reproduction de l'action observée n'améliore pas plus les compétences langagières et la production d'une action non congruente, parasite l'effet de facilitation et donc l'accès lexical. L'étude de Bonifazi et collaborateurs renforce les conclusions des études qui la précèdent et apportent deux éléments majeurs dans la recherche sur les neurones miroirs. **Tout d'abord, le MNS peut être recruté indifféremment dans le cadre d'une stimulation virtuelle ou réelle. Enfin l'équipe de chercheurs propose que si l'AOT s'adresse de manière privilégiée aux aphasiques avec déficit phonologique plutôt que d'origine sémantique, c'est surtout parce que cette perspective thérapeutique requiert une intégrité de la zone péri-sylvienne (dans le lobe pariétal inférieur) et notamment du gyrus temporal postérieur, aussi appelé aire BA22 et BA40, ce qui correspond à l'aire dite de Wernicke** (Figure 2 p.X). Les auteurs formulent cette hypothèse en comparant les IRMf et les zones lésées des différents participants (Bonifazi *et al.*, 2013).

2.3.2.2 *Contribution de l'équipe québécoise de Routhier*

Hormis l'équipe italienne, peu d'autres chercheurs se sont intéressés directement à l'exploitation des neurones miroirs en aphasiologie. Une étude québécoise affirme récemment l'intérêt de combiner l'AOT aux techniques orthophoniques actuelles (Routhier *et al.*, 2015). Elle revendique la **pertinence d'une approche multimodale en exposant l'efficacité d'une stimulation alliant une approche phonologico-sémantique traditionnelle et une approche sensorimotrice, dans la réhabilitation des anomies verbales**. L'expérimentation de l'équipe de Routhier (Routhier *et al.*, 2015) porte sur 2 sujets atteints d'une aphasie chronique post-AVC non fluente. Tous deux ont une hémiparésie droite associée. Comme dans les protocoles d'AOT antérieurs, la stimulation est intensive (Bonifazi *et al.*, 2013 ; Marangolo *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2012) (Tableau 1 p.XX). Les participants sont invités à observer une action présentée par vidéo, pour ensuite la dénommer. En opposition aux autres études, en cas de non réponse ou de mauvaise réponse, l'expérimentateur peut encourager l'accès au stock lexical par deux types d'étayage qui correspondent à l'approche phonologico-sémantique orthophonique classique (voir paragraphe 1.1.3). L'étayage est d'abord sémantique (*i.e.* l'expérimentateur initie une phrase à compléter pour amorcer le réseau sémantique), puis phonologique (*i.e.* les premiers sons du verbes sont produits pour amorcer l'accès à la forme phonologique du verbe). En cas d'échec, à ces deux amorces, l'expérimentateur prononce le

verbe cible et le sujet le répète. À l'issue du protocole expérimental, les auteurs observent une amélioration significative de l'accès au stock lexical pour les verbes travaillés ; les actions observées sont mieux dénommées. De plus ces résultats positifs perdurent selon les trois évaluations post-test, à 2, 4 et 8 semaines de la stimulation. Contrairement aux études italiennes précédentes (Marangolo *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2012 ; Marangolo *et al.*, 2013), les items entraînés exclusivement par une approche sensorimotrice c'est-à-dire par AOT seule, sans indiçage verbal, ne s'améliorent pas significativement. L'étude de Routhier et collaborateurs (2015), montre une amélioration significative de l'accès au stock lexical grâce à une facilitation multimodale, mais une inefficacité de l'AOT seule. Selon les chercheurs, cela pourrait s'expliquer par l'hémiplégie droite associée qui signe une atteinte du système moteur. **Ainsi, les auteurs s'interrogent sur le degré d'intégrité des aires motrices pour que l'AOT constitue une thérapeutique pertinente.** Cependant, les AVC sont vieux de 9 et 37 ans ; les déficits moteurs et linguistiques sont donc particulièrement chroniques. Une telle ancienneté des troubles compromet les capacités de réorganisation cérébrale, d'autant plus en seulement 3 semaines de stimulation. Comparativement, le protocole par AOT d'Arya et Pandian (2013, cités par Arya et Pandian, 2014) en neuroréhabilitation motrice de l'hémiplégie, proposait un programme de stimulation sur 3 mois. Il serait intéressant de proposer aux personnes aphasiques avec des troubles moteurs associés une stimulation dans ces mêmes modalités. **Les protocoles envisageant l'intérêt des approches multimodales en aphasiologie ont tout intérêt à étudier les résultats des études en neuroréhabilitation motrice.** Enfin, les auteurs s'intéressent à la portée de l'AOT, mais aucun effet de généralisation aux items non travaillés ne peut être mis en évidence (Routhier *et al.*, 2015).

2.3.3 Observation d'actions et stimulation linguistique générale

Les capacités d'accès au stock lexical verbal en situation artificielle de tâche de dénomination ne sont le reflet que d'une infime partie des compétences langagières (Chen *et al.*, 2015 ; Routhier *et al.*, 2015). Notre revue n'a mis en évidence que deux études évaluant les effets de l'exploitation des neurones miroirs par AOT sur le langage, plus globalement.

Une étude chinoise se présente comme l'étude pionnière répondant à cet objectif (Chen *et al.*, 2015). L'enjeu des chercheurs est d'apprécier l'impact de l'AOT sur des compétences langagières plus larges que l'accès aux mots d'actions, en évaluant de manière inédite les versants productif et compréhensif (Tableau 1 p.XX). L'équipe chinoise a conçu une

stimulation multimodale combinant une stimulation sensorimotrice par observation d'actions et un temps de répétition orale des items à dénommer. Chaque stimulus est diffusé par vidéo et montre soit une action manuelle dynamique, soit un objet statique. À l'issue du clip, le verbe, ou le nom de l'objet est prononcé par l'expérimentateur et le participant le répète. La stimulation proposée est courte et intensive à raison de 30min par jour, 6 jours par semaine, pendant 3 semaines. Les participants sont 6 patients avec une aphasie non fluente (post-AVC) de type Broca* ou transcorticale*. Certains d'entre eux ont une hémiplégié droite associée, ce qui pourrait compromettre l'intérêt de la stimulation, au regard des résultats d'une étude précédente (Routhier *et al.*, 2015). Le protocole expérimental propose deux conditions de stimulation. Dans l'une les patients bénéficient d'une thérapie où les stimuli sont majoritairement des actions dynamiques, dans l'autre les stimuli majoritaires sont les objets statiques. Les chercheurs évaluent le nombre de dénominations correctes et testent plus globalement une éventuelle amélioration du langage oral par des tests orthophoniques standardisés couramment utilisés dans les pays anglophones. Les auteurs utilisent la *Western Aphasia Battery** (WAB) qui évalue la production et la compréhension du langage oral et écrit, le *Token Test** qui est un test de compréhension orale, et le *Picture Naming test** qui est une épreuve de dénomination d'images et évalue l'accès au stock lexical nominal. Leur pertinence et leur usage nous paraissent critiquable au vu des objectifs des chercheurs. Les épreuves de la WAB* et du *Token Test** ont en effet été effectuées à quatre reprises sur trois semaines consécutives. Une telle méthodologie présente un biais majeur car des effets d'apprentissage et d'entraînement peuvent être largement envisagés. De plus, le *Token Test** est un test qui évalue les capacités de compréhension orale en passant par la manipulation ; or tous les sujets sont droitiers et ont une hémiplégié droite associée. Les participants ont donc été contraints de réaliser le test avec leur main non-dominante, ce qui pourrait là-encore biaiser les résultats. Aucune amélioration n'est d'ailleurs objectivée par le *Token Test** à l'issue du protocole. Nous pourrions en conclure que la stimulation proposée n'a pas d'effet sur la compréhension orale, mais au regard des biais précédemment cités il semble difficile d'accorder une légitimité à cette interprétation. Les résultats à la WAB* et au *Picture Naming Test** quant à eux, sont meilleurs à l'issue de la stimulation pour tous les sujets, y compris pour ceux n'ayant pas bénéficié de la stimulation où les actions dynamiques sont majoritaires, et y compris pour les aphasiques les plus chroniques. Plus globalement, toutes les données s'accordent à dire que la stimulation proposée améliore les compétences linguistiques des

participants car tous ont bénéficié de l'AOT. Cependant, lorsque les stimuli sont les objets statiques, la dynamique d'amélioration s'inverse et les sujets régressent. Les auteurs soulignent une différence significative des compétences linguistiques entre le groupe contrôle ayant eu majoritairement des objets et le groupe expérimental stimulé surtout par des actions, en faveur de ce dernier. En conclusion, cette étude comportementale confirme l'intérêt de l'AOT pour la prise en charge des troubles aphasiques. D'après les auteurs, **cette approche inédite n'est pas seulement efficace pour améliorer l'accès aux mots d'actions, mais présente un intérêt pour stimuler des compétences linguistiques larges. Les auteurs revendiquent une amélioration qualitative et quantitative du langage des participants aphasiques, en production et en compréhension** (Chen *et al.*, 2015).

En outre, l'étude de l'équipe chinoise se distingue des travaux précités car elle ne se limite pas à des données comportementales. En effet, Chen et son équipe (Chen *et al.*, 2015) introduisent une analyse par IRMf des structures cérébrales en jeu dans leur protocole expérimental. En comparant l'activité cérébrale d'un des participants aphasique à celle d'un autre sujet contrôle sans lésion, l'équipe de chercheurs confirme que **les stimulations via des objets statiques sont beaucoup moins pertinentes que des stimulations via des actions dynamiques**. Hormis la zone occipitale, inéluctablement recrutée du fait de la nature visuelle des stimuli, l'activation cérébrale est largement moindre dans le cadre des stimuli avec des objets. À l'inverse, **les stimuli relevant de l'AOT recrutent le MNS et le système moteur. On remarquera d'ailleurs que l'activation est bilatérale et non restreinte à l'HG, ce qui confirme l'hypothèse d'un MNS plastique et bilatéral** (Aziz-Zadeh, Koski, Zaidel, Mazziotta et Iacoboni, 2006 ; Marshall *et al.*, 2010).

Dans la continuité de ce travail, l'équipe de Rizzolatti propose une nouvelle étude à la fois comportementale et avec IRMf (Gili *et al.*, 2016). L'objectif est d'apprécier les conséquences générales de l'AOT sur la récupération du langage oral auprès d'aphasiques. Les auteurs proposent une méthode d'évaluation très intéressante, plus rigoureuse que celle de l'étude chinoise. Aussi, celle-ci est plus écologique et fonctionnelle mais n'a pas recours à des tests orthophoniques standardisés pour l'évaluation. L'AOT n'est pas proposée sous la forme de clips vidéos comme dans les études précédentes (Bonifazi *et al.*, 2013 ; Chen *et al.*, 2015 ; Lee *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2012 ; Routhier *et al.*, 2015), mais par une séquence vidéo qui retranscrit une scène de la vie réelle où se produisent différentes actions. Les 10 participants de l'étude sont des patients présentant une aphasie

chronique non fluente post-AVC aux degrés de sévérités variables (Tableau 1 p.XX). Après visionnage des films, les sujets doivent produire un récit oral qui raconte la séquence observée. La production orale est évaluée sur les plans qualitatif et quantitatif (*e.g.* lexique adapté, nombre de verbes, de syntagmes et de phrases, fluence, pertinence du propos, organisation du récit). Le protocole intensif est constitué d'1 session de stimulation par jour, 4 jours par semaine, pendant 6 semaines consécutives. Les participants sont répartis en deux groupes. Dans le groupe expérimental, le stimulus est une séquence vidéo mettant en scène différentes actions de personnes situées dans une gare. Pour le groupe contrôle, la séquence vidéo est une scène dans une boutique mais les acteurs miment les actions, sans manipuler d'objet. À l'issue de l'expérimentation, tous les patients font montre de meilleures compétences en narration (Figure 10 p.XVI). Les auteurs remarquent toutefois que **les sujets ayant bénéficié d'une AOT avec des actions non mimées ont de meilleures performances en production lexicale. Les auteurs expliquent ce résultat par la "Context hypothesis"** (Osiurac *et al.*, 2012, cités par Gili *et al.*, 2016) : **plus une action est inscrite dans un contexte riche, meilleure en sera l'accès sémantique.** Dans le cadre des actions mimées, les sujets ne voient pas les objets avec lesquels les différentes personnes interagissent ; le contexte est donc altéré. Comme dans l'étude chinoise précédente (Chen *et al.*, 2015), l'équipe de Rizzolatti recourt à l'IRMf. **Pour la première fois, un phénomène de réorganisation plastique consécutif à l'AOT est objectivé.** Les aires BA6 (qui inclut le cortex prémoteur et l'aire motrice supplémentaire), et BA21 (qui inclut la partie médiane du gyrus temporal) de l'HD voient leur activité augmenter de manière significative lors de la tâche verbale. Leur connectivité avec les régions adjacentes est elle aussi accrue. **Les auteurs en concluent que la récupération du langage chez les participants est sous-tendue par l'investissement de l'HD et de ses aires BA6 et BA21** (Figure 11 p.XVII). **En recrutant les représentations sensorimotrices contralatérales par l'observation d'actions, le système sémantique est activé et l'accès aux représentations verbales s'en trouve facilité** (Gili *et al.*, 2016). Ces données vont écho à plusieurs études qui étudient le lien entre le geste et l'aphasie. Une expérimentation montre que plus l'aphasie est importante, plus les gestes co-verbaux accompagnant la communication sont latéralisés à gauche (Foundas *et al.*, 1995 cités par Daviet *et al.*, 2007). Cette observation est interprétée comme une compensation de l'HG par l'HD.

L'ensemble des travaux présentés soulignent la pertinence de l'exploitation des neurones miroirs par AOT dans la prise en charge de l'aphasie. L'AOT constitue une approche sensorimotrice inédite qui favoriserait une réorganisation plastique des réseaux corticaux impliqués dans le langage, et montre des effets très encourageants sur la récupération du langage.

3 QUESTIONNEMENTS ET PERSPECTIVES : LES APPORTS DE LA RECHERCHE EXPERIMENTALE

3.1 Limites de la recherche sur l'exploitation des neurones miroirs en réhabilitation de l'aphasie post-AVC

3.1.1 *Champ de recherche marginal*

Les expérimentations sur l'exploitation des neurones miroirs en rééducation de l'aphasie post-AVC sont peu nombreuses. Notre revue de la littérature n'en relèvera finalement que huit (Tableau 1 p.XX). Quatre d'entre elles sont dues à l'équipe de chercheurs italiens (Bonifazi *et al.*, 2013 ; Gili *et al.*, 2016 ; Marangolo *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2012). Seulement deux autres équipes de chercheurs, l'une québécoise (Routhier *et al.*, 2015), l'autre chinoise (Chen *et al.*, 2015) se sont intéressées à cette approche thérapeutique. Une nouvelle étude canadienne, de Montréal est en cours (Durand, Masson-Trottier et Ansaldo, 2017). La méthodologie et les résultats n'ont pas encore été publiés (Tableau 1 p.XX). La recherche sur les neurones miroirs est immédiatement contemporaine, que ce soit dans des perspectives thérapeutiques psychopathologiques, motrices ou linguistiques. Néanmoins les publications sur le MNS et l'aphasie sont encore marginales. Les neurones miroirs ayant été découverts chez le singe, l'articulation avec l'une des fonctions cognitives humaines les plus complexes, le langage, ne s'est pas faite immédiatement (Small *et al.*, 2010). L'ensemble des expérimentations que nous avons recensées sur l'AOT en réhabilitation de l'aphasie comptabilise un total de seulement 42 patients (Tableau 1 p.XX). **Une étude future pourrait inclure un plus grand nombre de sujets afin d'avoir une meilleure validité scientifique.**

3.1.2 *Exclusivité d'un profil aphasique d'origine phonologique ?*

Une des limites majeures à l'intérêt de l'AOT en aphasiologie, est qu'elle s'adresse de manière privilégiée aux aphasies non fluentes d'origine phonologique (Marangolo *et al.*, 2010 ; Bonifazi *et al.*, 2013) (Figure 8 p.XV). En effet, l'AOT ayant pour ambition de stimuler le système sémantique, les auteurs formulent l'hypothèse que les structures qui le sous-tendent doivent être relativement épargnées par les lésions vasculaires (Bonifazi *et al.*, 2013). Les

participants des différentes études ont ainsi majoritairement été des patients atteints d'une aphasie non fluente d'origine phonologique. Cependant, il serait plus pertinent de s'inscrire dans la lignée des travaux les plus récents, qui tendent à recruter des tableaux aphasiques divers (Chen *et al.*, 2015 ; Gili *et al.*, 2016 ; Routhier *et al.*, 2015). **Il nous paraît ainsi encore prématuré d'exclure certains tableaux cliniques.** Un intérêt particulier à la description des différents profils sémiologiques se doit donc de figurer dans les études futures. Elle permettra de mieux cerner les limites de l'AOT. Les chercheurs doivent être encouragés à fournir les données d'IRMf pour permettre une représentation spatiale des lésions, ainsi que les résultats des bilans orthophoniques. La recherche gagnerait à être investie par des orthophonistes. **La question des troubles associés doit aussi faire partie intégrante de la description sémiologique des participants.** En tant qu'approche sensorimotrice, d'éventuels troubles acquis et notamment neuromoteurs peuvent constituer des biais majeurs (Routhier *et al.*, 2015). En clinique, l'hémiplégie, l'hémi-parésie et l'apraxie sont d'ailleurs des troubles fréquemment associés à une aphasie.

