



HAL
open science

Influence du cervelet dans la communication humaine. Implication des fonctions évaluatives et anticipatrices dans l'ontogenèse du langage

Orianne Bargain

► **To cite this version:**

Orianne Bargain. Influence du cervelet dans la communication humaine. Implication des fonctions évaluatives et anticipatrices dans l'ontogenèse du langage. Médecine humaine et pathologie. 2020. dumas-02901960

HAL Id: dumas-02901960

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02901960v1>

Submitted on 17 Jul 2020

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

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



Normandie Université

Pour l'obtention du Certificat de Capacité en Orthophonie

**Préparé au sein du Département d'Orthophonie,
UFR Santé, Université de Rouen Normandie**

Influence du cervelet dans la communication humaine :
Implication des fonctions évaluatives et anticipatrices dans l'ontogenèse
du langage.

**Présenté et soutenu par
Oriane BARGAIN**

Mémoire de recherche

**Mémoire soutenu publiquement le 25 juin 2020
devant le jury composé de**

HILBER Pascal	Maître de conférence en neurosciences	Directeur du mémoire
PASQUET Frédéric	Orthophoniste, Maître de conférence en sciences du langage	Président du jury
DEHEINZELIN Léopoldine	Orthophoniste – CHU de Rouen	Membre du jury
FERRACCI François-Xavier	Neurochirurgien – CHU de Rouen	Membre du jury

Mémoire dirigé par Pascal HILBER, MCU HDR en neurosciences, Département de biologie centre de recherche sur les fonctionnements et les dysfonctionnements psychologiques, Mont-Saint-Aignan



Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	2
TABLE DES ILLUSTRATIONS	4
REMERCIEMENTS.....	5
INTRODUCTION.....	6
I. COMMUNICATION ET LANGAGE.....	8
1.1) Généralités sur les notions de langage et de communication	8
1.1.1) Aspect structural du langage	8
1.1.2) Aspect fonctionnel du langage	9
1.1.3) Les articulations du langage	10
1.2) Représentation cérébrale du langage.....	11
1.2.1) Les pionniers	11
1.2.2) La latéralisation du langage	12
1.3) Quelques modèles du langage.....	15
1.3.1) Le modèle MUC	15
1.3.2) Le modèle à double voie	16
1.3.3) Le modèle hodotopique.....	18
1.3.4) Modèle computationnel du langage : au carrefour des théories motrices et psycholinguistiques	20
II. LE CERVELET.....	22
2.1) Généralités.....	22
2.1.1) Description du cervelet.....	22
2.1.2) Rôle du cervelet dans la motricité	23
2.1.3) Cervelet et apprentissage moteur	24
2.2) Rôle non-moteur du cervelet dans le langage.....	29
2.2.1) Les boucles cérébro-cérébelleuses.....	29
2.2.2) Altération cérébelleuse et dysfonctionnement cognitif.....	30
2.2.3) Somatotopie du cervelet et langage.....	31
2.2.4) Activation cérébelleuse chez des sujets sains lors de tâches langagières.....	34
2.2.5) Influence du cervelet dans certains troubles neurodéveloppementaux.....	36
III. INFLUENCE DE L'ANTICIPATION DANS LE LANGAGE.....	38
3.1) Le modèle DIVA	38
3.1.1) Présentation du modèle	38
3.1.2) Critiques du modèle	39
3.2) Proposition d'un modèle théorique de la communication intégrant le cervelet.....	40
3.2.1) Intrication du langage dans un contexte de communication	40
3.2.2) Modèles internes et langage	41

3.2.3) Aspects prédictifs du langage	42
3.2.4) Modèle cybernétique global de la communication	43
IV. APPORTS DANS LA PRATIQUE ORTHOPHONIQUE.....	48
4.1) Acquisition du langage.....	48
4.1.1) Co-requis nécessaires à l'acquisition du langage	48
4.1.2) Modifications structurelles.....	50
4.2) Application du modèle dans le cadre de l'acquisition du langage	51
4.3) Dysfonctionnement du modèle et trouble du langage	52
CONCLUSION	54
BIBLIOGRAPHIE	56

Table des illustrations

Figure 1. Les composantes du langage	9
Figure 2. Modèle et fonctions de la communication	10
Figure 3. Vue latérale de l'hémisphère gauche (schéma de référence)	11
Figure 4. Synthèse de la représentation des aires du langage par composante	15
Figure 5. Modèle MUC	16
Figure 6. Modèle à double-voie	17
Figure 7. Modèle hodotopique	19
Figure 8. Modèle computationnel du langage	21
Figure 9. Représentation structurelle du cervelet	23
Figure 10. Apprentissages moteurs au sein du système cérébral	26
Figure 11. Représentation des modèles internes par anticipation	27
Figure 12. Connectivité du cervelet	30
Figure 13. Synthèse des études illustrant le lien entre le cervelet et le langage	33
Figure 14. Imagerie de synthèse de l'activation du cervelet lors des activités langagières	35
Figure 15. Modèle computationnel de la parole, le modèle DIVA	39
Figure 16. Transposition des modèles internes au cervelet	41
Figure 17. Lien entre les modèles internes et les aires cérébrales	43
Figure 18. Modèle computationnel de la communication	44
Figure 19. Schématisation des interactions destinataire-destinataire	44
Figure 20. Articulation des structures fonctionnelles du langage	50
Figure 21. Modèles internes et acquisition du langage	52

Remerciements

Je remercie en premier lieu Monsieur Pascal Hilber d'avoir accepté de m'encadrer pour la réalisation de ce travail. Votre disponibilité, vos conseils avisés et les nombreuses connaissances que vous m'avez transmises m'ont ainsi permis de finaliser ce travail, malgré le contexte de pandémie actuel. Pour tout cela, un grand merci.

Je tiens également à remercier Monsieur Frédéric Pasquet, Monsieur François-Xavier Ferracci et Madame Léopoldine Deheinzelin d'avoir accepté de faire partie du jury et pour l'intérêt porté à ce sujet.

Je remercie également mes différents maîtres de stages qui m'ont transmis leur savoir-faire et leurs connaissances et m'ont permis de bénéficier ainsi d'une formation professionnelle de qualité. Je remercie également l'ensemble du département d'orthophonie de Rouen, pour les enseignements riches dispensés tout au long de ces années et pour l'investissement qui nous a permis de bénéficier d'une formation professionnelle stimulante et enrichissante.

Un grand merci à mes amies rencontrées au cours de ces études, Camille, Mathilde, Margot, Sybille et Pauline pour leur soutien indéfectible, pour leurs encouragements ainsi que pour tous les bons moments passés ensemble.

Plus personnellement, je tiens à remercier l'ensemble de mes proches qui m'ont toujours soutenue depuis le début de mes études et qui m'ont permis d'accomplir mon projet professionnel.

Introduction

Le langage est un système de communication propre à l'espèce humaine, il est le support des interactions sociales et permet de représenter le réel, mais également les expériences et les émotions. L'étude de l'acquisition du langage chez l'enfant a montré que celui-ci débute très précocement et qu'il nécessite un apprentissage et un contexte d'expérimentation (Karmiloff-Smith et al., 2014). Les données en linguistique ainsi que les études en neurosciences révèlent que c'est une activité cognitive hautement spécialisée qui sollicite de nombreuses structures cérébrales. Les modèles récents de la représentation cérébrale du langage impliquent de nombreuses aires interconnectées associées à des structures sous-corticales (Duffau et al., 2014). Cependant, le cervelet est une structure encore absente dans ces considérations. Or, depuis une trentaine d'années, les données expérimentales et cliniques ont montré que cette structure est impliquée dans les fonctions cognitives et émotionnelles. Le cervelet est une structure spécialisée dans l'apprentissage moteur, c'est une interface de coordination motrice et cognitive qui entretient des liens étroits avec les différentes aires cérébrales (Argyropoulos, 2016).