En outre, l'exploitation des neurones miroirs par AOT suppose une préservation des compétences visuelles et neurovisuelles. Comme son nom l'indique, l'AOT repose sur l'observation. Les troubles de l'exploration du champ visuel tels que l'hémianopsie latérale homonyme (HLH) et la négligence spatiale unilatérale (NSU) pourraient largement compromettre l'accès aux stimuli. La modalité visuelle des neurones miroirs a été exploitée mais peu d'études traitent de leur modalité auditive. Une exploitation du MNS par des stimuli audio pourraient aussi être pensée et expérimentée. Enfin, la question de la mémoire et de l'intégrité des fonctions mnésiques figurent rarement dans les études que nous avons consultées (Routhier *et al.*, 2015). Pourtant, la mémoire de travail et la mémoire à long terme sous-tendent n'importe quelle approche en réhabilitation des troubles du langage. **Il nous paraît donc important que les études futures évaluent les compétences attentionnelles et mnésiques des patients afin de mieux cerner, là encore, quelles seraient les limites d'une application clinique de l'AOT.**

3.1.3 Exklusivité d'un déficit : l'anomie verbale ?

La portée thérapeutique de l'exploitation des neurones miroirs en réhabilitation de l'aphasie post-AVC se limite aujourd'hui à l'amélioration de l'anomie verbale. Les expérimentations explorent encore trop peu les conséquences de l'AOT sur d'autres aspects du

langage. Historiquement, l'AOT est une technique issue de la recherche en neuroréhabilitation motrice. Elle repose sur l'observation de gestes dans le but de recruter des représentations sensorimotrices et de faciliter l'exécution des programmes moteurs correspondants. Au niveau du langage oral, ce qui apparaît comme étant le plus proche de la motricité, hormis l'articulation et la parole, sont les mot d'actions. Les études se sont donc focalisées sur la réhabilitation de l'accès au stock lexical verbal (Tableau 1 p.XX). Cet intérêt privilégié pour l'anomie verbale dans la recherche sur les neurones miroirs contraste avec la marginalité de cette notion en aphasiologie, en neuropsychologie cognitive et en orthophonie (Routhier *et al.*, 2015). Pourtant, le verbe a une fonction majeure dans la phrase. Une méta-analyse sur l'aphasie post-AVC affirme d'ailleurs que l'accès aux verbes est plus fréquemment déficitaire que celui aux noms (Mätzig, Druks, Materson et Vigliocco, 2009). En définitive, **même si la portée de l'AOT semble limitée, elle n'en est pas moins légitime au regard de la prévalence du trouble**. De surcroît, différentes équipes de chercheurs envisagent qu'au regard des arguments anthropologiques qui unissent l'action et le langage et du fait de l'intrication des systèmes sensorimoteur et linguistique grâce au MNS, la stimulation des neurones miroirs a une portée encore aujourd'hui mésestimée en réhabilitation du langage (Arya, 2016 ; Chen *et al.*, 2015 ; Gili *et al.*, 2016). **La question de la généralisation des effets de l'AOT à d'autres compétences langagières doit être plus sérieusement explorée.**

Peu d'études évaluent ne serait-ce que la généralisation des effets de l'AOT à des items non travaillés (Tableau 1 p.XX). Enfin, **le maintien dans le temps des effets est peu investigué** ; seules deux études de l'équipe italienne incluent cette dimension à leur protocole (Marangolo *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2012).

3.1.4 AOT vs réhabilitation orthophonique classique

Une autre limite à propos de l'AOT en réhabilitation du langage concerne les modalités de stimulation des différentes expérimentations. Les protocoles précités ont une durée allant de 2 à 6 semaines. Les stimulations sont parfois quasi-quotidiennes avec des sessions de 30min à 2h par jour selon les études (Tableau 1 p.XX). Les données de la littérature suggère qu'une rééducation de l'aphasie est significativement efficace avec 5h de stimulation hebdomadaire (Joseph, De Seze, Dehail, Mazaux et Barat, 2007). Dans quelles mesures l'amélioration des compétences est-elle liée à l'approche spécifique de l'AOT plutôt qu'à sa simple modalité intensive ? **L'AOT est-elle plus pertinente qu'une autre thérapeutique**

orthophonique qui serait proposée à cette même intensité ? Aucune expérimentation ne permet à ce jour de répondre à cette question. Une nouvelle étude comparant les effets d'une approche classique et ceux de l'AOT, dans des modalités d'administration identiques serait nécessaire.

3.2 Intérêt de la recherche sur l'exploitation des neurones miroirs en réhabilitation de l'aphasie post-AVC

3.2.1 *Synthèse sur les besoins expérimentaux futurs*

Comme précisé plus haut, une expérimentation avec une large cohorte de sujets aphasiques serait nécessaire. Un soin à la description du profil sémiologique de chaque sujet doit être apporté afin de mieux cerner les limites de l'AOT. Les éventuels troubles associés ne sont pas à exclure car il serait intéressant de pouvoir comparer un profil qui présente seulement un trouble linguistique (*i.e.* un aphasique) avec un profil qui présente des troubles moteurs associés (*i.e.* un aphasique avec une apraxie). Le recours à une diversité de tableau doit être encouragé et inclure différents degrés de chronicité du trouble. En ce qui concerne l'évaluation de la stimulation en post-test, les données comportementales et de neuroimagerie nous semblent nécessaires et complémentaires. L'éventuelle amélioration des troubles aphasiques peut être appréciée par des tests, bilans, échelles ou épreuves orthophoniques validés. Les auteurs devront aussi veiller à écarter ou à prendre en compte tout biais d'apprentissage et d'entraînement. Une évaluation en double aveugle aurait aussi une meilleure validité scientifique. La portée thérapeutique de l'AOT doit être éprouvée par de larges outils qui envisagent de possibles effets de généralisation et de maintien dans le temps. Différentes mesures post-test doivent être proposées aux participants. Dans les études précitées, aucune situation contrôle ne permet d'établir la pertinence d'une thérapie fondée sur l'exploitation des neurones miroirs par rapport à une approche orthophonique traditionnelle. Une étude future devra donc s'intéresser à cet aspect et proposer une étude randomisée contrôlée avec une variable expérimentale qui met en jeu l'AOT et une variable contrôle qui propose une stimulation plus traditionnelle. Notre recherche a écarté la modalité écrite du langage mais il serait intéressant de l'intégrer. Peu d'études étudient l'interaction entre le MNS et la production écrite du langage et encore moins auprès de sujets ayant des lésions

cérébrales. Pourtant, une étude montre une activation du MNS lors de tâches de compréhension de phrases écrites (Zarr, Fergusson et Glenberg, 2013). Les auteurs en concluent que l'activité sensorimotrice est une composante de la compréhension écrite du langage, et ce, en partie grâce aux neurones miroirs. Enfin, il serait intéressant d'exploiter l'activation des certains neurones miroirs aux stimuli auditifs.

3.2.2 Application clinique et orthophonique de l'AOT

Malgré toutes les limites évoquées ci-dessus, l'exploitation des neurones miroirs en prise en charge de l'aphasie présente un intérêt certain. Toutes les études mentionnées ci-dessus, attestent d'une amélioration significative de certaines aptitudes langagières, et notamment de l'accès aux mots d'actions. Les résultats de l'AOT expose l'intérêt de la vidéo ou de la stimulation du langage par le mouvement. Observer une action stimule des représentations sensorimotrices grâce au recrutement des neurones miroirs et peut faciliter l'accès verbal. Pourquoi recourir à l'observation et non directement à l'exécution des actions ? Passer par un recrutement des neurones miroirs pourrait paraître superflu mais les intérêts sont en fait multiples. Contrairement à ce que l'on pourrait penser de prime abord, en réhabilitation du langage, l'exécution concrète d'un geste n'est pas plus pertinente que son observation. Rappelons en effet que le MNS n'est pas un système exclusivement moteur. Comme précisé plus haut, il est multimodal. Il code des représentations sensorimotrices certes, mais à un niveau abstrait. **La stimulation du MNS constitue donc aussi une stimulation d'un réseau de sens** (voir paragraphe 1.2.3 et 1.3.3) (Aziz-Zadeh, Wilson, Rizzolatti et Iacoboni, 2006 ; Boulenger, 2006 ; Buccino, 2014 ; Cappa et Pulvermüller, 2012 ; Chen et Yuan, 2008 ; Ertel et Binkofski, 2012 ; Fogassi et Ferrari, 2007 ; Gallese, 2008 ; Marangolo *et al.*, 2012 ; Marangolo et Caltagirone, 2013 ; Rizzolatti et Sinigaglia, 2008 ; Rizzolatti et Fogassi, 2014 ; Varley, 2011).

Aussi, l'AOT permet de proposer des stimulations qui ne seraient pas possibles dans un contexte thérapeutique traditionnel. Passer par l'observation plutôt que par l'exécution offre un aspect pratique certain. **Le recours aux vidéos notamment, ouvre un vaste champ des possibles et permet de proposer une variété infinie de stimuli.** Les représentations sensorimotrices du fait de nager, de courir, de danser, de naviguer, d'escalader *etc* peuvent être recrutées successivement en l'espace de quelques instants, alors même que le patient se trouve dans un cabinet libéral, à l'hôpital ou à son domicile.

En outre, l'usage de la vidéo présente un avantage économique certain. Une stimulation par AOT pourrait être utilisée en complément de sessions plus classiques d'orthophonie voire aussi être effectuées en autonomie par le patient, comme le prévoyait le programme IMITATE (Lee *et al.*, 2010). **Un protocole avec AOT via des stimuli vidéo rend possible et avec peu de moyens une stimulation intensive.** Un patient qui suivrait ponctuellement des programmes fondés sur l'AOT pourrait bénéficier de sessions courtes et intensives, sans doute plus bénéfiques (Bhogal *et al.*, 2003 ; Marangolo *et al.*, 2012). De plus, de telles modalités thérapeutiques peuvent revêtir un caractère plus motivant pour le patient.

Enfin, les résultats positifs de l'AOT concernent aussi les aphasies très chroniques. Des programmes de stimulation intensifs par AOT pourraient permettre d'espérer un accroissement des compétences langagières malgré une ancienneté des troubles.

Malgré l'intérêt que présente l'AOT, il ne s'agit pas d'exclure les approches orthophoniques traditionnelles. Au contraire. Il n'est pas question d'envisager une thérapie qui reposerait exclusivement sur l'observation de vidéos et qui exclut l'importance du savoir-faire de l'orthophoniste. Une stimulation informatisée, sans interaction avec un thérapeute n'est pas envisageable. **L'AOT intervient plutôt comme une approche complémentaire non invasive qui pourrait potentialiser des approches plus classiques** (Burns, 2008 ; Ertelt et Binkofski, 2012 ; Lee *et al.*, 2010; Mathon, 2013 ; Marangolo et Caltagirone, 2013 ; Meinzer *et al.*, 2011; Pulvermüller et Berthier, 2008 ; Sale et Franceschini., 2012 ; Varley, 2011).

3.3 Nouvelles implications théoriques sur le langage

La découverte des neurones miroirs par Rizzolatti et son équipe donne un nouveau souffle à deux théories. La première repense la parole, la seconde le langage.

3.3.1 *Motor Theory of Speech Perception*

La MSH donne une nouvelle dimension à une conception originale de la parole. Dès la découverte des neurones miroirs, l'équipe de Rizzolatti convoque la *Motor Theory of Speech Perception* (MT) de Liberman et Marttingly (1985, cités par Rizzolatti et Arbib, 1998). Cette théorie revendique la nature sensorimotrice de la parole. Il s'agit de l'hypothèse selon laquelle, un interlocuteur qui reçoit un message oral ne le traduit pas en une séquence de sons ; au contraire, il l'intègre en une séquence de représentations motrices qu'il aurait dû réaliser s'il

avait lui-même voulu prononcé ce message. La MT se fonde sur l'idée que le langage est d'abord perçu comme un ensemble de gestes plutôt que comme un ensemble de sons. Elle s'oppose ainsi aux « approches générales auditives » selon lesquelles la parole relève de processus de traitement et de décodage purement auditifs (Diehl et Kluender, 1989, Massaro, 1998, Kuhl, 2000, Diehl, Lotto et Holt, 2004, cités par Grabski et Sato, 2014). À l'inverse, **selon la MT, les informations issues du message verbal sont mises en correspondance avec les représentations sensorimotrices articulatoires à l'origine du signal acoustique.**, De nombreuses études électrophysiologiques et en INF présentées plus haut, montrent l'activation du système moteur lors de la perception de la parole (Buccino *et al.*, 2004 ; Fadiga *et al.*, 2002 ; Mashal *et al.*, 2010 ; Murakami *et al.*, 2011 ; Watkins et Paus, 2004 ; Watkins Strafella et Paus, 2003). Ainsi, les neurones miroirs apparaissent pour les chercheurs comme une preuve possible de la *Motor Theory of Speech Perception*, puisqu'ils constituent un système de codage direct et simultané et recrutent nos représentations sensorimotrices en miroir (Arbib, 2005 ; Aziz-Zadeh et Ivry, 2009 ; Corballis, 2009 ; Grabski et Sato, 2014 ; Fogassi et Ferrari, 2007 ; Rizzolatti et Arbib, 1998 ; Small *et al.*, 2012).

Holt et Lotto (2014) s'offusquent d'une telle analogie entre MNS et MT ; elle est présentée comme abusive et erronée. Ces chercheurs ne remettent nullement en cause l'idée que la production et la perception de la parole partagent des codes communs. Cependant, ils critiquent l'hypothèse d'une fusion des deux modalités perceptive et réceptive. En guise d'argument, les auteurs se réfèrent aux résultats d'une expérimentation en neuroimagerie menée auprès de jeunes enfants (Imada *et al.*, 2006, cités par Holt et Lotto, 2014). Les données montrent que les nouveau-nés ont une activation du STS (et donc de l'aire Wernicke) lors de la perception de la parole, mais pas des régions motrices dont BA44. À l'âge 6-12 mois, les deux régions s'activent en perception. Il s'agit de la période où le babillage apparaît et se développe. Selon Holt et Lotto (2014), l'étude montre que lorsque l'enfant entre dans le langage, sa perception de la parole devient sensorimotrice. Ce passage d'une perception sensorielle à sensorimotrice indiquerait pour les auteurs que la parole n'est pas par *nature* sensorimotrice. Selon eux, il s'agirait là de la preuve d'une certaine indépendance des modalités perceptive et réceptive de la parole. Production et perception ne sont pas intrinsèquement liées l'une à l'autre mais jouissent d'une autonomie relative. Plusieurs éléments déjà développés viennent à l'encontre de l'argumentaire de Holt et Lotto (2014). La non activation du MNS chez les tout-petits dans le cadre de la perception de la parole nous

semble plutôt liée au fait que les bébés n'ont justement pas encore acquis les patterns moteurs de l'articulation du langage. Autrement dit, la production d'un langage articulé ne fait pas encore partie de leur patrimoine moteur et donc aucune représentation sensorimotrice ne pourrait être recrutée. Les bébés perçoivent la parole comme un ensemble de paramètres acoustiques qui ne fait pas sens, et ne sont pas encore en mesure d'accéder à la globalité des gestes verbaux. Grâce à l'imitation et à l'apprentissage, ils vont devenir producteurs et vont ainsi pouvoir accéder à la parole en tant que telle, y compris dans la une modalité réceptive (voir paragraphe 1.3.2). En conclusion, si la perception de la parole, chez les bébés, n'active pas de représentations sensorimotrices, c'est parce qu'ils ne sont eux-mêmes pas encore doués d'une parole. Grâce à l'apprentissage et à la nature plastique du MNS, le répertoire verbal et linguistique de l'enfant se constitue et des représentations sensorimotrices s'affinent et seront recrutés en perception.

En orthophonie, la *Motor Theory of Speech Perception* fournit des modèles psycholinguistique et neurobiologique inédits de la parole. Elle sous-tend de nouvelles approches thérapeutiques qui intégreraient davantage une dimension perceptivo-motrice dans la prise en charge de troubles perceptifs et moteurs de la parole dont les MSDs (Grabski et Sato, 2014). Même s'il s'agit d'une théorie sur la parole, celle-ci n'est pas sans conséquence sur notre représentation du langage. L'articulation de la théorie des neurones miroirs et de la *Motor Theory of Speech Perception* postule que le langage soit intégré en des termes moteurs. Les représentations sensorimotrices sous-tendent notre réception et notre production du langage. En somme, les mots ont une résonance motrice intrinsèque (Schomers et Pulvermüller, 2016).