A partir de ce constat, nous proposons un modèle global de la communication qui intègre le cervelet dans les processus langagiers au regard du contexte environnemental. Ce modèle est basé sur les processus d'anticipation et les modèles internes initiés au niveau du cervelet. De plus, le rôle central que jouent les émotions dans le langage est considéré. Celles-ci représentent un élément clé du contexte et influencent de fait les processus langagiers. Nous remplaçons ainsi le langage dans un système global de communication permettant une meilleure appréhension de notre environnement et donc une adaptation à ses différentes sollicitations

Au cours de ce manuscrit, nous reviendrons donc dans un premier temps sur les notions de langage et de communication afin de mettre en évidence leur intrication étroite. Nous proposerons ensuite de situer le langage au niveau cérébral pour introduire ensuite, la façon dont le cervelet peut intervenir dans ces représentations. Par ailleurs, nous nous attarderons sur la structure du cervelet ainsi que sur ses aspects fonctionnels. A partir de ces différents éléments, nous proposerons un modèle de synthèse mettant en évidence l'influence du cervelet dans l'anticipation et le contrôle des actes langagiers. Dans un dernier temps, nous

verrons quels apports ce modèle peut apporter dans la pratique orthophonique et notamment dans la compréhension des troubles de l'acquisition du langage.

I. Communication et langage

1.1) Généralités sur les notions de langage et de communication

1.1.1) Aspect structural du langage

Selon Saussure (1857-1913), fondateur du structuralisme, le langage correspond à « la faculté naturelle, inhérente et universelle qu'a l'être humain de construire des systèmes servant à la communication. » Ce langage correspond à la capacité générale à s'exprimer en ayant recours à un ensemble de signes. La langue, quant à elle, représente cet ensemble de signes. Elle est structurée, organisée et obéit à des règles communes, partagées par un groupe social. La langue correspond donc au résultat d'une convention sociale qui est transmise à l'individu (Saussure, 1916). Le langage représente une faculté propre à l'homme, notamment par sa capacité à symboliser l'environnement et le réel en ayant recours à un signe (Benveniste, 1966). En somme, le langage représente donc l'usage de la langue dans un environnement spécifique.

Le langage peut être abordé selon plusieurs modalités : le contenu, la forme et l'usage. La forme est caractérisée par trois composantes : la phonologie, le lexique et la morphosyntaxe. Le contenu réfère à l'aspect sémantique du langage c'est à dire au sens véhiculé par le message. L'usage fait référence à la pragmatique, autrement dit, à la prise en compte du contexte et de l'adaptation du message par le respect de certaines règles (codes sociaux, codes de communication ...). Le schéma présenté ci-dessous regroupe l'ensemble de ces compétences et la façon dont elles sont articulées entre elles (INSERM, 2007).

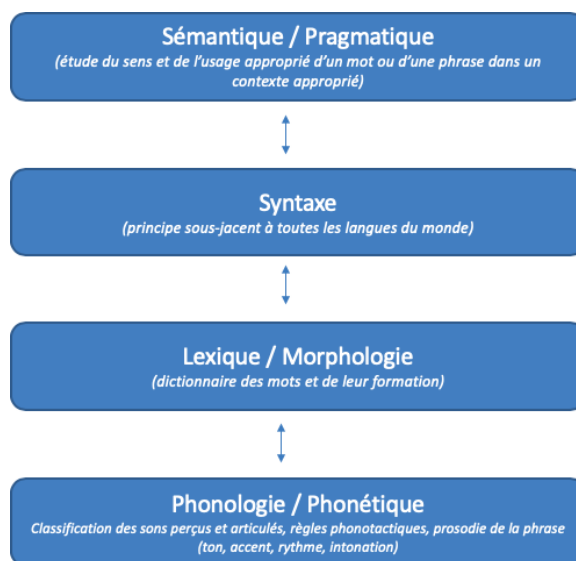
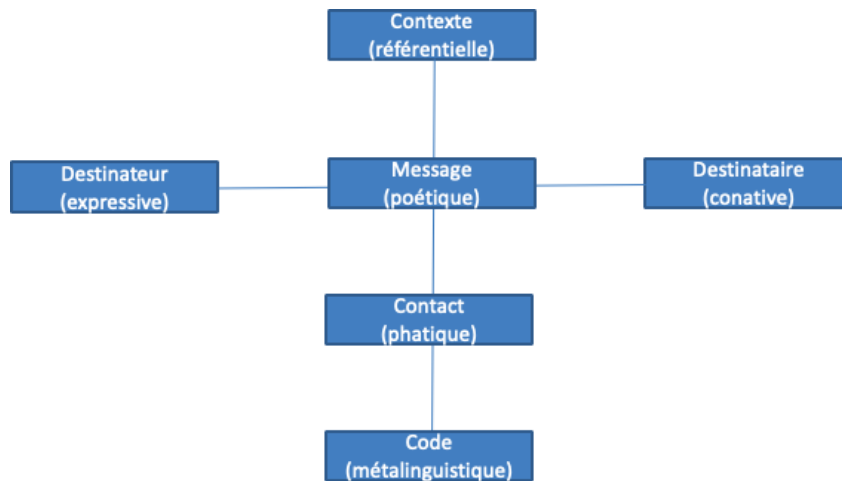


Figure 1. Composantes du langage et leurs interactions d'après INSERM, 2007

1.1.2) Aspect fonctionnel du langage

Le langage oral s'inscrit dans un contexte de communication pour prendre sens. En linguistique structuraliste, Jakobson définit des composantes essentielles qui structurent l'acte de communication (*voir figure 1*). La communication nécessite l'échange d'un message entre un destinataire (émetteur du message) et un destinataire (récepteur du message). Pour que ce message soit compris, l'émetteur et le récepteur doivent partager un code commun, un contact physique (contact visuel ou auditif) ou psychique (les individus doivent avoir une envie de communiquer), au sein d'un contexte qui donne sens au message (Jakobson, 1963). La nature du message dépend de la fonction dominante sur laquelle la communication est établie. La fonction référentielle est centrée sur le contexte qui prend donc une importance particulière dans la communication. La fonction expressive se centre plutôt sur le destinataire et concerne son attitude vis à vis du message véhiculé. La fonction conative est centrée sur le destinataire, elle permet de l'impliquer dans la communication et est focalisée sur ses réactions propres.

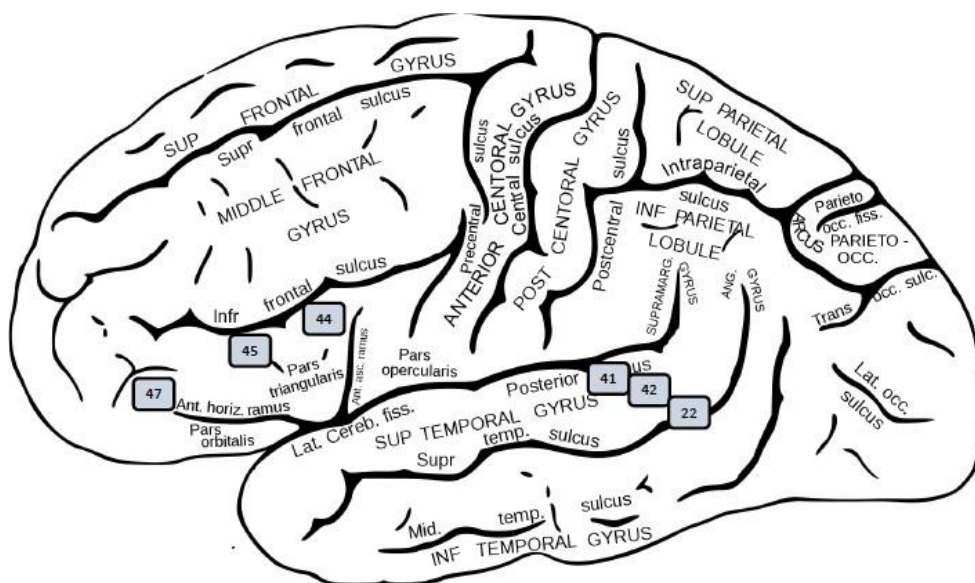


[Figure 2](#). Ce schéma de la communication illustre les différentes modalités du langage, que l'on se place du côté du destinataire ou du destinataire. Le langage peut s'exprimer sous deux formes : la production et la compréhension. (D'après Jakobson, 1963)

1.1.3) Les articulations du langage

Saussure a défini le signe linguistique comme la relation entre un signifiant (image acoustique) et un signifié (concept) (Saussure, 1916). Cette distinction entre le signifiant et le signifié a permis d'expliquer par la suite les différents niveaux d'articulation. Le langage s'organise autour de la double articulation. La première renvoie aux monèmes qui peuvent correspondre aux lexèmes (que l'on peut globalement apparenter à un concept) ou aux morphèmes (que l'on peut assimiler à une catégorie grammaticale). Ces monèmes peuvent être combinés pour construire un énoncé. La seconde articulation correspond aux phonèmes, qui renvoient aux plus petites unités audibles dans un mot (ce que l'on appelle communément un son). Ces phonèmes s'agencent et créent ainsi des monèmes (Martinet, 1970). De fait, on peut globalement dégager deux niveaux de traitement du langage : le niveau de traitement phonologique qui porte sur l'analyse phonétique du langage et un niveau de traitement sémantique qui s'attarde plus sur les unités de sens.

1.2) Représentation cérébrale du langage



[Figure 3.](#) Ce schéma représente la surface latérale de l'hémisphère gauche. Il servira de référence afin de situer l'ensemble des aires cérébrales qui seront mentionnées au cours de ce travail. Les carrés bleus avec les numéros correspondent aux aires de Brodmann qui seront également mentionnées. (Image modifiée pour les besoins du mémoire, libre de droit d'auteur)

1.2.1) Les pionniers

La découverte des réseaux cérébraux du langage a débuté avec des études anatomo-cliniques associant une aire cérébrale à une fonction déterminée. Paul Broca (1824-1880) a mis en relation une lésion au niveau de la troisième circonvolution frontale gauche (gyrus frontal inférieur gauche) avec un défaut de production langagière. Cette aire baptisée aire de Broca (elle correspond aux aires 44 et 45 de Brodmann, notées AB 44, AB 45) est alors reconnue comme le centre la production du langage articulé. Karl Wernicke (1848-1905) a apporté des données nouvelles en ajoutant que la partie postérieure de la première circonvolution temporale gauche (gyrus temporal supérieur gauche) était spécialisée dans le traitement de stimuli auditifs langagiers (Rondal et al., 2000). Cette aire, baptisée aire de Wernicke (AB 22, 41 et 42) est donc considérée comme le siège de l'image auditive des mots, nécessaire à la compréhension (Pinto et al., 2016). Geschwind, plus tard, a proposé un modèle qui distingue les aires cérébrales nécessaires à la production de celles impliquées dans la compréhension du

langage (Geschwind, 1970). Le pôle antérieur correspondant à l'aire de Broca, supervise la production tandis que le pôle postérieur (aire de Wernicke) serait responsable de la compréhension et de la réception sensorielle. Ces deux régions sont connectées via un faisceau de substance blanche, le faisceau arqué (Pinto et al., 2016). Il montre que le traitement du langage est intégré dans un réseau d'aires corticales interconnectées et introduit ainsi la notion d'aires associatives (Geschwind, 1970).

Avec l'avancée des techniques et notamment l'imagerie cérébrale, les aires dites du langage ont pu être explorées plus finement. L'écoute de la langue maternelle recrute un large réseau latéralisé dans l'hémisphère gauche, incluant notamment l'aire de Broca. Le pôle temporal est également recruté mais il est difficile de distinguer la composante sous-jacente (prosodie, syntaxe, sémantique) (Mazoyer et al., 1993). En effet, en raison de leur intrication étroite et de leurs interrelations, il est difficile d'isoler chaque composante au niveau cérébral (Mazoyer et al., 1993). Les différentes aires cérébrales impliquées sont reliées par trois grands faisceaux : le faisceau arqué, la capsule extrême et le faisceau unciné. Chaque faisceau aurait un rôle distinct. Ainsi lors des tâches phonologiques, l'intégrité du faisceau arqué est nécessaire, lors des tâches sémantiques la capsule extrême est sollicitée, tandis que pour le traitement syntaxique, le recrutement de ces deux faisceaux est indispensable (Axe et al., 2013).

1.2.2) La latéralisation du langage

L'hémisphère gauche a longtemps été considéré comme l'hémisphère dominant, centre du langage. Le *planum temporale* se situe au niveau du bord postérieur du premier gyrus transversal de Heschl et à l'extrémité de la fosse sylvienne. Il est plus large chez 65% des sujets à gauche et chez 11% des sujets à droite (Geschwind et al., 1968). Certaines données tendent cependant à nuancer le rôle exclusif de l'hémisphère gauche dans le langage et des études s'intéressant à l'organisation inter-hémisphérique du langage remettent en cause cette latéralisation absolue (Bélanger et al., 2009). Des auteurs suggèrent notamment que le langage dit automatique (compter, énoncer les jours de la semaine) pourrait être géré par des régions frontales antérieures droites et les ganglions de la base (Speedie et al., 1993; Bookheimer et al., 2000). Actuellement, on tend vers une complémentarité des deux hémisphères, chacun intervenant dans des processus langagiers différents mais une coopération semble indispensable pour un fonctionnement langagier optimal (Banich et al., 2000). Ces nuances sur

la latéralisation du langage et la coopération inter hémisphérique seront illustrées plus loin avec les modèles basés sur les deux voies que nous présenterons.

1.2.3) Représentation cérébrale des composantes du langage

1.2.3.1) Représentation phonologique

Les phonèmes peuvent être décomposés en traits phonétiques. Ils ont une dimension symbolique propre à chaque langue. Dans leur étude menée en 2004, Mesgarani et collaborateurs, montrent que l'écoute d'une phrase induit des activations cérébrales spécifiques et qu'en analysant chaque phonème, il est possible d'en retrouver une trace au niveau cérébral. Les auteurs sont allés plus loin, en analysant la trace neuronale de chaque trait phonétique constituant les phonèmes. Ainsi, au niveau cortical, l'imagerie a mis en évidence l'existence d'un espace vocalique (propre aux voyelles) et l'existence de traits phonétiques dont les combinaisons composent les consonnes, qui appuient les classifications phonémiques établies par les recherches en phonologie (Mesgarani et al., 2014). D'autres auteurs soutiennent cette idée, en montrant par exemple que le cortex préfrontal inférieur gauche au niveau postérieur est responsable du traitement phonologique, tandis qu'au niveau antérieur, il permet l'accès sémantique (Poldrack et al., 1999).