3.3.2 *Embodied cognition theory*

Toutes les expérimentations étudiant le lien entre exploitation des neurones miroirs via AOT et réhabilitation de l'aphasie revendiquent leur inscription dans une théorie qui repense le système linguistique ; il s'agit de la *Embodied cognition theory* (*i.e.* littéralement théorie de la cognition incarnée) encore parfois appelée *Embodied semantics theory* (Bonifazi, *et al.*, 2013 ; Gili *et al.*, 2016 ; Marangolo *et al.*, 2010 ; Marangolo *et al.*, 2012 ; Routhier *et al.*, 2015). Cette théorie relativement récente a été développée par Gallese et Lakoff (2005) et Pulvermüller (2005). Selon la *Embodied cognition theory*, le sens des mots est incarné. Les concepts sont inscrits au niveau conceptuel et linguistique mais aussi au niveau sensorimoteur.

Les représentations sensorimotrices et sémantiques ne s'opposeraient donc pas. D'après la théorie de la cognition incarnée, **la représentation d'un mot est multimodale. Elle se compose à la fois de traits sémantiques et de tous les aspects sensorimoteurs qui y sont rattachés.** Autrement dit, « La connaissance conceptuelle n'est pas une représentation abstraite, amodale, ou arbitraire d'un langage interne ; elle relève de la même configuration que notre système sensorimoteur »⁴ (Small *et al.*, 2012). **Le langage n'est pas absent du corps. Il est par nature incarné, vécu et exprimé comme un geste. Dans une certaine mesure, notre système sémantique nous est propre. Il est modelé par nos expériences sensorimotrices individuelles** (Aziz-Zadeh et Damasio, 2008 ; Aziz-Zadeh et Ivry, 2009 ; Aziz-Zadeh, Wilson, Rizzolatti et Iacoboni, 2006 ; Boulenger, 2006 ; Cappa et Pulvermüller, 2012 ; Gallese et Lafoff, 2005 ; Gallese, 2008 ; Glenberg, 2015b ; Kemmerer, 2014 ; Mahon et Caramazza, 2005 ; Pulvermüller, 2005 ; Rizzolatti et Craighero, 2004 ; Routhier, 2014 ; Routhier *et al.*, 2015).

La recherche sur la théorie de la cognition incarnée s'est d'abord consacrée aux verbes car ils constituent le matériau linguistique a priori le plus proche des actions. Nous avons évoqué plus haut l'hypothèse d'une somatotopie sémantique des mots d'actions formulée par l'équipe de Pulvermüller (Figure 7 p.XIV) (Hauk *et al.*, 2004 ; Pulvermüller, 2005 ; Pulvermüller, Moseley, Egorova, Shebani et Boulenger, 2014 ; Pulvermüller, 2017). Une étude publiée par l'équipe de Rizzolatti va plus loin et analyse l'activité corticale lors du traitement sémantique des phrases d'action (Tettamanti *et al.*, 2005). Cette expérimentation en IRMf porte sur 17 sujets sans aucun trouble cognitif, linguistique ou moteur. L'étude ne porte donc pas sur les troubles aphasiques. L'objectif est de déterminer si le traitement linguistique d'une phrase qui évoque une action, est comparable au traitement sensorimoteur de l'action. Les participants ont été soumis à l'écoute de phrases exprimant des actions concrètes ou abstraites. Aucune zone contenant des représentations sensorimotrices n'est recrutée lors des actions abstraites. À l'inverse, lors des actions concrètes, les données révèlent un recrutement somatotopique* des aires corticales en fonction du sens des verbes exprimés (Figure 12 p.XVIII). D'ailleurs, la topographie des zones corticales en jeu dans leur étude, s'accorde avec celle de Buccino et Binkofski (2001) (Figure 6 p.XIII). De plus, les deux expérimentations mettent en évidence l'implication de BA44 dans le traitement linguistique des verbes (Buccino et Binkofski, 2011 ; Tettamanti *et al.*, 2005). **Les auteurs en concluent que l'accès au sens**

4 Traduction librement proposée

des verbes est latéralisé dans l'HG et qu'il requiert une forte implication de la région clé des neurones miroirs. En somme, comme lors de l'observation d'actions, l'écoute d'une phrase d'action stimule le MNS. Le sens est codé au niveau neuronal en une représentation sensorimotrice (Arévalo, Baldo, González-Perilli et Ibáñez, 2015).

Plusieurs auteurs soutiennent que la *Embodied cognition theory* spéculer sur des éléments qu'elle n'a pas encore prouvés (Caramazza, Anzellotti, Strnad et Lingnau, 2014 ; Mahon, 2015 ; Mikulan *et al.*, 2014 ; Tschentscher, 2017). Un premier argument porte sur les techniques de neuroimagerie. Les études en cognition incarnée ont majoritairement recours à l'IRMf pour apprécier, d'un point de vue spatial, le recrutement du système moteur lors de tâches sémantiques. Selon les auteurs, cet outil est insuffisant et ne permet pas de conclure que ce recrutement somatotopique* est la traduction d'un traitement linguistique et sémantique. Ce n'est pas parce que des représentations sensorimotrices sont activées qu'il est possible d'en conclure qu'elles relèvent du traitement linguistique et qu'elles composent le sens des verbes. L'activation des représentations sensorimotrice pourraient être la conséquence d'un processus indirect, post-linguistique (Caramazza *et al.*, 2014 ; Mikulan *et al.*, 2014 ; Tschentscher, 2017). Tschentscher (2017) propose ainsi le recours à l'EEG et la MEG, car ses outils offrent une meilleure résolution temporelle des processus cérébraux. Pourtant dès 2005, Pulvermüller utilisait ces techniques et excluait que le recrutement du cortex sensorimoteur ne soit pas directement concomitant au traitement sémantique. Un deuxième argument à l'encontre de la *Embodied cognition theory* est qu'il est difficile d'envisager que les concepts abstraits (*e.g.* la politique, l'amitié) puissent être incarnés en une représentation sensorimotrice. D'ailleurs, l'étude de l'équipe de Rizzolatti, révèle que l'écoute des phrases abstraites n'active pas de zones motrices. Enfin, comment expliquer que des lésions du cortex moteur n'impliquent pas nécessairement des troubles langagiers, notamment au niveau de la compréhension et de la production des verbes ? (Mikulan *et al.*, 2014).

CONCLUSION

La recherche sur les neurones miroirs ouvre de nombreuses perspectives dont la portée n'est pas encore mesurée. La "*Mirror System Hypothesis*" (MSH) invite à repenser nos conceptions traditionnelles sur le système moteur, l'apprentissage, l'imitation, la cognition sociale, la parole et le langage. Les neurones miroirs rassemblent de nombreuses disciplines telles que les neurosciences cognitives, la neurolinguistique, la neurobiologie, la neurophysiologie, la philosophie *etc.* Nous sommes convaincus que ce champ de recherche gagnera à être investi par l'expertise orthophonique, et nous espérons que notre travail contribuera à cette dynamique.

Selon certains auteurs, le passage de l'australopithèque au genre *Homo* coïnciderait avec le passage d'un MNS simple qui permet la reconnaissance des actions comme chez le singe, à un MNS humain qui rend possible des apprentissages complexes et élaborés. L'évolution et l'élaboration du MNS serait à l'origine de l'évolution des capacités communicatives, cognitives et sociales humaines. La MSH induit de nouvelles implications théoriques sur le langage mais nous avons souhaité les envisager avant tout dans une perspective clinique. Notre travail de recherche a pour intention de rendre compte de la littérature, du point de vue du thérapeute spécialiste du langage.

En thérapie, les neurones miroirs constituent un substrat neuronal dont on exploite avant tout le fonctionnement et la connectivité. Le recrutement du MNS induit des facilitations synaptiques qui permettent une réorganisation plastique de l'activité cérébrale. Ainsi, l'exploitation des neurones miroirs s'inscrit dans le connexionnisme actuel qui prône l'intérêt de repenser les fonctions cérébrales en réseau. Elle ne constitue pas la panacée de la neuroréhabilitation et notre revue ne s'impose pas comme une apologie du MNS. Les neurones miroirs induisent une approche multimodale et complémentaire qui pourrait potentialiser les autres techniques orthophoniques.

En définitive, les neurones miroirs sont les neurones du lien. Du lien entre soi et les autres, entre l'action et le langage, entre le corps et la cognition, entre le vécu et l'abstrait, entre les différentes aires corticales, entre nos différentes fonctions cognitives, et entre les disciplines scientifiques. L'orthophonie a une place légitime à prendre, au sein de ces intrications.

TABLE DES ANNEXES

GLOSSAIRE.....	III
MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	VII
FIGURES.....	IX
Figure 1 : Homologie anatomique entre l'aire F5 du singe et l'aire BA44 de l'homme	IX
Figure 2 : Vue latérale de l'HG de l'homme : anatomie et organisation neurofonctionnelle	X
Figure 3 : Localisation des zones corticales aux propriétés miroirs dans différents contextes de stimulation	XI
Figure 4 : Comparaison de l'activité corticale de l'homme, lors de l'observation d'actions alimentaire vs communicative en fonction de l'espèce de l'agent	XII
Figure 5 : Séance de rééducation de la paralysie faciale périphérique par « effet miroir ».....	XII
Figure 6 : Activation somatotopique du MNS selon l'effecteur de l'action en jeu.....	XIII
Figure 7 : Somatotopie corticale des réseaux neuronaux miroirs impliqués dans le traitement des mots d'action	XIV
Figure 8 : Évolution des capacités de dénomination de mots d'actions après AOT chez des sujets aphasiques avec déficit phonologique vs déficit sémantique	XV
Figure 9 : Évolution des compétences en dénomination de mots d'actions humaines vs non humaines après AOT chez des sujets aphasiques avec déficit phonologique	XV
Figure 10 : Amélioration des compétences linguistiques du sujet aphasique après AOT.....	XVI
Figure 11 : Réorganisation plastique des réseaux du langage oral et investissement de l'hémisphère droit chez le sujet aphasique, après AOT	XVII
Figure 12 : Somatotopie corticale des réseaux neuronaux impliqués dans le traitement passif des phrases orales exprimant une action du pied, de la main ou de la bouche. .	XVIII
TABLEAU.....	XX
Tableau 1 : Synthèse des études expérimentales citées exploitant les neurones miroirs auprès de sujets aphasiques	XX

GLOSSAIRE

Anarthrie : Il s'agit d'un trouble portant sur la réalisation motrice du langage. La compréhension orale et écrite est conservée (Brin *et al.*, 2015).

Aphasie de Broca : Il s'agit de la forme prototypique des aphasies non fluentes. Elle est caractérisée par une réduction qualitative et quantitative du langage oral. Elle peut aller jusqu'au mutisme. L'accès lexical est très altéré avec des latences, des déviations et des paraphasies. La compréhension simple en conversation spontanée est relativement préservée mais elle est soumise à un effet de complexité et de longueur syntaxique (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Aphasie de conduction : Il s'agit d'une aphasie qui touche l'expression à l'oral et à l'écrit. La répétition est aussi très déficitaire. Les troubles de la compréhension sont plus rares dans ce tableau phasique. En revanche, la lecture à haute voix, qui relève d'un processus de transcodage est très altérée voire impossible. Les patients sont souvent pleinement conscients de leurs déficits (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Aphasie de Wernicke : Il s'agit d'une aphasie fluente caractérisée par un discours normal voire logorrhéique. Souvent les patients sont anosognosiques. Dans les formes les plus sévères, le sujet peut produire un jargon. Beaucoup de paraphasies et de néologismes altèrent la qualité du langage. La compréhension quant à elle est très déficitaire (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Aphasie transcorticale motrice : Il s'agit d'une aphasie non fluente souvent liée à une atteinte préfrontale et impliquant l'aire motrice supplémentaire. Le langage oral et écrit est réduit qualitativement et quantitativement. Les phrases sont très courtes et incomplètes. La compréhension est relativement préservée avec un effet de longueur et de complexité. Les persévérations sont nombreuses (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Aphasie transcorticale sensorielle : Il s'agit d'une aphasie fluente caractérisée par un sévère manque du mot, une altération de la compréhension et une alexie-agraphie majeure (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Apraxie de la parole : « Trouble acquis de la capacité à programmer le positionnement de l'appareil buccophonatoire et la séquence des mouvements musculaires nécessaires à la production volontaire des phonèmes, non relié à une paralysie ni à une ataxie de l'appareil articulatoire » (Académie de médecine, 2016).

Apraxie bucco-faciale : Il s'agit d'un trouble neurologique conduisant à une « incapacité à exécuter des mouvements volontaires avec les muscles du larynx, du pharynx, de la langue, des lèvres et des joues, bien que les mouvements automatiques de ces muscles soient préservés » (Rousseau, Lefeuvre et Kozlowki, 2007).

AVC hémorragique : L'AVC hémorragique est le deuxième grand type d'AVC. Il est beaucoup plus rare que les AVC ischémiques. Comme son nom l'indique, l'AVC hémorragique consiste en la formation d'un hématome cérébral. La barrière hémato-encéphalique se rompt à cause d'un processus pathogène (hypertension artérielle, amylose) ou une malformation (dysplasie). Un afflux de sang atteint le parenchyme cérébral et un hématome va donc se former. Celui-ci va faire augmenter la tension intracrânienne et les structures cérébrales se trouvent gravement exposées à un phénomène de compression. Il existe des formes d'hémorragies intracérébrales profondes (causées par la ruptures des artérioles distales et donc au niveau du cortex qui est en périphérie du cerveau) et des hémorragies méningées, ou sous-arachnoïdiennes (qui

concernent donc les espaces sous-arachnoïdiens et qui comprend parfois les ventricules. Une forme mixte est bien sûr possible, il s'agit des hémorragies cérébro-méningées (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

AVC ischémique : Il s'agit d'une occlusion artérielle qui vient causer une ischémie, c'est-à-dire une zone insuffisamment vascularisée. Le territoire cérébral concerné cesse alors de fonctionner. Dans le cadre d'un Accident Ischémique Transitoire (AIT), l'épisode de dysfonctionnement neurologique est bref car l'occlusion se résorbe spontanément. Les séquelles fonctionnelles sont ainsi moins conséquentes car l'ischémie est momentanée. À l'inverse, un accident ischémique non transitoire ne se résorbe pas spontanément. Par opposition aux AIT on parle d'AIC ; il s'agit des AVC ischémiques constitués (aussi appelés infarctus cérébraux). Dans ce contexte lésionnel-là, l'atteinte cérébrale est grave. Autour de la zone d'ischémie où les neurones se nécrosent inéluctablement (appelée aussi « zone de nécrose »), se constitue une zone dite de « pénombre ischémique » (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010). Les neurones qui la constituent sont moins directement touchés car ils peuvent perdurer quelques heures sans apport sanguin suffisant, mais en l'absence d'une prise en charge rapide la zone sera aussi touchée par une mort neuronale. Aujourd'hui, l'urgence au regard des AVC ischémiques est dans la sauvegarde maximale de la zone de pénombre (pour préserver les fonctions cérébrales associées) via deux techniques principales : les thrombolyse (un produit est injecté dans le circuit sanguin pour dissoudre le caillot et reperfusionner la zone de pénombre) et les thrombolectomie (le caillot est extrait par l'introduction d'une sonde dans l'artère). Le principal mécanisme physiopathologique pouvant être à l'origine d'une ischémie cérébrale est l'athérosclérose. Celui-ci conduit à un processus de sténoses des artères et favorise les risques d'occlusion (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Cinématique : Elle concerne le mouvement (TILF).

Dysarthrie : Elle désigne l'ensemble des « perturbations neurologiques affectant exclusivement la production ou la parole et impliquant des distorsions de la voix et de l'articulation dues à un mauvais contrôle des muscles bucco-phonateurs » (Rousseau, Lefevre et Kozlowki, 2007).

Eléctroencéphalographie.(EEG) : Elle désigne une technique de l'enregistrement de l'activité cérébrale. Pour cela elle mesure les différences de potentiels électriques lors des décharges neuronales. Différentes électrodes sont disposées sur la boîte crânienne et enregistrent les ondes. Il s'agit d'une technique non invasive qui offre une meilleure résolution temporelle que spatiale (Purves et al., 2011 ; chp28).

Magnétoencéphalographie (MEG) : La magnétoencéphalographie enregistre les champs magnétiques générés par l'activité cérébrale. Un appareil est utilisé pour stimuler les nerfs et les muscles, et enregistrer leur activité (Purves *et al.*, 2011).

Empathie : L'empathie émotionnelle désigne la capacité à comprendre les états affectifs d'autrui : l'empathie cognitive désigne la capacité à comprendre les états mentaux d'autrui (Brin *et al.*, 2015).

Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle (IRMf) : Il s'agit une technique dite hémodynamique car fondée sur le magnétisme de l'hémoglobine. Elle repose sur le principe physique selon lequel lorsqu'une région cérébrale est activée, elle augmente sa consommation de glucose et d'oxygène. L'IRMf va mesurer le signal BOLD (*Blood oxygenation level-dependent*), c'est-à-dire les variations du degré d'oxygénation du sang, à l'aide d'un aimant. L'hémoglobine oxygénée est diamagnétique, c'est-à-dire qu'elle est peu sensible au champ magnétique, tandis que l'hémoglobine désoxygénée est paramagnétique, et se comporte comme un aimant en présence d'un champ magnétique. Les fluctuations sont

traitées pour établir des cartes des régions cérébrales impliquées dans telle ou telle tâche. Il s'agit d'une technique non invasive largement privilégiée pour étudier les processus cérébraux d'un point de vue spatial. Elle offre une bonne résolution spatiale mais est moins pertinente lors de l'étude de l'activité cérébrale d'un point de vue temporel (Purves *et al.*, 2011, chp1)

Localisationnisme : Il s'agit d'une conception héritée de l'aphasiologie au XIX^{ème} siècle et des travaux de Broca, selon laquelle toute fonction cognitive s'élabore au sein d'aires cérébrales bien délimitées (Chomel-Guillaume, Leloup et Bernard, 2010).

Neurogenèse : La neurogénèse désigne le processus de formation de nouveaux neurones (Purves *et al.*, 2011 chp 25).

Picture Naming Test ou Philadelphia Naming Test (PNT) : Il s'agit d'un test de dénomination d'images. Il comprend 175 items examine ainsi l'accès au stock lexical nominal (Roach, Schwartz, Martin, Grewal et Brecher, 1996).

Potentiels Évoqués Moteurs (PEMs): Ils constituent une technique d'exploration du système nerveux. Les PEMs mesurent la conduction nerveuse et permettent d'apprécier le fonctionnement d'une voie motrice. Ils sont obtenus par une stimulation du cerveau grâce à une bobine magnétique disposée sur la tête et enregistrent les modifications de l'activité électrique en réponse (Purves *et al.*, 2011).

Pseudo-mots : « se dit d'un non-mot ressemblant par son aspect général à un mot signifiant, dont il ne se différencie que par un ou quelques graphèmes (*e.g.* pélévision, pour télévision). Il est non signifiant. (Brin *et al.*, 2015).

Somatotopique : Le principe de somatotopie fonctionnel a été décrit par Penfield et Rasmussen (1950, cité par Pulvermüller, 2005). Il décrit l'organisation topographique du cortex moteur dans le sens où chaque partie du corps humain est associée à un territoire du cortex sensorimoteur (Purves *et al.*, 2011, chp16).

Spectrographique : Il s'agit d'un terme qui concerne l'étude d'un spectrogramme, c'est-à-dire de la « représentation graphique des paramètres acoustiques de la parole avec, en abscisse : le temps, en ordonné : la fréquence indiquant la répartition de l'intensité sonore » (Brin *et al.*, 2015)

Synaptogenèse : la synaptogenèse est un processus plastique à l'échelle des connexions neuronales. Elle désigne le processus de formation de nouvelles synapses. Elle repose sur les principes d'axogenèse et de dendritogenèse ainsi que sur le renforcement de la neurotransmission (Purves *et al.*, 2011, chp25).

Système limbique : « Terme désignant les structures corticales et sous-corticales intervenant dans les émotions ; les éléments les plus importants du système limbique sont le gyrus cingulaire, l'hippocampe et l'amygdale » (Purves *et al.*, 2011, chp29).

Théorie de l'esprit : Capacité à attribuer à l'autre des intentions et des pensées différentes des nôtres (Brin *et al.*, 2015).

Token Test : Le *Token test* est un test standardisé, utilisé en orthophonie pour évaluer la compréhension du langage oral. Le matériel se compose de 20 jetons de 2 formes (carré et rond), 2 tailles (grand et petit) et de 5 couleurs différentes (rouge, noir, jaune, blanc, vert). En

10-15 min, 36 items peuvent être proposés au patient. Il s'agit d'ordres oraux de complexité croissante (« touchez un rond », « touchez le carré jaune », « touchez le petit rond blanc », « touchez le rond rouge et le carré vert », « touchez le grand rond blanc et le petit carré vert », « mettez le rond rouge sur le carré vert »). Les sujets n'ont donc aucune production verbale à effectuer, ils doivent simplement manipuler les objets ce qui atteste de leur niveau de traitement des énoncés oraux, et des processus de mémoire à court terme (*i.e.* empan verbal) (De Renzi et Vignolo, 1962; Mazaux, Dehail, Daviet, Pradat-Diehl et Brun, 2007).

Western Aphasia Battery (WAB) : Ce test anglo-saxon est couramment utilisé dans la profession. Il permet une évaluation subjective du langage sur les versants de la compréhension et de la production. Il propose des épreuves de désignation, de réponses à des questions, d'exécution d'ordre, de dénomination, de fluence, d'évocation, de complétion de phrases (Kertesz, 1982).

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Travail préliminaire d'appropriation des pré-requis et du cadre théorique

Notre travail de recherche se fonde sur plusieurs pré-requis théoriques en neuroanatomie, en neurophysiologie, en neuroimagerie, en psycholinguistique, en neuropsychologie cognitive, en orthophonie ainsi qu'en aphasiologie. Nous avons dans cette perspective consulté des manuels d'enseignement supérieur, des ouvrages spécialisés, des revues ou méta-analyses, et des sites officiels d'organismes ou d'institutions de notoriété publique. Les ressources les plus récentes ont été privilégiées. À propos des neurones miroirs, l'ouvrage de synthèse de Rizzolatti et Sinigaglia (2008), en français, a constitué une base certaine.

Afin de nous approprier la terminologie anglaise des articles sélectionnés, nous avons utilisé le dictionnaire en ligne : On-line Medical Dictionary, licencié par Mondofacto (sur : <http://www.mondofacto.com/dictionary/>).

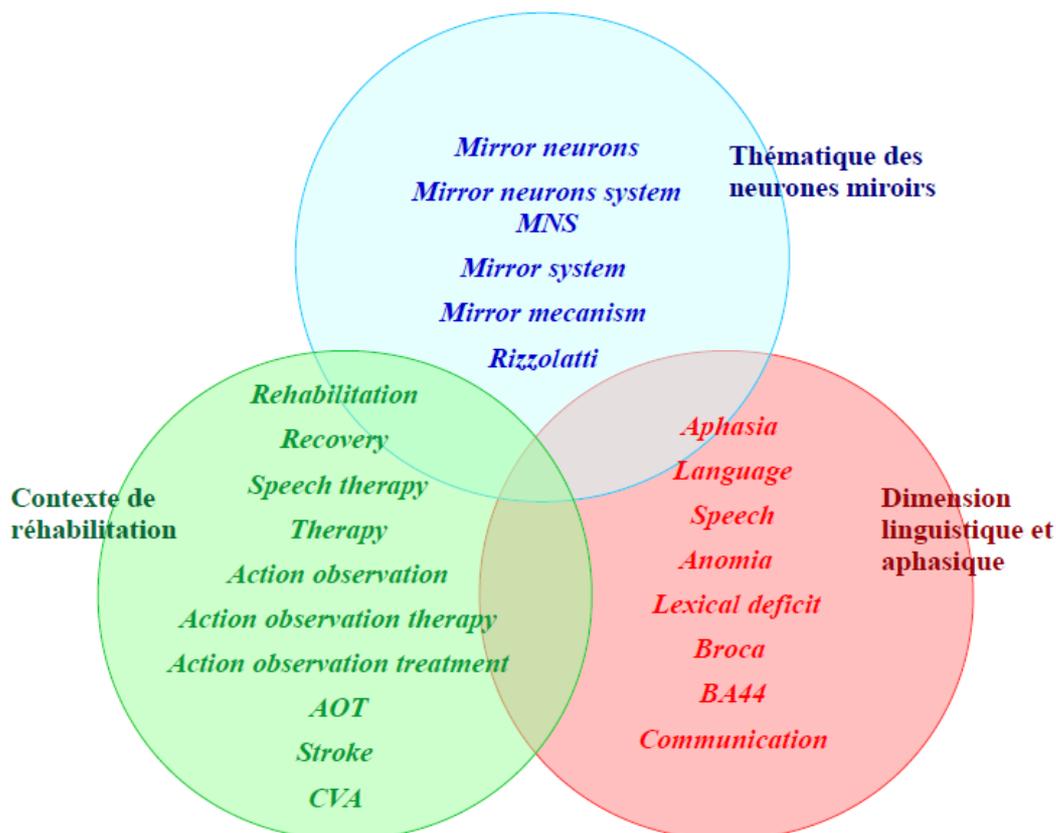
Exploration bibliographique

Pour constituer la bibliographie du mémoire, deux dynamiques ont été utilisées :

- une exploration simple sur des bases de recherche
- une exploitation des références bibliographiques

Définition des mots clés

La première étape de notre travail bibliographique a consisté à définir des mots clés et construire des équations de recherche. Notre problématique est l'articulation de trois grandes dimensions : la thématique des neurones miroirs (en bleu), le contexte de réhabilitation (en vert), et la dimension linguistique et aphasique (en rouge). Différents mots clés ont été définis pour chaque axe. Au vu de nos premiers résultats et du caractère contemporain de notre thématique de recherche, le lexique anglais a été employé de manière exclusive. Les algorithmes de recherche ont essayé de tenir compte au maximum des trois dimensions mais ils ont parfois simplement articulé deux d'entre elles car trop peu de résultats étaient proposés.



Pour toute autre recherche complémentaire, nous avons croisé la thématique des neurones miroirs avec les termes qui nous questionnaient (*e.g.* autism, embodied cognition, motor theory or speech perception).

Définition des critères de sélection et d'exclusion

Ont été inclus et priorisés dans notre revue :

- Les articles les plus contemporains ont été privilégiés, et notamment ceux postérieurs à 2010
- Nous avons essayé autant que possible de favoriser une grande diversité d'auteurs
- Les articles les plus cités ont été priorisés
- Tous les types de publications (revue, méta-analyse, expérimentation) ont été inclus

Ont été exclus ou relégués :

- Les articles dans une autre langue que l'anglais ou le français (des articles en japonais et en allemand notamment n'ont pas été intégrés)
- Les articles trop éloignés de notre thématique qui traitent exclusivement de l'exploitation des neurones miroirs en réhabilitation motrice (*e.g.* hémiplégie, hémiparésie, SDRC) ou en psychopathologie (*e.g.* autisme, schizophrénie)
- Les articles trop éloignés de notre thématique qui traitent de l'exploitation des neurones miroirs dans des troubles du langage trop éloignés de l'aphasie (*e.g.* bégaiement, maladie de Parkinson)
- Les articles trop éloignés de notre thématique qui traitent effectivement des neurones miroirs mais sur un plan trop neurophysiologique ou neuroanatomique par rapport à notre recherche
- Les articles jugés trop courts ou trop redondants par rapport aux autres

Une première sélection a été effectuée à partir de la lecture du titre, des mots clés, de l'abstract et de la conclusion. L'ensemble des résultats a été reporté dans un tableur organisé en grandes thématiques et hiérarchisé par des priorités de lecture.

Définition des moteurs de recherche et des bases de données bibliographiques

Moteurs de recherches et bases de données bibliographiques exploités :

- PubMed
- Sudoc
- Google Scholar
- Cairn
- Frontiers
- Nantilus (catalogue des bibliothèques de l'Université de Nantes)
- Researchgate (avec une veille documentaire)

Une recherche dans des revues plus spécialisées en orthophonie a été effectuée. Notre objectif était ainsi d'avoir une meilleure représentation de l'état des connaissances de la profession sur notre domaine de recherche. Ces revues sont :

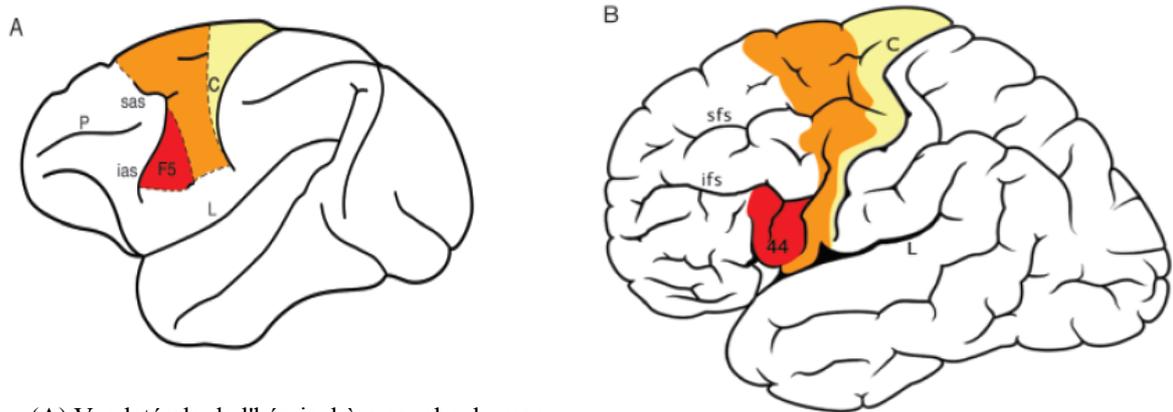
- *Glossa*
- *Rééducation orthophonique*
- *Orthophonie magazine*
- *International Journal of Speech-Language Pathology*
- *Aphasiology*
- *Journal of speech language and hearing research*

Exploration bibliographique rétrograde

Un autre aspect de la recherche bibliographique a consisté en une exploitation des bibliographies des articles sélectionnés lors de l'exploitation sur des bases de recherche. Les références fréquemment citées ont été particulièrement privilégiées. Nous avons aussi effectué, de manière moins systématique une recherche bibliographique à partir des noms des chercheurs récurrents (*e.g.* Rizzolatti, Pulvermüller, Boulenger). Leurs pages universitaires ont aussi été consultées.

FIGURES

Figure 1 : *Homologie anatomique entre l'aire F5 du singe et l'aire BA44 de l'homme*

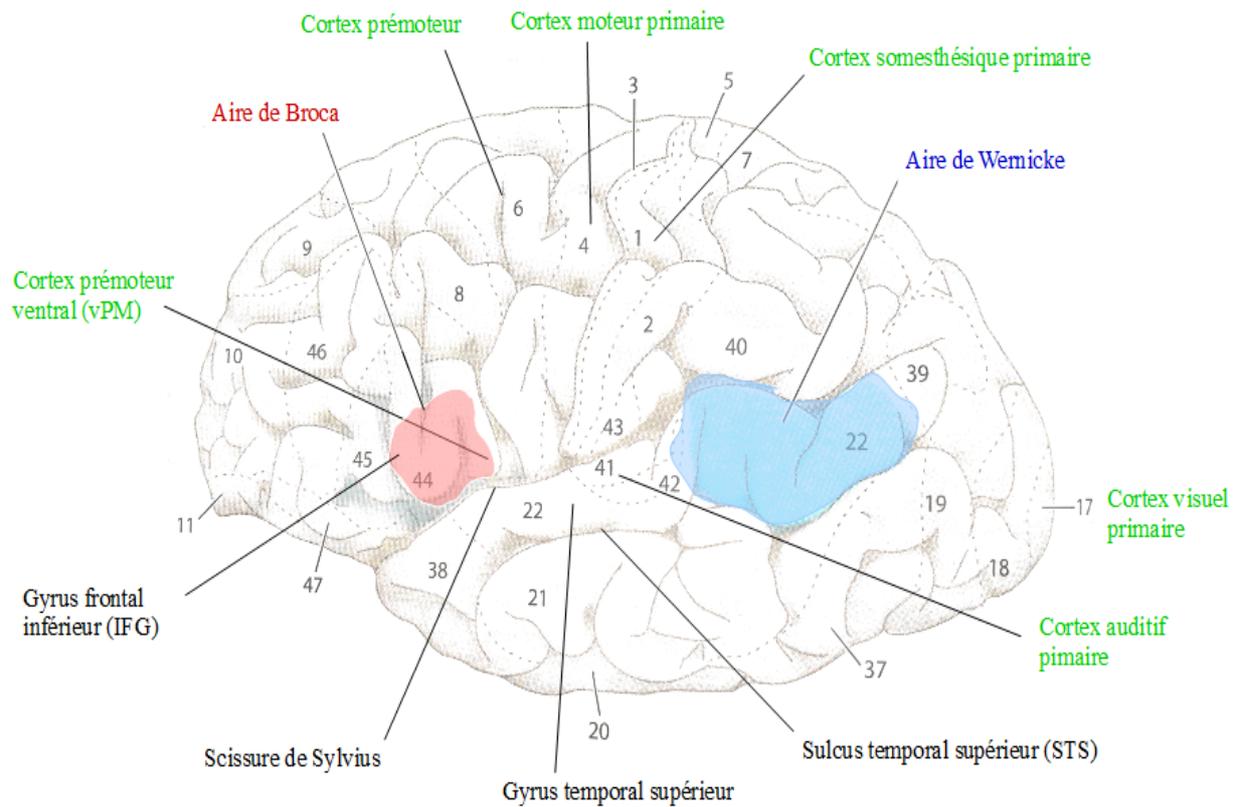


(A) Vue latérale de l'hémisphère gauche du macaque.