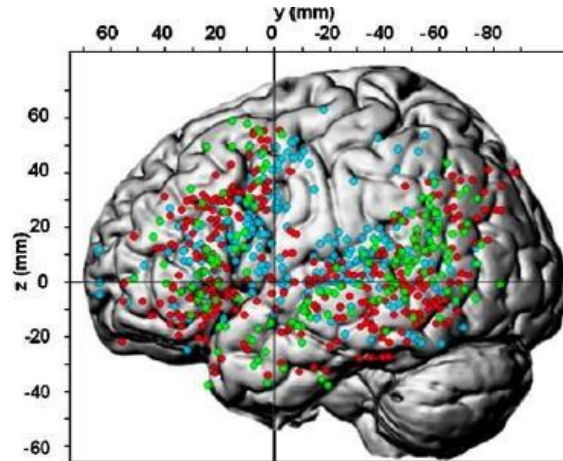
1.2.3.2) Représentation syntaxique

Une activation du cortex temporal et pariétal et des gyrus frontaux supérieurs et moyens de l'hémisphère gauche a été enregistrée lors du traitement syntaxique. Cependant, le *pars opercularis* et le *pars triangularis* semblent davantage impliqués dans la compréhension syntaxique (Nuñez et al., 2011). Au sein de l'aire de Broca (notée AB qui correspond aux aires 44 et 45 de Brodmann), une dissociation est retrouvée pour le traitement syntaxique et sémantique. L'AB 44 est nécessaire au traitement syntaxique, elle permet notamment l'analyse des syntagmes enchâssés qui caractérisent une phrase. L'AB 45 permet l'accès aux représentations sémantiques à différents niveaux (morphèmes, mots, phrases) et s'active fortement lors de l'écoute de pseudo-mots dénués de morphologie (Goucha et al., 2015). Ces résultats sont confirmés par l'étude Tyler et collaborateurs qui retrouvent une activation spécifique du gyrus frontal inférieur gauche (AB 45 et une partie de l'AB 44 et AB 47), associée à la partie postérieure du gyrus temporal moyen pour le traitement syntaxique (Tyler et al.,

2011). Ces données mettent en évidence l'existence d'un circuit spécialisé dans l'analyse syntaxique.

1.2.3.3) Représentation sémantique

La région située au niveau du cortex temporal inférieur reliée au cortex visuel primaire sous-tendrait les relations sémantiques en lien avec les représentations des objets. Cela marque le début de la voie ventrale, spécialisée dans l'accès sémantique et qui régit l'organisation des représentations sémantiques lexicales (Tyler et al., 2011). La mémoire sémantique, qui stocke les connaissances générales sur le monde (Tulving, 1972), serait ainsi située au niveau du gyrus fusiforme gauche (Ulrich et al., 2013). Il faut néanmoins nuancer ces affirmations en raison de l'hétérogénéité des résultats obtenus, explicable par la variabilité interindividuelle et des tâches proposées au cours des différentes études. Vigneau et ses collaborateurs ont procédé à une méta-analyse des études portant sur le réseau cérébral du langage. Leur synthèse révèle une implication des aires auditives et motrices pour le traitement phonologique. Dans le lobe frontal, au niveau du gyrus précentral, les aires semblent coordonner le contrôle moteur et l'articulation. Le traitement phonologique serait également associé au gyrus temporal supérieur et au gyrus supra marginal dans le lobe temporal. La boucle phonologique serait "localisée" dans une boucle fronto-pariétale. Une dissociation des processus phonologiques et sémantiques a pu être observée, confortant ainsi l'hypothèse proposée par Poldrack et ses collaborateurs (Poldrack et al., 1999). Pour le traitement sémantique, trois régions corticales sont identifiées : la partie postérieure du gyrus temporal supérieur, la partie médiane du gyrus temporal moyen et les gyrus angulaire et fusiformes. Le traitement syntaxique est fortement lié au traitement sémantique. Néanmoins, la partie dorsale du pars ocularis (gyrus frontal inférieur) est particulièrement impliquée dans le traitement syntaxique. La compréhension syntaxique est supervisée par les aires temporales, dans la partie la plus postérieure du gyrus temporal.



[Figure 4](#). Le schéma représente la synthèse d'une méta-analyse portant sur des aires cérébrales du langage. On retrouve ainsi les aires supervisant la phonologie en bleu, les aires sémantiques en rouge et les aires syntaxiques en vert. (D'après Vigneau et al., 2006).

Il faut cependant garder à l'esprit qu'une représentation cérébrale isolée de chaque composante est difficilement envisageable, du fait de leurs interrelations dans les processus langagiers. Le traitement linguistique est gouverné par des régions cérébrales interconnectées qui ont permis par la suite de développer des modèles heuristiques au plus proche de cette organisation anatomique complexe.

1.3) Quelques modèles du langage

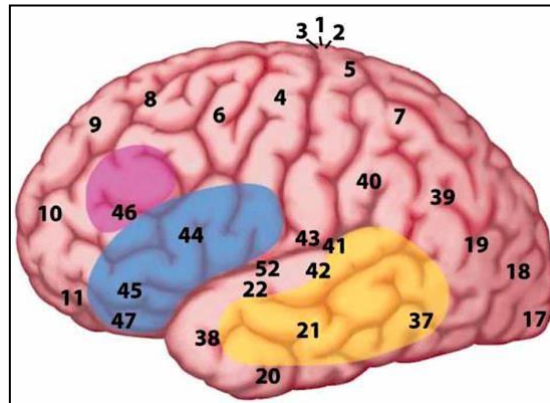
1.3.1) Le modèle MUC

Le modèle MUC (Memory Unification Control) décline le langage en trois entités : la mémoire, l'unification et le contrôle (Hagoort, 2013) :

- La mémoire correspond au savoir linguistique résultant de l'encodage et du stockage des connaissances nécessaires à la communication et au langage. Elle permet l'encodage d'éléments phonologiques, morphologiques et syntaxiques. Elle se situe dans le cortex temporal gauche et dans le gyrus angulaire pariétal gauche.
- L'unification permet de combiner les éléments stockés en mémoire à différents niveaux (phonologique, syntaxique et sémantique) en tenant compte du contexte linguistique

et social. Le processus d'unification fait intervenir diverses zones cérébrales, c'est un processus dynamique qui est géré notamment par le cortex frontal inférieur gauche.

- Le contrôle permet une utilisation écologique du langage, selon les aspects pragmatiques et sociaux. Il est permis grâce au contrôle exécutif et attentionnel qui va permettre l'adaptation de l'interlocuteur dans la situation de communication. Il est dépendant du cortex préfrontal dorsolatéral.



[Figure 5](#). Sur ce schéma représentant une vue latérale de l'hémisphère gauche, on retrouve les aires de la composante mémoire située dans le cortex temporal en jaune, les aires de l'unification se situent dans l'aire de Broca (aire 44 et 45 de Brodmann) et les aires adjacentes (aires 47 et 6) dans le lobe frontal. Le contrôle recrute une partie du lobe frontal (aire 46), en violet, et cortex cingulaire antérieur. (D'après Hagoort, 2013).

1.3.2) Le modèle à double voie

Hickok et ses collaborateurs proposent un modèle à deux voies constituées de la voie dorsale et la voie ventrale qui connectent les hémisphères cérébraux grâce à de nombreux faisceaux d'association (Hickok et al., 2007). Ainsi la latéralisation du langage serait organisée de la manière suivante : la voie ventrale serait bilatérale, donc présente dans les deux hémisphères, tandis que la voie dorsale serait latéralisée à gauche (Hickok, 2012). La voie dorsale serait impliquée dans les aspects moteurs et articulatoires du langage, la voie ventrale serait quant à elle impliquée dans les aspects lexico-sémantiques (Trébuchon et al., 2013)

- La voie dorsale analyse le signal acoustique du langage et le met en relation avec les représentations phonologiques du langage.

- La voie ventrale permet d'accéder à la compréhension du langage en mettant en lien les représentations phonologiques aux concepts lexico-sémantiques. Elle joue donc un rôle majeur dans l'accès sémantique du langage.

La voie ventrale est importante pour la prédiction de la future place des articulateurs en fonction du signal acoustique analysé par la voie dorsale. Elle apparaît comme fondamentale pour le maintien en mémoire de travail des représentations phonologiques à partir de processus moteurs (Hickok, 2012).