(B) Vue latérale de l'hémisphère gauche de l'homme.

Les régions colorées permettent une mise en évidence de l'homologie fonctionnelle entre différentes aires corticales. En jaune, le **cortex moteur**. En orange, le **cortex prémoteur**. En rouge, l'aire **F5** et **BA44** du singe et de l'homme respectivement. Elles sont situées dans le gyrus frontal inférieur (IFG) et intègrent le système prémoteur (vPM) (issu de Fogassi et Ferrari, 2007, titre et légende librement modifiés).

Figure 2 : *Vue latérale de l'HG de l'homme : anatomie et organisation neurofonctionnelle*



En noir : Structures anatomiques. En vert : Aires neurofonctionnelles

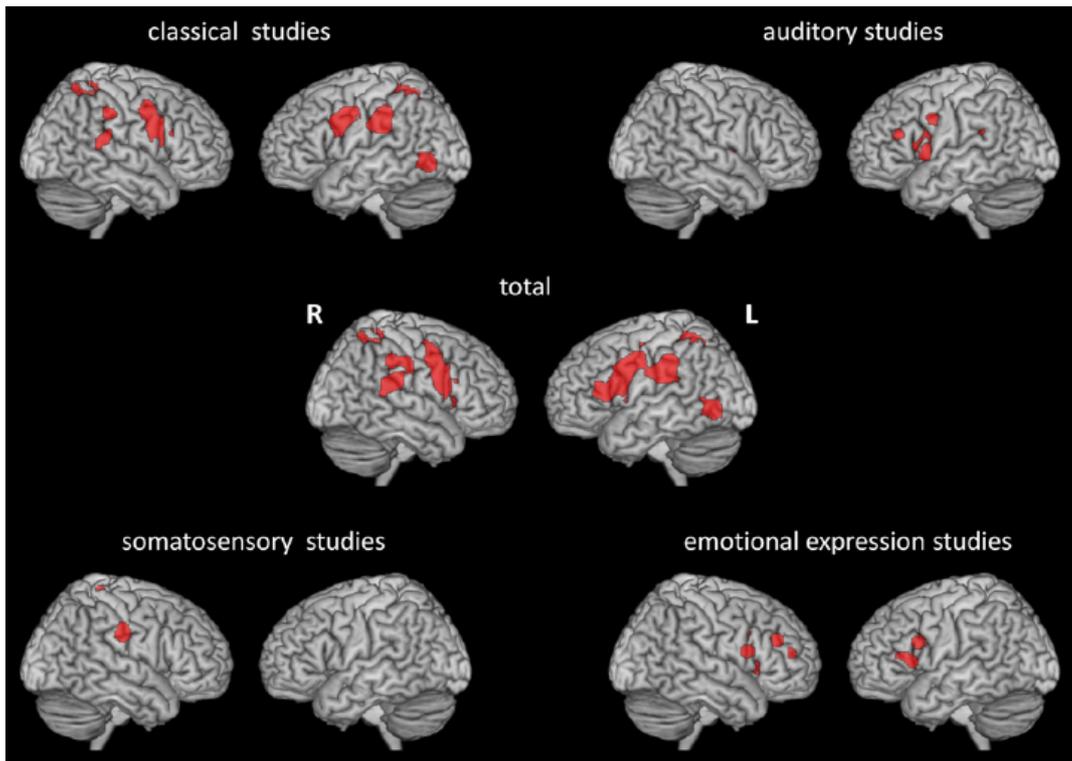
En rouge : l'aire de Broca (BA44 ou *pars opercularis*) dans le lobe frontal. En profondeur elle est bordée par l'insula. En bleu : l'aire de Wernicke. Les nombres correspondent à la classification cytoarchitectonique classique de Brodmann.

Cortex moteur = BA4. Cortex pré moteur = BA6.

IFG : se compose de la *pars opercularis* (Broca, ou BA44), de la *pars triangularis* (BA45) et de la *pars orbitalis* (BA47). Il se situe dans le lobe frontal, au dessus de la scissure de Sylvius et se rattache l'aire pré motrice ventrale (vPM).

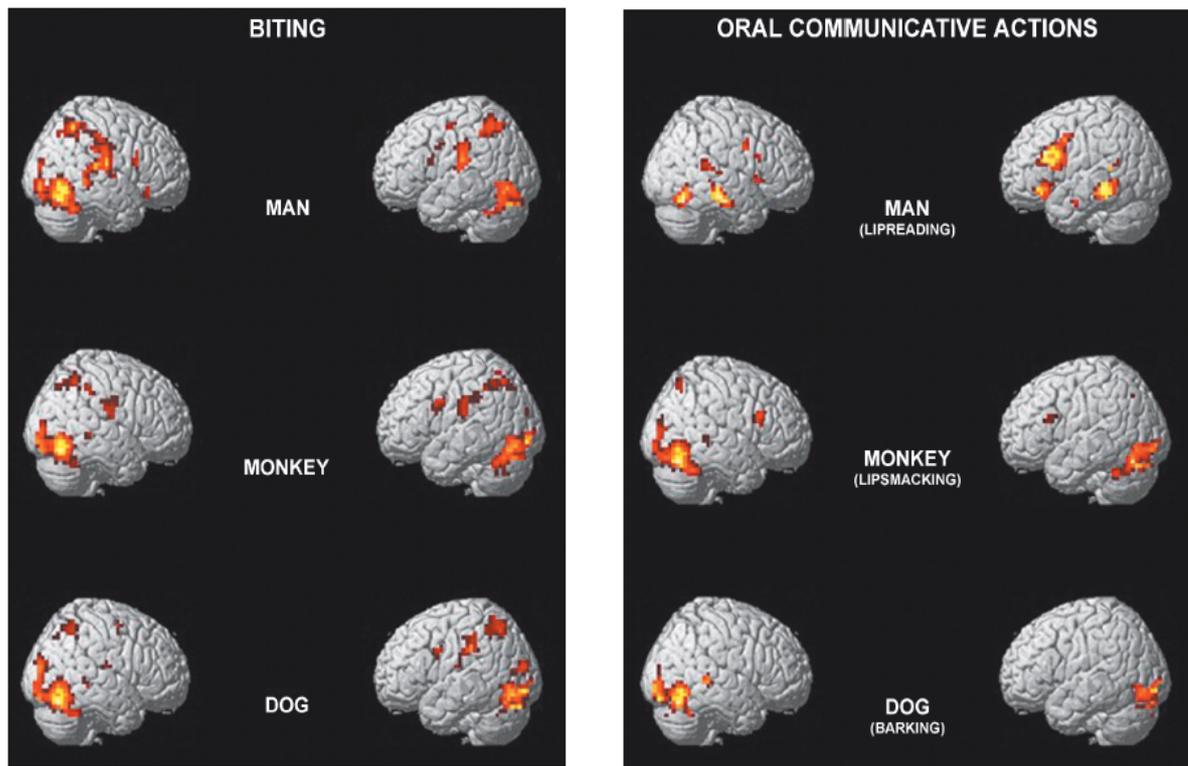
(réalisé librement à partir de Purves *et al.*, 2011, chp26, p.690 et Netter, 2015, planche n°106)

Figure 3 : Localisation des zones corticales aux propriétés miroirs dans différents contextes de stimulation



Vues latérales de l'HG et de l'HD de l'homme. En rouge, les zones miroirs recrutées lors de différentes modalités de stimulation. En haut à gauche les zones miroirs recrutées lors de stimuli visuomoteurs. En haut à droite, les zones recrutées lors de stimuli auditifs. En bas à gauche, les zones miroirs recrutées lors de l'observation d'actions somatosensorielles sur un tiers. En bas à droite, les zones miroirs recrutées lors de l'observation d'émotions. Au centre, synthèse des zones corticales aux propriétés miroirs (issu de Molenberghs *et al.*, 2011 ; titre et légende librement modifiés).

Figure 4 : *Comparaison de l'activité corticale de l'homme, lors de l'observation d'actions alimentaire vs communicative en fonction de l'espèce de l'agent*



À gauche : activité corticale, chez l'homme (HD et HG), lors de l'observation d'une action à finalité alimentaire, effectuée par un pair (en haut), un singe (au milieu), un chien (en bas). L'activité cérébrale est très proche quelle que soit l'agent de l'action.

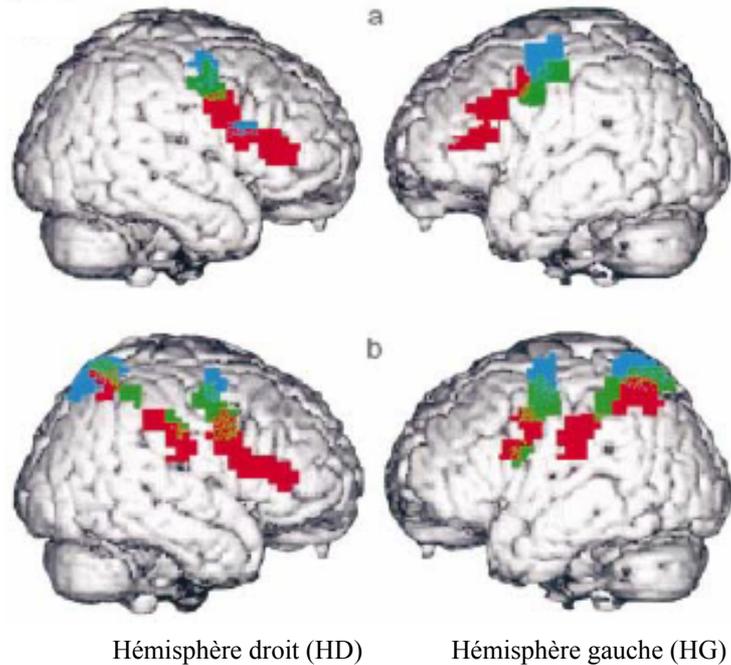
À droite : activité corticale, chez l'homme (HD et HG), lors de l'observation d'une action à finalité communicative : un homme qui parle (en haut), un singe qui claque ses lèvres (au milieu), un chien qui aboie (en bas). L'observation de la parole d'un pair active très fortement la partie postérieure de l'IFG, c'est-à-dire BA44. Cette activation est plus faible dans le cadre de l'observation du singe, et elle est inexistante face au chien (issu de Buccino *et al.*, 2004 ; titre et légende librement modifiés).

Figure 5 : *Séance de rééducation de la paralysie faciale périphérique par « effet miroir »*



Le patient fait face à un écran qui recompose son visage par le dédoublement informatique de son hémiface non paralysée. Un visage symétrique et fonctionnel est ainsi recomposé. Par des exercices pratiques, le patient fait l'expérience virtuelle d'un visage intègre. L'observation du visage induit un recrutement des neurones miroirs rattachés aux fonctions déficitaires (issu de Blanchin *et al.*, 2013 ; titre et légende librement modifiés).

Figure 6 : *Activation somatotopique du MNS selon l'effecteur de l'action en jeu*

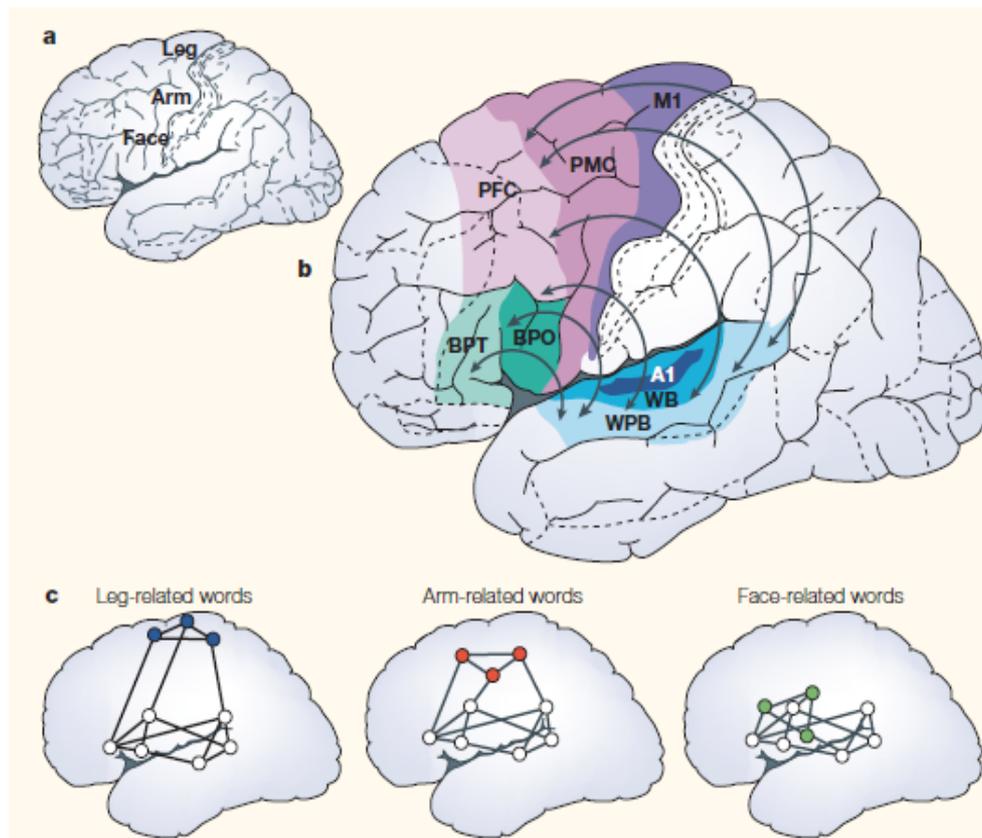


- (a). Activité cérébrale lors de l'observation d'actions intransitives,
(b). Activité cérébrale lors de l'observation actions transitives.

Les zones activées lors de l'observation des actions du **pied** sont représentées en bleu : il s'agit du **secteur dorsal du gyrus précentral de HD et HG** . Les zones recrutées par l'observation d'actions **manuelles** sont représentées en vert : il s'agit de la **partie supérieure du gyrus précentral (BA6) de HD et HG** , et de la **pars opercularis de l'IFG gauche (i.e. BA44) (b, HG)** . Les zones activées lors de l'observation des actions **orales** sont représentées en rouge : il s'agit de **BA6, BA44 et BA45 de HD et HG** .

L'observation d'actions induit un recrutement somatotopique en miroir. À chaque effecteur en jeu correspond un territoire miroir privilégié. Cette organisation somatotopique n'est pas sans évoquer celle de Penfield et Rasmussen en 1950. (issu de Buccino *et al.*, 2001 ; titre et légende librement modifiés).

Figure 7 : Somatotopie corticale des réseaux neuronaux miroirs impliqués dans le traitement des mots d'action



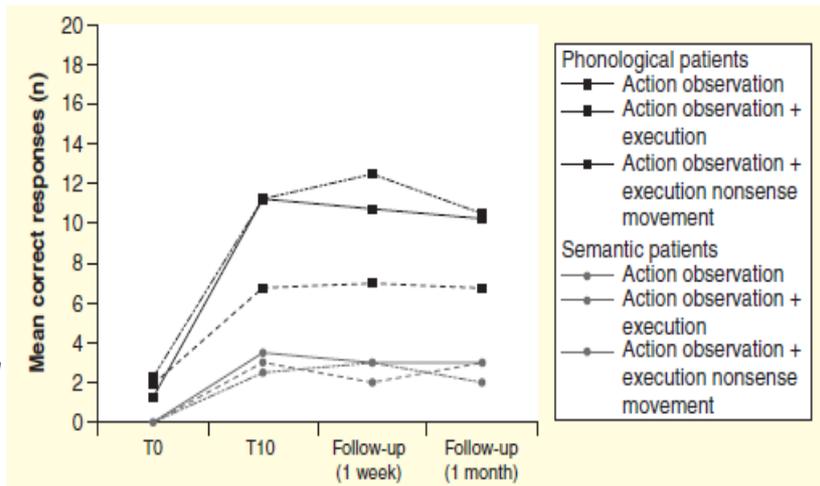
(a) Somatotopie des cortex moteur et prémoteur. Topographie des réseaux neuronaux impliqués dans des actions effectuées par les jambes ("leg"), les mains ("arm"), le visage ("face").