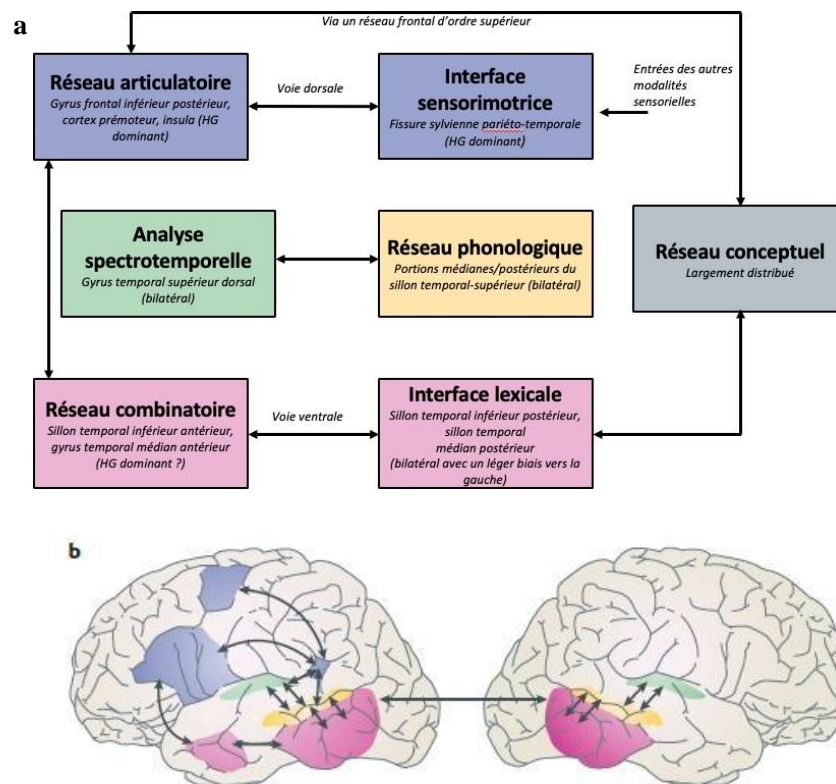


Figure 6. Un premier stade de traitement implique une analyse spectro temporelle effectuée par les aires corticales auditives bilatérales au niveau du gyrus temporal supérieur (vert). Le traitement phonologique est ensuite réalisé dans les parties médianes et postérieures du sillon temporal supérieur de façon bilatérale (jaune). Ensuite deux voies de traitement parallèle coexistent. La voie dorsale (bleu) associe les représentations sensorielles ou phonologiques aux représentations articulatoires et se situe au niveau de l'axe pariéto-temporal (fissure de Sylvius) mais également dans le lobe frontal dans l'hémisphère gauche. La voie ventrale (rose) associe les représentations phonologiques aux représentations lexicales et conceptuelles, et se situe dans la partie inférieure des lobes temporaux dans les deux hémisphères. (D'après Hickok et al., 2007).

Ce modèle à double voie reflète donc l'organisation dynamique du langage au niveau cortical. Néanmoins, l'avancée des recherches a permis de mettre en évidence un recrutement de réseaux sous-corticaux dans les processus langagiers.

1.3.3) Le modèle hodotopique

La chirurgie en condition éveillée est une technique qui permet de cartographier en temps réel les aires cérébrales fonctionnelles pour obtenir une résection optimale d'une tumeur cérébrale en préservant les aspects fonctionnels. Une stimulation électrique directe permet de neutraliser temporairement la fonction associée et d'évaluer l'impact sur le langage. L'utilisation de cette méthode a permis d'approfondir les connaissances sur l'organisation des réseaux cérébraux du langage. Un modèle hodotopique, dit dynamique, issu de ces travaux permet d'identifier les composantes nécessaires à la production d'un mot (dénomination). Ce modèle confirme l'organisation du langage en double voie et inclut également des réseaux sous-corticaux. Ainsi, le langage est sous-tendu par une connectivité corticale et sous-corticale (Duffau et al., 2014) et les réseaux cortico-sous-cortico permettraient le traitement phonologique, syntaxique et sémantique. Au niveau cortical, on retrouve deux voies de traitement :

- La voie dorsale constituée d'une voie directe, le faisceau arqué et d'une voie indirecte, le faisceau longitudinal supérieur.
- La voie ventrale, constituée d'une voie directe le faisceau fronto-occipital inférieur et une voie indirecte, le faisceau longitudinal moyen.

Au niveau sous-cortical, on retrouve des fibres de connexion qui rejoignent les noyaux gris centraux.

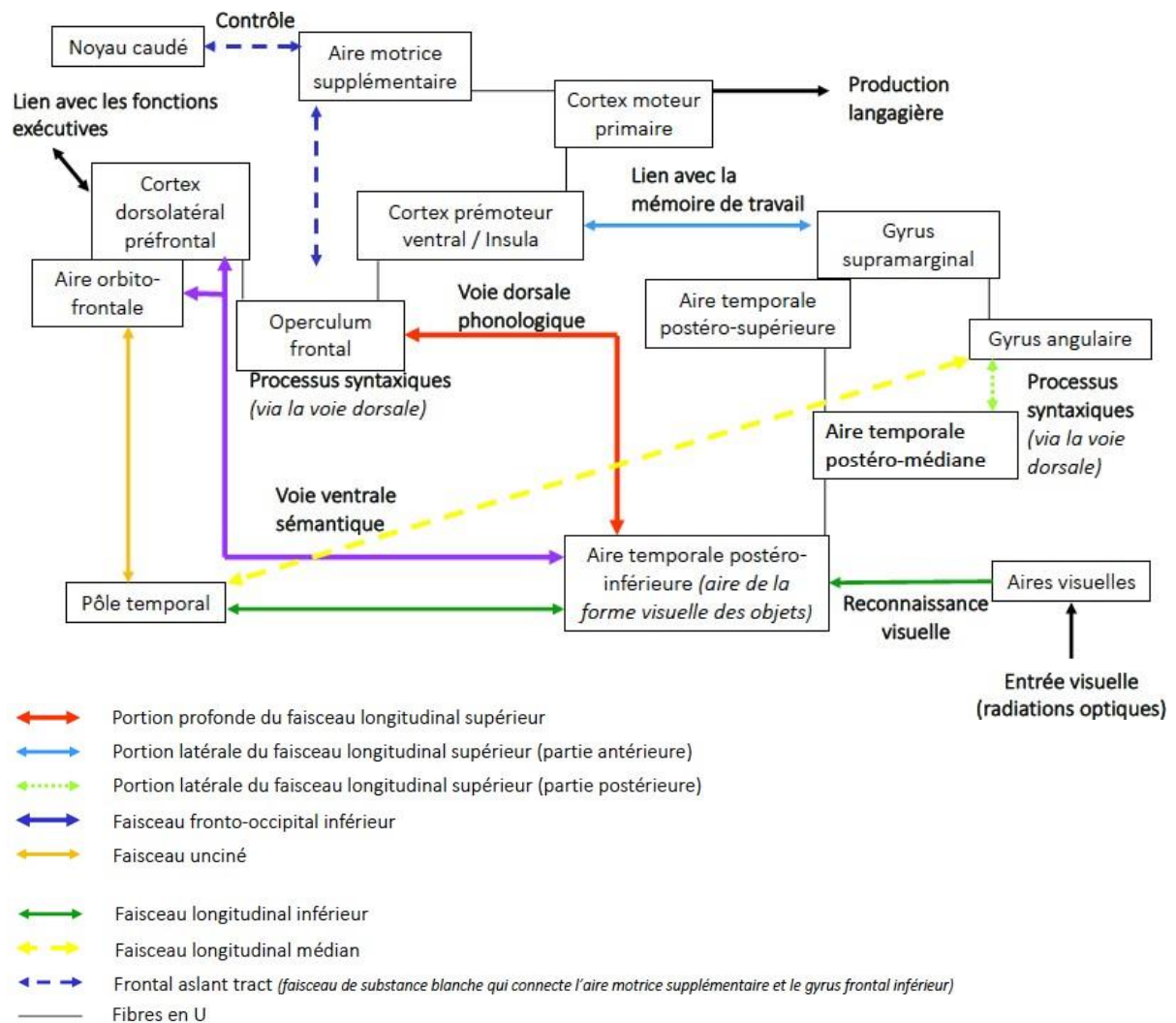


Figure 7. Représentation du modèle hodotopique. (D'après Duffau et al., 2014).

Dans ce modèle, la première étape correspond à la reconnaissance visuelle lorsqu'une image est présentée à un sujet. Ces étapes recrutent les aires visuelles primaires et l'aire visuelle de la forme des objets (aire postéro-inférieure temporelle). Ensuite, deux voies agissent en parallèle, la voie ventrale et la voie dorsale. Ces deux voies correspondent à celles établies par Hickok et ses collaborateurs (Hickok et al., 2007). Le concept est identifié ainsi que la forme phonologique du mot nécessaire à la programmation articulaire. Le cortex pré-moteur ventral et l'insula, associés aux aires motrices primaires, coordonnent l'articulation. D'autres aspects du langage ont également été identifiés dont l'aspect syntaxique. En effet, au niveau lexical des informations syntaxiques existent (genre, nombre ...), et semblent coordonnées par un réseau distribué temporo-frontal et cortico-subcortical. Ce dernier agit en parallèle des circuits sémantiques et phonologiques. De plus, ce modèle met en évidence l'importance de la

mémoire de travail pour le maintien des informations phonologiques et de la programmation articulo-motrice, ainsi que les fonctions exécutives pour le contrôle et le recrutement attentionnel qui sont des composantes non linguistiques mais essentielles pour un langage fonctionnel. Ce modèle, propose deux « hub » centraux situés au niveau du pôle temporal et des régions préfrontales. Ces « hub » représentent l'épicentre fonctionnel intégrant des informations de nature diverse issues de processus parallèles (Duffau et al., 2014). Néanmoins, il reste à intégrer dans ce modèle les aspects comportementaux (théorie de l'esprit, cognition spatiale ...) et les émotions, composants étroitement liés aux processus langagiers.

1.3.4) Modèle computationnel du langage : au carrefour des théories motrices et psycholinguistiques

Un modèle computationnel (*voir figure 7*) pour la production du langage tente d'associer les théories motrices du contrôle moteur aux théories psycholinguistiques. Dans ce modèle, la production du langage est contrôlée par un système de boucles de rétroaction. L'activation d'un concept va générer la représentation d'un mot appelée lemme qui va ensuite activer les programmes moteurs dans l'AB 44, et notamment le traitement syllabique, en vue de la production du mot. Les programmes moteurs du traitement phonémique sont recrutés dans le gyrus temporal supérieur et dans le cortex primaire moteur, et vont permettre la réalisation motrice et donc l'articulation du mot. Parallèlement, une copie du programme moteur est envoyée à deux boucles de contrôle. Une boucle somatosensorielle-cérébello-motrice contrôle le niveau phonémique du traitement phonologique et une boucle auditive-sylvienne incluant l'aire 44 de Brodmann est responsable du contrôle du niveau syllabique. De plus, une fois le mot produit un retour sensoriel est réaffecté à ces deux boucles : un retour externe (auditif) et un retour interne (somatosensoriel) qui permet d'affiner par la suite de renforcer l'action de contrôle des boucles en intégrant les conséquences sensorielles et motrices de la production d'un mot (Hickok, 2012).

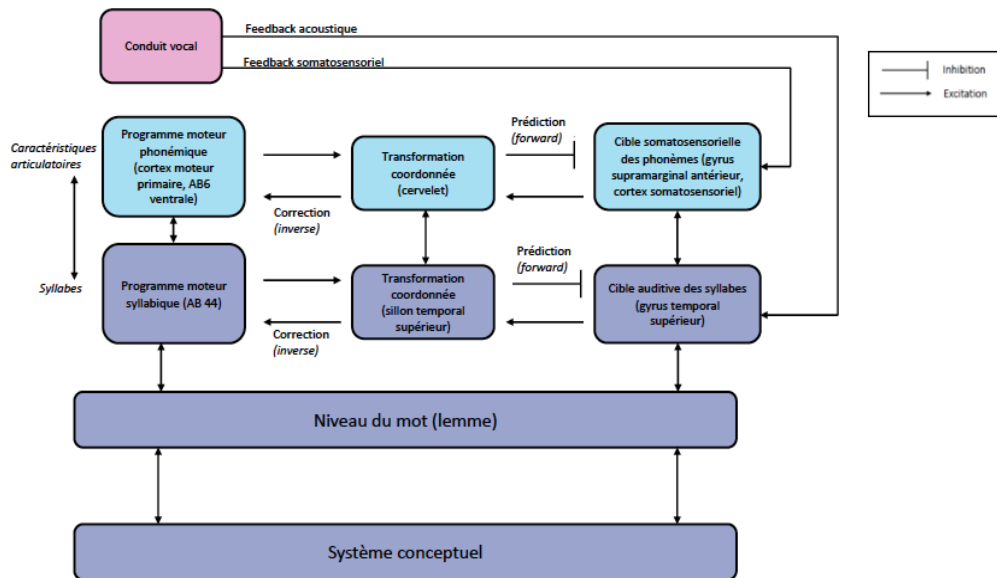


Figure 8. Dans ce modèle computationnel, le cervelet est inclus dans une boucle pariéto-cérébelleuse, qui assure le contrôle et la vérification du traitement phonologique. (D'après Hickok, 2012).

Il apparaît ici, que le cervelet aurait un rôle dans la production du langage, ce qui n'a pas été évoqué par les précédents modèles dans lesquels cette structure est totalement absente et le rôle ignoré.

Le cervelet apparaît donc ici comme une structure cérébrale importante tant d'un point de vue quantitatif, si l'on considère la part de cellules nerveuses qu'il contient que qualitatif, si l'on considère son rôle dans les apprentissages. Nous verrons dans quelle mesure, le cervelet, longtemps considéré comme une structure uniquement motrice, peut prendre part aux processus cognitifs de haut niveau, dont le langage. Nous développerons dans un premier temps l'organisation anatomique cérébelleuse et notamment les liens étroits entretenus avec les différentes régions cérébrales, ainsi que les modèles internes relatif au cervelet, afin de comprendre le rôle sous-estimé de cette structure dans les représentations dynamiques du langage. Peu d'enseignements traitent du cervelet et nous proposons dans le chapitre suivant de dresser un bref bilan des connaissances sur cette structure afin de mieux comprendre son rôle dans le langage.

II. Le cervelet

2.1) Généralités

2.1.1) *Description du cervelet*

Il serait hors de propos de détailler ici en détail la structure fine du cervelet. Néanmoins, l'organisation générale du cortex de cette structure permet d'expliquer, du moins en partie, son rôle dans les apprentissages. Pour cette raison, nous proposons ici une brève description de son organisation anatomo-fonctionnelle.

Le cervelet est situé en arrière du tronc cérébral et occupe une majeure partie de la fosse postérieure. Sa localisation en dérivation du tronc cérébral place le cervelet à l'interface des faisceaux ascendants et descendants (Vuillier et al., 2011). Bien qu'il ne représente que 10 % de la masse de l'encéphale, on estime qu'il contient 80% des cellules nerveuses (Azevedo et al., 2009). Nous pouvons dégager trois parties dans cette structure : le vermis impair, médian et deux hémisphères pairs et symétriques. Il comporte trois paires de pédoncules notés supérieurs, moyens et inférieurs, voies de passage des faisceaux qui connectent le cervelet aux différentes aires cérébrales (Vuillier et al., 2011; Onaolapo et al., 2017). Le cervelet est constitué de plusieurs lobes distincts, organisés en lobules, selon les fissures anatomiques. Le lobe vestibulaire (lobe flocculo-nodulaire) est la structure la plus ancienne, il est impliqué dans la perception de l'espace et des mouvements du corps. Globalement, le lobe antérieur comprenant les lobules I à X intervient quant à lui dans le maintien de l'équilibre, la posture, la régulation et la coordination motrice. Le lobe postérieur comprenant les lobules VI/VII et une partie du lobule IX jouerait un rôle dans l'apprentissage moteur, la planification et préparation des mouvements, et les fonctions cognitives (Jaber, 2017).