(b) Représentation de l'interaction entre les zones corticales impliquées dans le langage et celles du système moteur. M1 : aire motrice primaire ; PMC : cortex prémoteur ; PFC : cortex préfrontal ; A1 : centre du cortex auditif primaire ; BPO : pars opercularis/BA44/Aire de Broca ; BPT : pars triangularis ; WB et WPB : aires auditives de l'aire de Wernicke.

(c) Les ronds blancs représentent le recrutement des aires langagières. En bleu, les mots d'actions des membres inférieurs recrutent les programmes moteurs de la partie dorsale du cortex moteur. En rouge, les mots d'actions des membres supérieurs recrutent les programmes moteurs de la partie latérale des aires motrices. En vert, les mots d'actions de la sphère orale recrutent les programmes moteurs de la partie ventrale du cortex moteur. La topographie corticale des trois types de mots d'actions suit l'organisation somatotopique du cortex moteur de Penfield et Rasmussen (1950, cité par Pulvermüller, 2005)

(issu de Pulvermüller, 2005 ; titre et légende librement modifiés).

Figure 8 : *Évolution des capacités de dénomination de mots d'actions après AOT chez des sujets aphasiques avec déficit phonologique vs déficit sémantique*



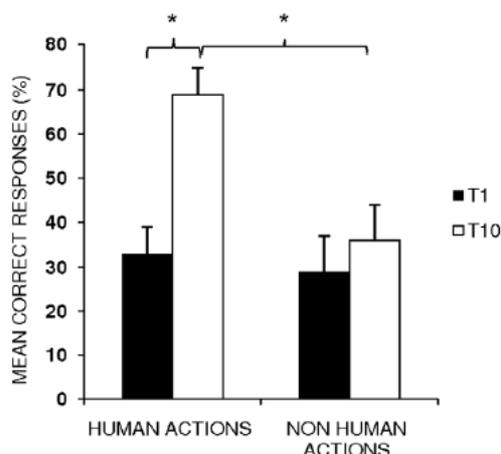
En abscisse : le nombre de mots d'action correctement nommés par session.

En ordonnée : les quatre temps d'évaluation prévus dans le protocole. "T0" : évaluation pré-test ; "T10" : évaluation post-test, "Follow-up (1 week)" : évaluation 1 semaine après le traitement ; "Follow-up (1 month)" : évaluation 1 mois après le traitement. Ces deux dernières mesures visent à évaluer le maintien dans

le temps de l'accès au stock lexical verbal. En noir : les patients avec déficit phonologique En gris : les patients avec déficit sémantique

Le graphique met en évidence une amélioration des capacités d'accès au stock lexical verbal dans le cadre d'une stimulation par AOT, pour les patients avec aphasie d'origine phonologique. L'exécution d'une action sans lien avec le stimulus altère l'effet facilitateur de l'observation sur la dénomination. Les patients avec déficit sémantique ne voient pas leurs compétences d'accès au lexique verbal s'accroître (issu de Marangolo *et al.*, 2013 ; titre et légende librement modifiés).

Figure 9 : *Évolution des compétences en dénomination de mots d'actions humaines vs non humaines après AOT chez des sujets aphasiques avec déficit phonologique*



"Human actions" : évolution des compétences en dénomination de mots d'actions humaines, c'est-à-dire faisant partie du répertoire sensorimoteur des sujets, après stimulation par AOT.

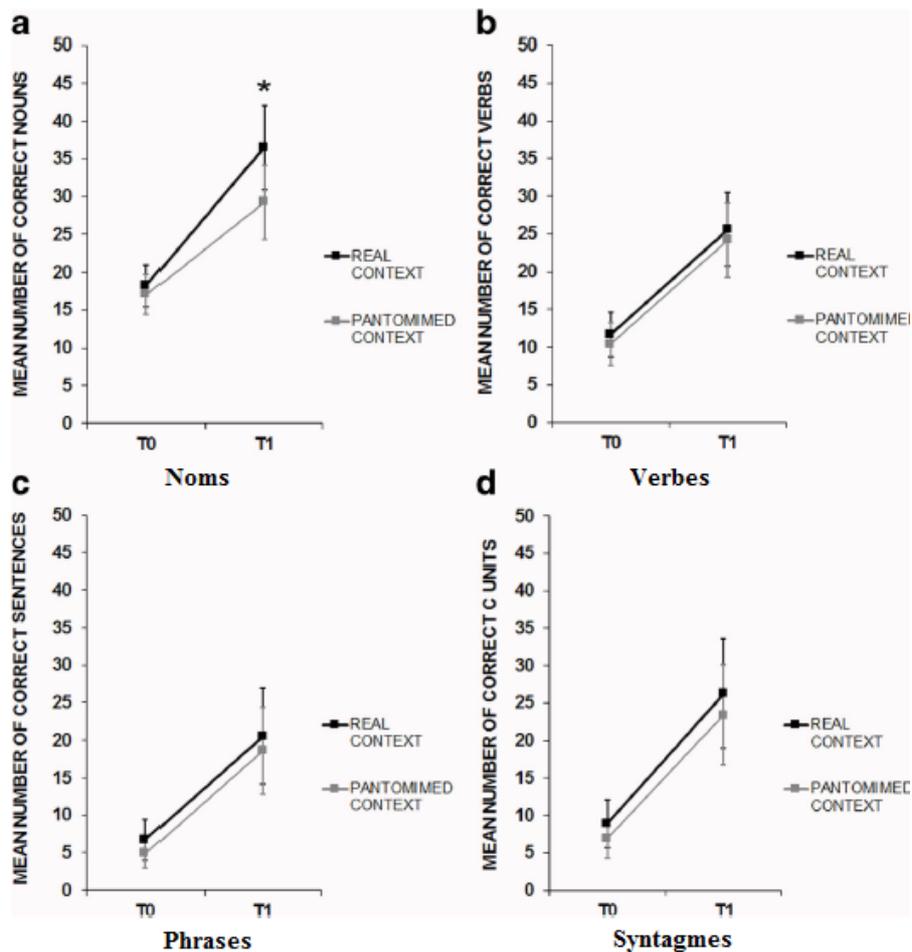
"Non human actions" : évolution des compétences en dénomination de mots d'actions non humaines, c'est-à-dire ne faisant pas partie du répertoire sensorimoteur des sujets, après stimulation par AOT.

T1 (en noir) : compétences en pré-test

T0 (en blanc) : compétences en post-test

Le graphique montre que l'observation répétée d'actions appartenant au répertoire moteur du sujet améliore significativement la capacité de ce dernier à les dénommer. À l'inverse, l'observation d'actions ne faisant pas partie du répertoire sensorimoteur de l'observateur n'induit pas d'amélioration significative de l'accès au stock lexical verbal (issu de Marangolo *et al.*, 2012 ; titre et légendes librement modifiés).

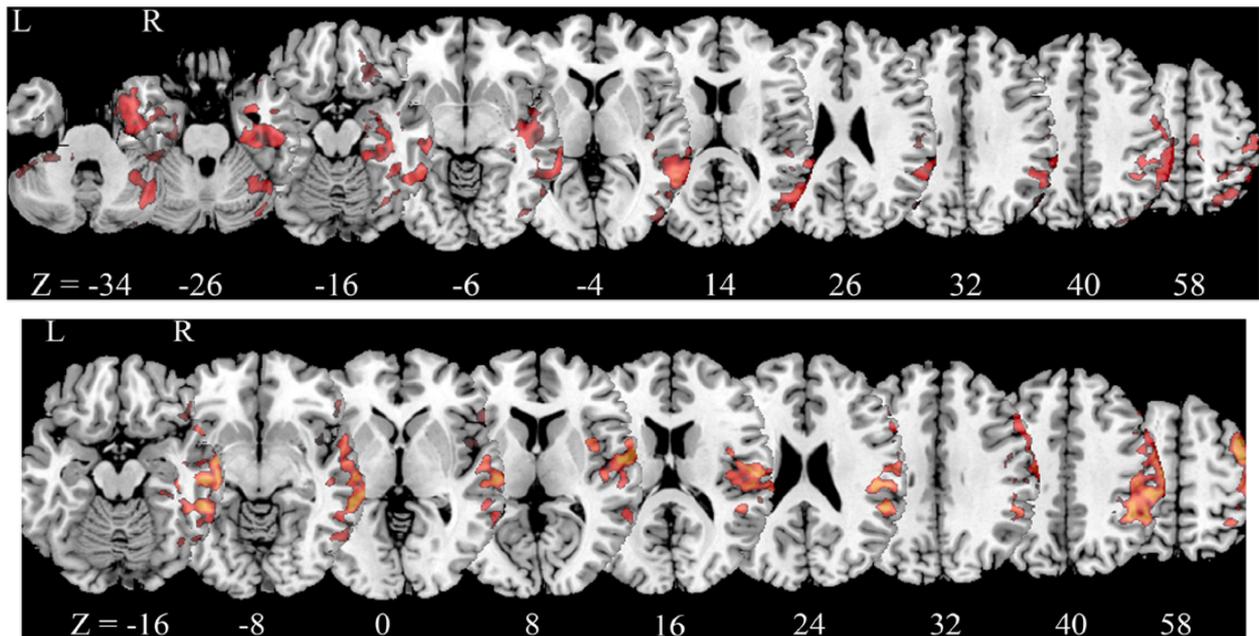
Figure 10 : *Amélioration des compétences linguistiques du sujet aphasique après AOT*



- (a) nombres de noms pertinents lors du récit oral d'une séquence filmée.
 - (b) nombres de verbes pertinents lors du récit oral d'une séquence filmée.
 - (c) nombres de phrases pertinentes lors du récit oral d'une séquence filmée.
 - (d) nombres de syntagmes pertinents lors du récit oral d'une séquence filmée.
- En noir : performances des sujets aphasiques ayant observé une séquence vidéo mettant en scène des actions non mimées.
En gris : performances des sujets aphasiques ayant observé une séquence vidéo mettant en scène des actions mimées.

Les différents graphiques illustrent l'amélioration du langage oral chez tous les sujets aphasiques lors d'une tâche de récit après une stimulation par AOT. L'accès au stock lexical nominal (*i.e.* noms d'objets) est significativement meilleure chez les sujets ayant observés des actions non mimées (a). (issu de Gili *et al.*, 2006 ; titre et légendes librement modifiés).

Figure 11 : Réorganisation plastique des réseaux du langage oral et investissement de l'hémisphère droit chez le sujet aphasique, après AOT



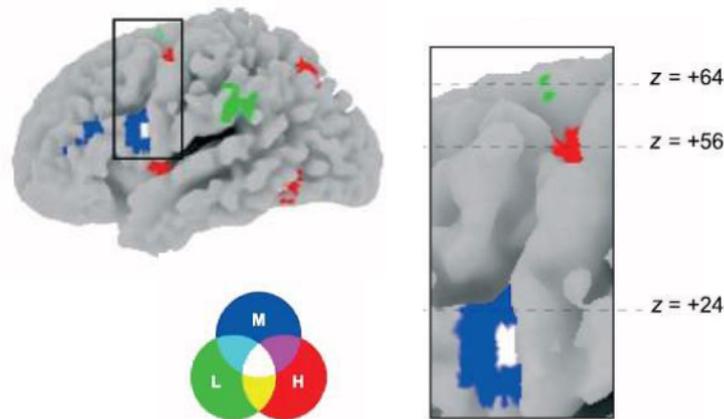
Les zones colorées correspondent aux régions corticales qui montrent une plus grande activité lors d'une tâche de récit oral après une stimulation par AOT.

En rouge (en haut) : l'aire BA6 (du cortex moteur et de l'aire motrice supplémentaire) et sa connectivité accrue avec les gyrus temporal supérieur, transverse et inférieur droits, le gyrus supramarginal droit, le gyrus fusiforme droit, l'hémisphère cérébelleux droit, le lobe pariétal inférieur droit, ainsi que l'hippocampe et les amygdales de l'HD.

En orange (en bas) : l'aire BA21 et sa connectivité accrue avec les gyrus temporal et inférieur droits, le gyrus supramarginalis droit, le lobe pariétal inférieur droit, les gyrus précentral et post-central droits, l'IFG droit, et le gyrus fusiforme droit.

(issu de Gili *et al.*, 2016 ; titre et légende librement modifiés).

Figure 12 : *Somatotopie corticale des réseaux neuronaux impliqués dans le traitement passif des phrases orales exprimant une action du pied, de la main ou de la bouche*



Les aires colorées correspondent aux zones recrutées lors du traitement de différentes phrases orales.

En vert : zones corticales impliquées lors du traitement des phrases exprimant une action avec le pied. Il s'agit de : BA44, la partie dorsale du cortex prémoteur gauche (qui correspond à la région des représentations du pied) et le lobe pariétal inférieur gauche.

En rouge : les zones corticales impliquées lors du traitement des phrases exprimant une action avec la main. Il s'agit de : vPM gauche (qui correspond à la région des représentations de la main), BA44, la *pars triangularis* de l'IFG, le sillon postérieur intrapariétal gauche, la partie inféro-postérieure du gyrus temporal gauche, l'insula gauche.

En bleu : zones corticales impliquées lors du traitement des phrases exprimant une action avec la bouche Il s'agit de : BA44, la *pars triangularis* de l'IFG et la partie la plus rostrale du cortex prémoteur gauche (qui correspond à la région des représentations du pied).

En blanc : zone corticale commune impliquée dans le traitement des phrases exprimant des actions manuelles, de la bouche ou du pied. Il s'agit de BA44.

L'écoute passif de phrases d'actions induit un recrutement somatotopique en miroir. À chaque effecteur induit par la phrase et le verbe correspond un territoire cortical privilégié.

(issu de Tettamanti *et al.*, 2005 ; titre et légendes librement modifiés).

TABLEAU

Tableau 1 : *Synthèse des études expérimentales citées exploitant les neurones miroirs auprès de sujets aphasiques*

Référence	Nb	Objectif	Types d'aphasie	Étiologie	Chronicité de l'aphasie post-AVC	Intensivité de la stimulation
Arya et Pandian, 2014	1	Production orale	Aphasie non fluente	AVC gauche	«chronique»	45 séances pdt 3 mois
Lee <i>et al.</i> , 2010	5	Production orale lexicale et syntaxique	tableaux hétérogènes	nc	nc	6 semaines 6 jours / semaine 3x par jour 1h30 par jour 30min par session
Marangolo <i>et al.</i> , 2010	6	Accès au stock lexical verbal en production	Aphasie non fluente d'origine phonologique (4) vs sémantique (2)	AVC gauche	1 à 5 ans	2 semaines 3 jours / semaine 3x par jour 2h par jour Env 40min par session
Marangolo <i>et al.</i> , 2012	7	Accès au stock lexical verbal en production	Aphasie non fluente d'origine phonologique	AVC gauche	11 mois à 10 ans	2 semaines 5 jours / semaine 1x par jour 2h par jour 2h par session
Bonifazi, <i>et al.</i> , 2013	6	Accès au stock lexical verbal en production	Aphasie non fluente d'origine phonologique (4) vs sémantique (2)	AVC gauche	15 mois à 5 ans	2 semaines 5 jours / semaine 4x par jour Env 2h30 par jour Env 40 min par session
Routhier <i>et al.</i> , 2015	2	Production orale du lexique verbal	Aphasie non fluente	AVC gauche	9 à 37 ans	3 semaines 3 jours / semaine 1x par jour 1h30 par jour 1h30 par session
Chen <i>et al.</i> , 2015	6	Production orale et compréhension orale et écrite du langage	Aphasie non fluente, sans autre précision	AVC gauche	non chronique (+ 2 mois de AVC)	3 semaines 6 jours / semaine 1x par jour 30 min par jour 30 min par session
Gili <i>et al.</i> , 2016	10	production orale lexicale nominale et verbale, syntaxe et compétences discursives	Aphasie non fluente, sans autre précision	AVC gauche	1 à 7 ans	6 semaines 5 jours / semaine 1x par jour 1h30 par jour 1h30 par session
Durand <i>et al.</i> , 2017	10	Production orale du lexique verbal	Aphasie non fluente	nc	23 mois à 34 ans	5 semaines 3 jours / semaine 1x par jour 1h par jour 1h par session

Stimulation proposée	Efficacité significative sur	Maintien dans le temps	Généralisation aux items non traités	INF	Trouble associés	Cités
stimulation motrice du membre supérieur droit par <i>mirror therapy</i>	1/1	non prévu dans le protocole	non prévu dans le protocole	aucune	hémiparésie droite	6
Observation de clips audiovisuels de la production de mots et de phrases, énoncées par 6 locuteurs différents puis répétition	nc	+ 6 semaines	non prévu dans le protocole	IRMf	nc	68
Observation de clips audiovisuels d'actions puis dénomination	4/4 aphasiques avec déficit phonologique 0/2 aphasiques avec déficit sémantique	+1 semaine +1 mois +2mois Significatif pour 6/7 sujets	non prévu dans le protocole	aucune	aucun	61
Observation de clips audiovisuels d'actions humaines vs non humaines puis dénomination	6/7	+1 mois +2 mois Significatif	Différents selon les tâches proposées	aucune	aucun	25
Observation d'actions réelles (effectuées par l'examineur) vs virtuelles (diffusées par clip audiovisuel) puis dénomination	4/4 aphasiques avec déficit phonologique 0/2 aphasiques avec déficit sémantique	aucune	non prévu dans le protocole	aucune	aucun	22
Observation de clips audiovisuels d'actions puis dénomination avec indexage sémantique et phonologique si besoin	2/2	+8 semaines Significatif	non significative	aucune	hémiparésie droite Déficit de MDT	3
Observation de clips audiovisuels d'actions vs d'objets statiques puis répétition du lexique nominal en jeu	6/6	non prévu dans le protocole	Différents selon les tâches proposées	IRMf	hémiparésie droite pour certains	8
Observation d'un séquence vidéo d'actions réelles vs mimées puis narration	10/10	non prévu dans le protocole	non prévu dans le protocole	IRMf	aucun	0
nc	nc	+2 mois + 6 mois	nc	nc	nc	0

nb : nombre de participants à l'expérimentation
nc : non communiqué
INF : recours à une technique de neuroimagerie
Cité : index de citation d'après PubMed

BIBLIOGRAPHIE

- Ahlsén, E. (2008). Embodiment in communication, aphasia, apraxia and the possible role of mirroring and imitation. *Clinical Linguistics et Phonetics*, 22(4-5), 311-315. doi : 10.1080/02699200801918879
- Arbib, M. A. (2005). From Monkey-like Action Recognition to Human Language : An Evolutionary Framework for Neurolinguistics. *Behavioral and Brain Sciences*, 28(2), 105-124. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16201457>
- Arbib, M. A. (2008). From grasp to language : embodied concepts and the challenge of abstraction. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1-3), 4-20. doi : 10.1016/j.jphysparis.2008.03.001
- Arbib, M. A. (2013). Precis of how the brain got language : the mirror system hypothesis. *Language and Cognition*, 5(2-3), 107-131. doi : 10.1515/langcog-2013-0007
- Arévalo, A., Baldo, J., González-Perilli, F., et Ibáñez, A. (2015). Editorial : What can we make of theories of embodiment and the role of the human mirror neuron system? *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. doi : 10.3389/fnhum.2015.00500
- Arya, K. (2016). Underlying neural mechanisms of mirror therapy: Implications for motor rehabilitation in stroke. *Neurology India*, 64(1), 38. doi : 10.4103/0028-3886.173622
- Arya, K. N., et Pandian, S. (2014). Inadvertent recovery in communication deficits following the upper limb mirror therapy in stroke : A case report. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 18(4), 566-568. doi : 10.1016/j.jbmt.2014.02.005
- Aziz-Zadeh, L., et Damasio, A. (2008). Embodied semantics for actions : Findings from functional brain imaging. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1-3), 35-39. doi : 10.1016/j.jphysparis.2008.03.012
- Aziz-Zadeh, L., et Ivry, R. B. (2009). The Human Mirror Neuron System and Embodied Representations. In D. Sternad (Éd.), *Progress in Motor Control* (Vol. 629, p. 355-376). Boston, MA: Springer US. doi : 10.1007/978-0-387-77064-2_18
- Aziz-Zadeh, L., Koski, L., Mazziotta, J., et Iacoboni, M. (2006). Lateralization of the Human Mirror Neuron System. *Journal of Neuroscience*, 26(11), 2964-2970. doi : 10.1523/JNEUROSCI.2921-05.2006
- Aziz-Zadeh, L., Wilson, S. M., Rizzolatti, G., et Iacoboni, M. (2006). Congruent Embodied Representations for Visually Presented Actions and Linguistic Phrases Describing Actions. *Current Biology*, 16(18), 1818-1823. doi : 10.1016/j.cub.2006.07.060
- Baruffa, M. (2013). *Facilitation du geste articulatoire labial, grâce à l'audition de syllabes impliquant les lèvres ainsi qu'à l'observation des gestes labiaux associés, appliquée à la dysarthrie hypokinétique* (Mémoire en vue de l'obtention du master en sciences psychologiques et de l'éducation orientation logopédie). Document non publié. Université catholique de Louvain.
- Behme, C. (2014). The role of mirror neurons in language acquisition and evolution. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(02), 192-193. doi : 10.1017/S0140525X13002203
- Bernardis, P., et Gentilucci, M. (2006). Speech and gesture share the same communication system.

Neuropsychologia, 44(2), 178-190. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2005.05.007

- Berquin, A., Leroy, B., Mouraux, D., et Voodecker, P. (2015). Des miroirs pour traiter la douleur, pourquoi ? *Douleurs : Evaluation - Diagnostic - Traitement*, 16(3), 124-130. doi : 10.1016/j.douleur.2015.04.002
- Bhogal, S. K., Teasell, R., Speechley, M., et Albert, M. L. (2003). Intensity of Aphasia Therapy, Impact on Recovery Aphasia Therapy Works. *Stroke*, 34(4), 987-993. doi : 10.1161/01.STR.0000062343.64383.D0
- Blanchin, T., Martin, F., et Labbe, D. (2013). Rééducation des paralysies faciales après myoplastie d'allongement du muscle temporal. Intérêt du protocole « effet-miroir ». *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique*, 58(6), 632-637. doi : 10.1016/j.anplas.2013.03.001
- Bonifazi, S., Tomaiuolo, F., Altoè, G., Ceravolo, M. G., Provinciali, L., et Marangolo, P. (2013). Action observation as a useful approach for enhancing recovery of verb production: new evidence from aphasia. *European journal of physical and rehabilitation medicine*, 49(4), 473-481. doi : Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23486304>
- Bonini, L. (2016). The extended mirror neuron network : anatomy, origin, and functions. *The Neuroscientist*, 23(1), 56-67. doi : 10.1177/1073858415626400
- Boulenger, V. (2006). *Le Langage et l'Action: Dynamique des Liens Fonctionnels unissant Verbes d'Action et Contrôle Moteur* (thèse de doctorat de neuropsychologie). Université Lumière Lyon I, Lyon. Repéré à http://www.ddl.ish-lyon.cnrs.fr/fulltext/Boulenger/Boulenger_2006_These.pdf
- Brin F., Courrier C., Lederlé E., et Masy V., (2011). *Dictionnaire d'orthophonie*. Isbergues: Ortho Edition.
- Brown, E. C., et Brüne, M. (2014). Reward in the mirror neuron system, social context, and the implications on psychopathology. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(02), 196-197. doi : 10.1017/S0140525X13002240
- Buccino, G. (2014). Action observation treatment : a novel tool in neurorehabilitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 369(1644), 20130185-20130185. doi : 10.1098/rstb.2013.0185
- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., ... Freund, H.-J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study: Cortical activation during action observation. *European Journal of Neuroscience*, 13(2), 400-404. doi : 10.1111/j.1460-9568.2001.01385.x
- Buccino, Giovanni, Lui, F., Canessa, N., Patteri, I., Lagravinese, G., Benuzzi, F., ... Rizzolatti, G. (2004). Neural Circuits Involved in the Recognition of Actions Performed by Nonconspecifics : An fMRI Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(1), 114-126. doi : 10.1162/089892904322755601
- Bullinger, A. (2007). Cognition et corps. In *Le développement sensori-moteur de l'enfant et ses avatars* (p. 160-168). Toulouse: Erès. Repéré à <https://www.cairn.info/le-developpement-sensori-moteur-de-l-enfant-et-ses--9782749203072-p-160.htm>
- Burns, M. S. (2008). Application of Neuroscience to Technology in Stroke Rehabilitation. *Topics in*

Stroke Rehabilitation, 15(6), 570-579. doi : 10.1310/tsr1506-570

- Cappa, S. F., et Pulvermüller, F. (2012). Cortex special issue : Language and the motor system. *Cortex*, 48(7), 785-787. doi : 10.1016/j.cortex.2012.04.010
- Caramazza, A., Anzellotti, S., Strnad, L., et Lingnau, A. (2014). Embodied Cognition and Mirror Neurons : A Critical Assessment. *Annual Review of Neuroscience*, 37(1), 1-15. doi : 10.1146/annurev-neuro-071013-013950
- Case, L. K., Pineda, J., et Ramachandran, V. S. (2015). Common coding and dynamic interactions between observed, imagined, and experienced motor and somatosensory activity. *Neuropsychologia*, 79, 233-245. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2015.04.005
- Casile, A. (2013). Mirror neurons (and beyond) in the macaque brain: An overview of 20 years of research. *Neuroscience Letters*, 540, 3-14. doi : 10.1016/j.neulet.2012.11.003
- Casile, A., Caggiano, V., et Ferrari, P. F. (2011). The Mirror Neuron System: A Fresh View. *The Neuroscientist*, 17(5), 524-538. doi : 10.1177/1073858410392239
- Cattaneo, L., et Rizzolatti, G. (2009). The Mirror Neuron System. *Archives of Neurology*, 66(5). doi : 10.1001/archneurol.2009.41
- Chen, Wei, et Yuan, T.-F. (2008). Mirror neuron system as the joint from action to language. *Neuroscience Bulletin*, 24(4), 259-264. doi : 10.1007/s12264-008-1231-y
- Chen, Wenli, Ye, Q., Ji, X., Zhang, S., Yang, X., Zhou, Q., ... Shan, C. (2015). Mirror neuron system based therapy for aphasia rehabilitation. *Frontiers in Psychology*, 6. doi : 10.3389/fpsyg.2015.01665
- Chomel-Guillaume, S., Leloup, G., et Bernard, I. (2010). *Les aphasies: évaluation et rééducation*. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Cook, R., Bird, G., Catmur, C., Press, C., et Heyes, C. (2014). Mirror neurons: From origin to function. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(02), 177-192. doi : 10.1017/S0140525X13000903
- Corballis, M. C. (2009). Language as gesture. *Human Movement Science*, 28(5), 556-565. doi : 10.1016/j.humov.2009.07.003
- Daviet, J.-C., Muller, F., Stuit, B., Darrigand, J.-M., et Mazaux, J.-M. (2007). Communication et aphasie. In *Aphasies et aphasiques* (p.76-96). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- de la Rosa, S., et Bühlhoff, H. H. (2014). Motor-visual neurons and action recognition in social interactions. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(02), 197-198. doi : 10.1017/S0140525X13002252
- De Renzi, E., et Vignolo, L. A. (1962). The token test : a sensitive test to detect receptive disturbance in aphasics. *Brain*, 85(4), 665-678. doi : 10.1093/brain/85.4.665
- Dictionnaire de l'académie de médecine. Repéré à <http://dictionnaire.academie-medecine.fr>
- Dinstein, I., Thomas, C., Behrmann, M., et Heeger, D. J. (2008). A mirror up to nature. *Current Biology*, 18(1), R13-R18. doi : 10.1016/j.cub.2007.11.004

- Duffy, J. R. (2013). Defining, understanding and categorizing Motor Speech Disorders. In *Motor speech disorders : substrates, differential diagnosis, and management* (3rd edition, p. 3-13). St. Louis, Missouri: Elsevier.
- Dumas, G. (2010). Imitation et synchronie, les bases du développement social chez l'enfant. *Métiers de la petite enfance*, 16(166), 12-13. doi : MELEAN-11-2010-16-166-1258-780X-101019-201004792
- Durand, E., Masson-Trottier, M., et Ansaldo, A. (2017). Intensive and modified Action Observation Therapy : Preliminary behavioral results. *Frontiers in Human Neuroscience. Conference Abstract: Academy of Aphasia 55th Annual Meeting*. doi : 10.3389/conf.fnhum.2017.223.00111
- Ertel, D., et Binkofski, F. (2012). Action observation as a tool for neurorehabilitation to moderate motor deficits and aphasia following stroke. *Neural Regeneration Research*, 7(26), 2063-2074. doi : 10.3969/j.issn.1673-5374.2012.26.008
- Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G., et Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles : a TMS study : Tongue involvement during speech listening. *European Journal of Neuroscience*, 15(2), 399-402. doi : 10.1046/j.0953-816x.2001.01874.x
- Fédération nationale des orthophonistes [FNO] (2017). *Avenant n° 16 a la convention nationale organisant les rapports entre les orthophonistes et l'assurance maladie signée le 31 octobre 1996*. Récupéré à http://www.fno.fr/wp-content/uploads/2017/07/ns20170725_fno_explicatif_avenant_16.pdf
- Ferrari, P. F., Gallese, V., Rizzolatti, G., et Fogassi, L. (2003). Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex: Mirror neurons for mouth actions in F5. *European Journal of Neuroscience*, 17(8), 1703-1714. doi : 10.1046/j.1460-9568.2003.02601.x
- Flowers, H. L., Skoretz, S. A., Silver, F. L., Rochon, E., Fang, J., Flamand-Roze, C., et Martino, R. (2016). Poststroke Aphasia Frequency, Recovery, and Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 97(12), 2188-2201.e8. doi : 10.1016/j.apmr.2016.03.006
- Fogassi, L., et Ferrari, P. F. (2007). Mirror neurons and the evolution of embodied language. *Current Directions in Psychological Science*, 16(3), 136-141. doi : 10.1111/j.1467-8721.2007.00491.x
- Gallese, V. (2008). Mirror neurons and the social nature of language: The neural exploitation hypothesis. *Social Neuroscience*, 3(3-4), 317-333. doi : 10.1080/17470910701563608
- Gallese, V., et Lakoff, G. (2005). The Brain's concepts: the role of the Sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive Neuropsychology*, 22(3-4), 455-479. doi : 10.1080/02643290442000310
- Gallese, V., et Sinigaglia, C. (2014). Understanding action with the motor system. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(02), 199-200. doi : 10.1017/S0140525X13002288
- Garrison, K. A., Winstein, C. J., et Aziz-Zadeh, L. (2010). The Mirror Neuron System: A Neural Substrate for Methods in Stroke Rehabilitation. *Neurorehabilitation and Neural Repair*,

24(5), 404-412. doi : 10.1177/1545968309354536

- Gazzola, C., Aziz-Zadeh, L., et Keysers. (2006). Empathy and the Somatotopic Auditory Mirror System in Humans. *Current Biology*, 16(18), 1824-1829. doi : 10.1016/j.cub.2006.07.072
- Gentilucci, M., et Corballis, M. (2006). From manual gesture to speech: A gradual transition. *Neuroscience et Biobehavioral Reviews*, 30(7), 949-960. doi : 10.1016/j.neubiorev.2006.02.004
- Gili, T., Fiori, V., De Pasquale, G., Sabatini, U., Caltagirone, C., et Marangolo, P. (2016). Right sensory-motor functional networks subserve action observation therapy in aphasia. *Brain Imaging and Behavior*, 11(5), 1397-1411. doi : 10.1007/s11682-016-9635-1
- Glenberg, A. M. (2015b). Few believe the world is flat : How embodiment is changing the scientific understanding of cognition. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 69(2), 165-171. doi : 10.1037/cep0000056
- Glenberg, A.M. (2015a). Big myth or major miss ? *The American Journal of Psychology*, 128(4), 533. doi : 10.5406/amerjpsyc.128.4.0533
- Grabski, K., et Sato, M. (2014). La nature sensorimotrice de la parole. *Rééducation orthophonique*, 52(260), 33-37.
- Guérin, J. (2007). Neuro-anatomie du langage et imagerie fonctionnelle cérébrale . In *Aphasies et aphasiques* (p.19-32). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Haslinger, B., Erhard, P., Altenmüller, E., Schroeder, U., Boecker, H., et Ceballos-Baumann, A. O. (2005). Transmodal Sensorimotor Networks during Action Observation in Professional Pianists. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(2), 282-293. doi : 10.1162/0898929053124893
- Hauk, O., Johnsrude, I., et Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, 41(2), 301-307.
- Haute Autorité de Santé (2012). Accident vasculaire cérébral : méthodes de rééducation de la fonction motrice chez l'adulte. *Recommandation de bonne pratique*. Repéré à https://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/201211/11irp0_argu_avc_methodes_de_reeducation.pdf
- Haute Autorité de Santé (2016). *Prise en charge initiale de l'accident vasculaire cérébral : résultats des indicateurs pour l'amélioration de la qualité et de la sécurité des soins. Campagne 2017 -Données 2016*. Repéré à https://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_2676946/fr/prise-en-charge-initiale-de-l-accident-vasculaire-cerebral-avc
- Heiser, M., Iacoboni, M., Maeda, F., Marcus, J., et Mazziotta, J. C. (2003). The essential role of Broca's area in imitation : rTMS of Broca's area during imitation. *European Journal of Neuroscience*, 17(5), 1123-1128. doi : 10.1046/j.1460-9568.2003.02530.x
- Hickok. (2015). Response to Rizzolatti and Sinigaglia and to Glenberg. *The American Journal of Psychology*, 128(4), 539. doi : 10.5406/amerjpsyc.128.4.0539
- Holt, L. L., et Lotto, A. J. (2014). The alluring but misleading analogy between mirror neurons and the motor theory of speech. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(02), 204-205. doi :