Le cervelet est constitué du cortex, des noyaux profonds et de substance blanche. Les pièces maîtresse du cortex cérébelleux se situent dans la couche intermédiaire : les cellules de Purkinje, neurones connus pour être impliqués dans l'apprentissage cellulaire (LTD) (voir Ito et al., 2014 pour revue). Leurs projections inhibitrices connectent les noyaux cérébelleux (qui constituent la sortie du cervelet). La substance blanche, quant à elle, est contenue un dense réseau de fibres afférentes (les fibres grimpantes et les fibres moussues) et de fibres efférentes

(les axones des cellules de Purkinje). La cytoarchitecture cérébelleuse est complexe néanmoins il est admis que les cellules de Purkinje sont les seules cellules efférentes pouvant exercer une inhibition sur les noyaux profonds du cervelet et les noyaux vestibulaires.

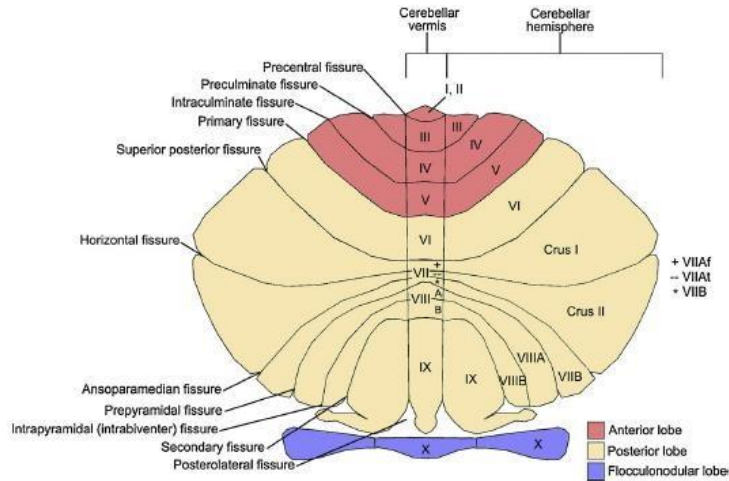


Figure 9. Représentation du cervelet, avec les fissures majeures délimitant les lobes et les lobules. Le lobe antérieur est représenté en rouge, le lobe postérieur en beige et le lobe flocculo-nodulaire en violet. Les deux hémisphères ainsi que le vermis sont représentés. Au niveau du lobule VII, du vermis jusqu'à la partie VIIA s'étend le crus I et du vermis jusqu'à la partie VIIB s'étend le crus II. Nous verrons par la suite le rôle majeur de ces Crus dans les fonctions cognitives. (D'après Schmahmann, 2019).

2.1.2) Rôle du cervelet dans la motricité

L'intérêt porté au cervelet et à ses fonctions s'est longtemps limité aux aspects moteurs. Les études se sont basées essentiellement sur des observations cliniques, mettant en évidence le lien entre les troubles de la coordination motrice et de l'équilibre et des lésions cérébelleuses. En effet, Rolando, grâce à des travaux menés chez les animaux, établit clairement le lien entre le cervelet et la coordination des mouvements (Rolando, cité par Fine et al., 2002). Flourens, en outre, rapporte que des lésions discrètes du cervelet chez différentes espèces animales provoquent une perte d'équilibre et des mouvements imprécis (Flourens, 1842). Le cervelet paraît donc comme une composante fondamentale dans l'initiation et/ou la coordination des mouvements. Cette distinction, qui de prime abord peut sembler anodine,

est importante et pose les prémices des questionnements concernant la coordination d'un mouvement engagé versus l'initiation d'un mouvement avec une finalité.

Chez l'Homme, Babinski (cité par Glickstein et al., 2009) définit une triade de symptômes résultant d'une atteinte cérébelleuse : l'hypermétrie (altération de la précision du mouvement volontaire), l'adiadococinésie (difficulté à effectuer une alternance de mouvements rapidement) et l'asynergie (incoordination dans les mouvements). De plus, à partir de l'étude des traumatismes cérébelleux chez les soldats, Holmes a mis en évidence trois types de lésions à l'origine de symptômes cliniques moteurs différents. Ces travaux (Holmes, 1917), puis, plus tard, ceux menés chez le chat (Snider et al., 1951) suggèrent l'existence d'une somatotopie cérébelleuse, confortée bien plus tard chez l'homme (Stoodley et al., 2009). Nous développerons ultérieurement la somatotopie mise en évidence dans le cervelet afin d'explicitier son rôle dans diverses fonctions motrices et non-motrices.

2.1.3) Cervelet et apprentissage moteur

Le cervelet est une structure cruciale pour le contrôle et la coordination des mouvements. La coordination motrice peut être assimilée à l'exécution rapide, précise et fluide d'un mouvement, elle fait ainsi référence à la dextérité avec laquelle un mouvement est réalisé (Rigal, 2006). Elle permet un ajustement spatio-temporel des contractions musculaires dans le but de réaliser un mouvement précis et résulte dans de nombreux cas d'un apprentissage. Ce processus d'apprentissage nécessite de la répétition et de l'expérience pour conduire à une transformation du comportement chez le sujet (Schmidt, 1975). Ces modifications comportementales, durables, acquises, relèvent elles-mêmes de modifications fonctionnelles et structurales des substrats biologiques, rendues possibles grâce au phénomène de plasticité. Ces plasticités sont indispensables pour que l'individu puisse répondre et interagir à de nouvelles sollicitations dans son environnement. En effet, lorsqu'une tâche motrice dépasse les capacités d'exécution du sujet, autrement nommé "problème moteur" (Paillard, 1999), celui-ci doit actualiser et proposer un nouveau programme plus adapté à la situation. Cela nécessite d'élaborer ce programme, de l'exécuter et de le répéter en fonction des retours sensoriels consécutifs à cette exécution. Notons dès à présent le lien que nous pouvons d'ores et déjà envisager avec le modèle computationnel présenté plus haut. Ainsi, l'apprentissage moteur d'un individu dans un environnement donné permet une adaptation aux exigences et

sollicitations externes afin d'exécuter les comportements les plus adéquats, efficaces et économes énergétiquement : il permet ainsi "une construction d'une coordination nouvelle, adaptée aux exigences de la tâche prescrite" (Delignières et al., 2009).

Le modèle computationnel que nous avons décrit puise ses origines dans des idées originales proposées dans les années 1970. En effet, Adams (1971) puis Schmidt (1975) ont proposé des modèles cognitivistes basés sur des boucles pour expliciter l'apprentissage moteur. Dans le modèle d'Adams, des traces mnésiques sont générées grâce à la répétition de l'action. Le mouvement va induire des ré-afférences proprioceptives et extéroceptives. Ces dernières permettent de calculer le différentiel entre la trace mnésique initiale et l'objectif à atteindre. Lorsque le système détecte une erreur (i.e. un différentiel non nul) alors la trace est modifiée pour ajuster le futur mouvement afin d'être mieux adapté à la situation : plus fluide et plus juste.