10.1017/S0140525X13002331

- Hultberg, B., et Masson, P. K. (1975). Activation of residual acidic alpha-mannosidase activity in mannosidosis tissues by metal ions. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 67(4), 1473-1479.
- Iacoboni, M. (2009). Imitation, Empathy, and Mirror Neurons. *Annual Review of Psychology*, 60(1), 653-670. doi : 10.1146/annurev.psych.60.110707.163604
- Iacoboni, M., et Dapretto, M. (2006). The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(12), 942-951. doi : 10.1038/nrn2024
- Jarick, M., et Jones, J. A. (2008). Observation of static gestures influences speech production. *Experimental Brain Research*, 189(2), 221-228. doi : 10.1007/s00221-008-1416-7
- Jarick, M., et Jones, J. A. (2009). Effects of seeing and hearing speech on speech production: a response time study. *Experimental Brain Research*, 195(2), 175-182. doi : 10.1007/s00221-009-1765-x
- Joseph, P.-A., De Seze, M., Dehail, P., Mazaux, J.-M., et Barat, M. (2007). Efficacité de la rééducation de l'aphasie vasculaire : quand et comment traiter ?. In *Aphasies et aphasiques* (p.267-272). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Kemmerer, D. (2014). Does the motor system contribute to the perception and understanding of actions ? Reflections on Gregory Hickok's The myth of mirror neurons: the real neuroscience of communication and cognition. *Language and Cognition*, 7(03), 450-475. doi : 10.1017/langcog.2014.36
- Kertesz, A. (1982). *The Western aphasia battery*. United States: The Psychological Corp., Harcourt Brace Jovanovich Inc.
- Kühn, S., et Brass, M. (2008). Testing the connection of the mirror system and speech. *Neuropsychologia*, 46(5), 1513-1521. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2008.01.003
- Lambert, J. (2008). Rééducation du langage dans les aphasies. In *Les approches thérapeutiques en orthophonie* (Vol. 4, p. 41-106). Isbergues: Ortho édition.
- Lebon, F., Guillot, A., Collet, C., et Papaxanthis, C. (2015). Perception, Observation et Action. *Movement et Sport Sciences - Science et Motricité*, (89), 43-52. doi : 10.1051/sm/2015002
- Lee, J., Fowler, R., Rodney, D., Cherney, L., et Small, S. L. (2010). IMITATE: An intensive computer-based treatment for aphasia based on action observation and imitation. *Aphasiology*, 24(4), 449-465. doi : 10.1080/02687030802714157
- Magnuson, J. S., et Nusbaum, H. C. (2007). Acoustic differences, listener expectations, and the perceptual accommodation of talker variability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(2), 391-409. doi : 10.1037/0096-1523.33.2.391
- Mahon, B. Z. (2015). The burden of embodied cognition. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 69(2), 172-178. doi : 10.1037/cep0000060
- Marangolo, P., Bonifazi, S., Tomaiuolo, F., Craighero, L., Coccia, M., Altoè, G., ... Cantagallo, A.

- (2010). Improving language without words: First evidence from aphasia. *Neuropsychologia*, 48(13), 3824-3833. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.025
- Marangolo, P., Cipollari, S., Fiori, V., Razzano, C., et Caltagirone, C. (2012). Walking but Not Barking Improves Verb Recovery : Implications for Action Observation Treatment in Aphasia Rehabilitation. *PLoS ONE*, 7(6), e38610. doi : 10.1371/journal.pone.0038610
- Marangolo, P., et Caltagirone, C. (2013). 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. doi : 10.1586/14737175.2014.864555
- Martin, F. (2015). Rééducation des paralysies faciales. *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique*, 60(5), 448-453. doi : 10.1016/j.anplas.2015.06.007
- Mashal, N., Solodkin, A., Dick, A. S., Chen, E. E., et Small, S. L. (2012). A Network Model of Observation and Imitation of Speech. *Frontiers in Psychology*, 3. doi : 10.3389/fpsyg.2012.00084
- Mathon, B. (2013). Les neurones miroirs : de l'anatomie aux implications physiopathologiques et thérapeutiques. *Revue Neurologique*, 169(4), 285-290. doi : 10.1016/j.neurol.2012.10.008
- Mätzig, S., Druks, J., Masterson, J., et Vigliocco, G. (2009). Noun and verb differences in picture naming : Past studies and new evidence. *Cortex*, 45(6), 738-758. doi : 10.1016/j.cortex.2008.10.003
- Mazaux, J.-M., Dehail, J.-C., Daviet, P., Pradat-Diehl, P., Brun, V. (2007). Tests et bilans d'aphasie. In *Aphasies et aphasiques* (p.144-157). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Mazaux, J.-M., Nespoulous, J.-L., Pradat-Diehl, P., et Brun, V. (2007). Les troubles du langage oral : quelques rappels sémiologiques. In *Aphasies et aphasiques* (p.54-65). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Meinzer, M., Breitenstein, C., Westerhoff, U., Sommer, J., Rösser, N., Rodriguez, A. D., ... Flöel, A. (2011). Motor Cortex Preactivation by Standing Facilitates Word Retrieval in Aphasia. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25(2), 178-187. doi : 10.1177/1545968310376577
- Mikulan, E. P., Reynaldo, L., et Ibáñez, A. (2014). Homuncular mirrors : misunderstanding causality in embodied cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. doi : 10.3389/fnhum.2014.00299
- Molenberghs, P., Cunnington, R., et Mattingley, J. B. (2012). Brain regions with mirror properties: A meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience et Biobehavioral Reviews*, 36(1), 341-349. doi : 10.1016/j.neubiorev.2011.07.004
- Monod-Broca, P. et Hamonet, C. (2007). De la chirurgie et de l'anthropologie à la découverte de l'aphasie, l'œuvre d'un homme peu ordinaire : Paul Broca. In *Aphasies et aphasiques* (p.1-6). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Murakami, T., Restle, J., et Ziemann, U. (2011). Observation-execution matching and action inhibition in human primary motor cortex during viewing of speech-related lip movements or listening to speech. *Neuropsychologia*, 49(7), 2045-2054. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2011.03.034
- Netter, F. H. (2015). *Atlas d'anatomie humaine* (6e édition). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.

- Peskine, A. et Pradat-Diehl, P. (2007). Étiologie de l'aphasie. In *Aphasies et aphasiques* (p.44-53). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Pulvermüller, F. (2005). Opinion: Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(7), 576-582. doi : 10.1038/nrn1706
- Pulvermüller, F., et Berthier, M. L. (2008). Aphasia therapy on a neuroscience basis. *Aphasiology*, 22(6), 563-599. doi : 10.1080/02687030701612213
- Pulvermüller, F., Moseley, R. L., Egorova, N., Shebani, Z., et Boulenger, V. (2014). Motor cognition–motor semantics: Action perception theory of cognition and communication. *Neuropsychologia*, 55, 71-84. doi : 10.1016/j.neuropsychologia.2013.12.002
- Purves, D., Augustine, G., Fitzpatrick, D., Katz, L., Lamantia, A.-S., McNamara, J., et Williams, M. (2011). *Neurosciences* (4e édition). Bruxelles: De Boeck Université.
- Ramachandran, V. (2009) *The neurons that shaped civilization* [Video en ligne]. Conférence TED, Inde. Repéré à https://www.ted.com/talks/vs_ramachandran_the_neurons_that_shaped_civilization#t-11287
- Ramachandran, V. (2011). *Le cerveau fait de l'esprit : enquête sur les neurones miroirs*. Paris: Dunod.
- Rizzolatti, G., (2014). Confounding the origin and function of mirror neurons. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(02), 218-219. doi : 10.1017/S0140525X13002471
- Rizzolatti, G., Cattaneo, L., Fabbri-Destro, M., et Rozzi, S. (2014). Cortical Mechanisms Underlying the Organization of Goal-Directed Actions and Mirror Neuron-Based Action Understanding. *Physiological Reviews*, 94(2), 655-706. doi : 10.1152/physrev.00009.2013
- Rizzolatti, G., et Arbib, M. A. (1998). Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*, 21(5), 188-194. doi : 10.1016/S0166-2236(98)01260-0
- Rizzolatti, G., et Craighero, L. (2004). The mirror neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27(1), 169-192. doi : 10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230
- Rizzolatti, G., et Fogassi, L. (2014). The mirror mechanism: recent findings and perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1644), 20130420-20130420. doi : 10.1098/rstb.2013.0420
- Rizzolatti, G., et Sinigaglia, C. (2008). *Les neurones miroirs*. (M. Raiola, Trad.). Paris: Odile Jacob poche.
- Rizzolatti, G., et Sinigaglia, C. (2016). The mirror mechanism: a basic principle of brain function. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(12), 757-765. doi : 10.1038/nrn.2016.135
- Roach, A., Schwartz, M. F., Martin, N., Grewal, R. S., et Brecher, A. (1996). The Philadelphia Naming Test: Scoring and rationale. *Clinical Aphasiology*, 24, 121-133.
- Rousseau, M., Lefevre, M., Kozlowski, O. (2007). Les confins de l'aphasie. In *Aphasies et aphasiques* (p.110-120). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Rousseau, T. (2008). *Les approches thérapeutiques en orthophonie*. Isbergues (62330): Ortho éd.

- Routhier, S., Bier, N., et Macoir, J. (2015). The contrast between cueing and/or observation in therapy for verb retrieval in post-stroke aphasia. *Journal of Communication Disorders*, 54, 43-55. doi : 10.1016/j.jcomdis.2015.01.003
- Sale, P., et Franceschini, M. (2012). Action observation and mirror neuron network: a tool for motor stroke rehabilitation. *European journal of physical and rehabilitation medicine*, 48(2), 313-318. doi : Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22522432>
- Sauzéon, H. (2007). Modèles du langage et production de mots : apports des sciences cognitives. In *Aphasies et aphasiques* (p.7-18). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Schomers, M. R., et Pulvermüller, F. (2016). Is the Sensorimotor Cortex Relevant for Speech Perception and Understanding ? An Integrative Review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. doi : 10.3389/fnhum.2016.00435
- Simpson, E. A., Murray, L., Paukner, A., et Ferrari, P. F. (2014). The mirror neuron system as revealed through neonatal imitation : presence from birth, predictive power and evidence of plasticity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1644), 20130289-20130289. doi : 10.1098/rstb.2013.0289
- Small, S. L., Buccino, G., et Solodkin, A. (2012). The mirror neuron system and treatment of stroke. *Developmental Psychobiology*, 54(3), 293-310. doi : 10.1002/dev.20504
- Small, S. L., Buccino, G., et Solodkin, A. (2013). Brain repair after stroke—a novel neurological model. *Nature Reviews Neurology*, 9(12), 698-707. doi : 10.1038/nrneurol.2013.222
- Stern, D., et Gallese, V. (2015). *Psychothérapies et neurosciences: une nouvelle alliance : de l'intersubjectivité aux neurones miroirs* (Psychothérapies créatives). Paris : Fabert.
- 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), 273-281. doi : 10.1162/0898929053124965
- Tiainen, M., Lukavský, J., Tiippana, K., Vainio, M., Šimko, J., Felisberti, F., et Vainio, L. (2017). Connections of Grasping and Horizontal Hand Movements with Articulation in Czech Speakers. *Frontiers in Psychology*, 8. doi : 10.3389/fpsyg.2017.00516
- Tiainen, M., Tiippana, K., Vainio, M., Komeilipoor, N., et Vainio, L. (2017). Interaction in planning vocalizations and grasping. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(8), 1590-1602. doi : 10.1080/17470218.2016.1195416
- Tran, T.-M. (2007). Rééducation des troubles de la production lexicale. In *Aphasies et aphasiques* (p.205-214). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Tschentscher, N. (2017). Embodied semantics : embodied cognition in neuroscience. *German Life and Letters*, 70(4), 423-429. doi : 10.1111/glal.12165
- Vainio, L., Tiainen, M., Tiippana, K., et Vainio, M. (2014). Shared processing of planning articulatory gestures and grasping. *Experimental Brain Research*, 232(7), 2359-2368. doi : 10.1007/s00221-014-3932-y
- Vainio, L., Tiainen, M., Tiippana, K., Komeilipoor, N., et Vainio, M. (2015). Interaction in planning movement direction for articulatory gestures and manual actions. *Experimental Brain*

Research, 233(10), 2951-2959. doi : 10.1007/s00221-015-4365-y

Varley, R. (2011). Rethinking aphasia therapy : A neuroscience perspective. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 13(1), 11-20. doi : 10.3109/17549507.2010.497561

Vilayanur S. Ramachandran. (2011). *Le cerveau fait de l'esprit enquête sur les neurones miroirs* (Quai des sciences). Paris: Dunod.

Watkins, K. E., Strafella, A. P., et Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, 41(8), 989-994. doi : 10.1016/S0028-3932(02)00316-0

Watkins, K., et Paus, T. (2004). Modulation of Motor Excitability during Speech Perception: The Role of Broca's Area. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(6), 978-987. doi : 10.1162/0898929041502616

Zarr, N., Ferguson, R., et Glenberg, A. M. (2013). Language comprehension warps the mirror neuron system. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. doi : 10.3389/fnhum.2013.00870

Perspectives thérapeutiques issues de l'exploitation des neurones miroirs en prise en charge orthophonique de l'aphasie post-AVC

RESUME

Les neurones miroirs, découverts par l'équipe de Rizzolatti, sont des cellules inédites qui ont la particularité de s'activer dans les contextes d'observation et d'exécution d'actions. Ils ont été exploités en réhabilitation motrice dans l'idée que leur recrutement implique une réactivation, au moins partielle des circuits nécessaires à l'exécution déficiente. Ces neurones ouvrent de nombreuses perspectives qui dépassent le champ de la motricité. Ils seraient à la base de nombreux comportements sociaux comme l'imitation, l'apprentissage, l'empathie et le langage. À priori tout oppose les neurones miroirs et une fonction cognitive aussi élaborée que le langage. Pourtant, ils ont été découverts dans la zone BA44, traditionnellement définie comme le centre de production du langage. BA44 est l'héritière d'une communication gestuelle. Contre toute attente, les systèmes sensorimoteur et linguistique ne s'opposent pas. La compréhension des mots et des phrases est aussi soumise au mécanisme miroir. Les verbes recrutent respectivement les représentations sensorimotrices des jambes, des mains, de la bouche, lorsqu'ils évoquent des actions qui les mettent en jeu. Les neurones miroirs constituent un substrat neuronal à la théorie d'un langage incarné. Plusieurs protocoles de stimulation du langage auprès de personnes aphasiques rendent compte de résultats prometteurs mais encore limités. L'exploitation des neurones miroirs en aphasiologie par l'observation d'actions constitue une approche inédite, complémentaire aux techniques classiques dont l'objectif est de faciliter la production de lexique verbal. De nouveaux modèles cognitifs du langage sont proposés. Désormais, les représentations sensorimotrices incarnent les verbes. Les perspectives thérapeutiques issues des neurones miroirs sont encourageantes mais encore restreintes. La recherche à ce sujet est encore marginale mais gagnerait à être investie par l'orthophonie.

MOTS-CLES

Aphasie, cognition incarnée, langage, neurones miroirs, observation d'action, orthophonie, réhabilitation, revue

ABSTRACT

Mirror neurons, which were discovered by Rizzolatti's research team, are new original cells that have the specific role to activate in contexts of both the actions of observation and execution. They have been used in the rehabilitation of motor functions since their actuation induces a reactivation, at least partially, of circuits needed for the deficient execution. These neurons open new prospects that go beyond the field of motor function. They could be at the basis of many social attitudes such as imitation, learning process, empathy and language. At first glance, mirror neurons are widely different from a cognitive function as complex as language. Nevertheless, they have been discovered in the BA44 area, which is traditionally presented as the centre of language production. BA44 is the successor of gestural communication. Against all odds, sensorimotor and linguistic systems are not opposed. The understanding of words and sentences also depends on the mirror mechanism. Verbs active, respectively, the sensorimotor representation of the legs, the hands, the mouth, when they evoke actions which involve these parts of the body. Mirror neurons are a neuronal substrate to the embodied language theory. Different language stimulation protocols on aphasic persons deliver promising results which are nonetheless still limited. The exploitation of mirror neurons in aphasiology, by the observation of actions, is an original approach completing classical techniques which goal is to ease oral lexicon production. New language cognitive models are offered. Henceforth, sensorimotor representations embody the verbs. Therapeutic perspectives emanating from mirror neurons are promising but still narrow. Research on this subject is still marginal but would benefit in being investigated by the speech therapy field.

KEY WORDS

Action-observation, aphasia, embodied cognition, language, mirror neurons, rehabilitation, review, speech-therapy