Dans le modèle de Schmidt, lorsque que le sujet réalise une action, l'individu sélectionne la réponse motrice *a priori* adéquate pour un problème moteur. Parallèlement à la commande de l'action, une copie de l'efférence motrice va permettre de vérifier l'exactitude du mouvement et éventuellement le corriger si cela est nécessaire. Lorsque que le mouvement est exécuté, alors un feedback qui permettra *in fine*, les corrections futures, est émis. Dans les deux modèles, les boucles de rétroaction permettent donc d'ajuster et de corriger les mouvements et leurs conséquences en modifiant le programme moteur initial encodé dans le système. Tous ces événements sollicitent de nombreuses structures nerveuses du système moteur (Hikosaka et al., 2002). Parmi ces structures les ganglions de la base et le cervelet, via des boucles striato ou cérébello-thalamo corticales, jouent des rôles prépondérants, en intervenant dans des modèles d'apprentissage distincts et complémentaires (Doya, 2000).

Globalement, on peut dégager trois grands types d'apprentissage, sollicitant préférentiellement chacun des structures cérébrales différentes : le cortex cérébral est spécialisé dans l'apprentissage non-supervisé, les ganglions de la base sont spécialisés dans l'apprentissage par renforcement tandis que le cervelet est prépondérant dans les apprentissages supervisés (*voir figure 10*).

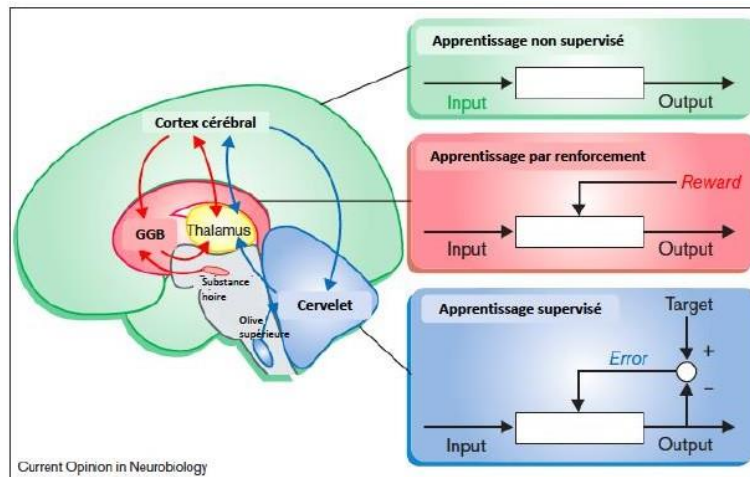


Figure 10. Ce schéma résume l'organisation et la localisation des différents types d'apprentissage moteurs. (D'après Doya, 2000).

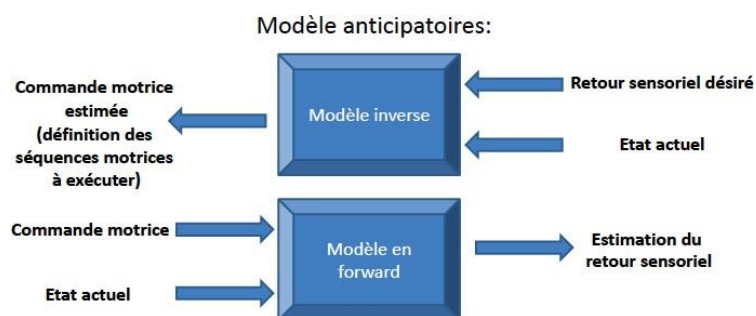
L'apprentissage non supervisé se caractérise par une détection puis un renforcement des connexions entre des neurones activés simultanément au cours d'une tâche (loi de Hebb), consolidant ainsi la trace mnésique. Les ganglions de la base permettraient un apprentissage par renforcement. Suite à une action réalisée, le comportement émis est renforcé. Grossièrement, lorsque le comportement est adapté (correspond à la finalité prévue), on observe une libération de dopamine qui renforcera la sélection du programme moteur par la suite. Le cervelet intervient dans les apprentissages supervisés, basés sur la détection d'erreurs et de coïncidences. Dans les années 1970, les modèles internes par anticipation ont été proposés (Francis et al., 1976), puis appliqués au fonctionnement cérébelleux. Le cervelet a été comparé à une structure de supervision qui traite de l'information. Selon cette proposition, le cervelet, dont la structure est cristalline, traite de façon universelle toutes les informations qu'il reçoit. Les cellules de Purkinje jouent un rôle central dans ce processus (Ito, 1979). Schmahmann, dans les années 1990 proposera que de la même manière que le cervelet régule la précision et la vitesse d'exécution d'un mouvement, il pourrait participer au contrôle des activités cognitives (Schmahmann, 1991). Cette supervision cérébelleuse pourrait donc très bien s'appliquer au langage, à la fois dans sa forme purement motrice (vocalisation) mais aussi dans les processus d'apprentissage et de traitement des signaux acoustiques.

La première théorie pour expliquer comment l'individu contrôle ses mouvements est basée sur un principe de régulation en réaction, grâce à un feedback sensoriel. Dans ce cadre,

Le retour sensoriel renseigne sur les conséquences d'un mouvement qui a été effectué. Ce retour sensoriel doit permettre d'ajuster la commande motrice si le but n'est pas atteint. La limite temporelle imposée par cette régulation « post mouvement » est incompatible avec l'exécution de mouvements complexes, rapides et coordonnés, comme celle nécessaire à la production de la parole. Afin de répondre à cette limitation, des auteurs ont proposé l'existence d'un contrôle moteur par anticipation (en « feed forward »), mettant en jeu des modèles internes ajustables en fonction de l'expérience (comme la répétition du mouvement par exemple). Cette théorie repose sur la plasticité du système nerveux central et sur la capacité de l'individu à :

1 : Apprendre les conséquences sensorielles de ses mouvements pour les anticiper par la suite. Ce système en feedforward (par anticipation) a pour but de prédire les conséquences sensorielles de nos actions. Les prédictions sont élaborées à partir de plusieurs composants : l'état actuel du corps, un modèle du système et une copie de l'efférence motrice (duplicata de la commande motrice et des sensations en résultant). Schématiquement, le système calcule le différentiel entre la prédiction et la position actuelle du corps en mouvement. Si ce différentiel n'est pas nul, c'est qu'il existe une erreur, liée à des perturbations internes ou externes. Cette erreur sera alors apprise et rectifiée par la suite.

2 : Déterminer les commandes motrices nécessaires pour atteindre un état sensoriel désiré (but). Dans ce modèle inverse, le système utilise le différentiel entre l'état sensoriel actuel et celui désiré du corps pour estimer une commande motrice nécessaire à la transformation de l'un en l'autre.



[Figure 11.](#) Représentation des deux modèles de régulation motrice par anticipation

Cette théorie des modèles internes inclut donc deux composants complémentaires les modèles forward et inverse. Le contrôle du mouvement par ces modèles repose schématiquement sur des « représentation neurales du monde externe utilisés pour prédire et ajuster les mouvements ». Selon toute vraisemblance, ces modèles internes sont élaborés au niveau du cervelet et ajustés avec la répétition des mouvements (Miall et al., 1993; Wolpert et al., 1998; Ito, 2005). Cet apprentissage est associé à des modifications structurelles. Ces dernières se retrouvent notamment au niveau des cellules de Purkinje, qui représentent une composante centrale dans les apprentissages moteurs simples mais aussi cognitifs. L'activation simultanée des cellules de Purkinje par les deux afférences va, à terme, engendrer une modification durable de la réponse pour les futures excitations. Cette modification structurelle se base sur un système de plasticité cellulaire appelé la dépression à long terme (LTD) (Ito, 1986). La LTD correspond à une diminution de l'activité cellulaire permettant un remodelage du circuit neuronal, impliqué dans la correction et une anticipation des erreurs ensuite (Wolpert et al., 1998; Ito et al., 2014). Elle est le soubassement biologique de plusieurs processus d'apprentissage impliquant cervelet, comme l'exemple de référence qu'est le conditionnement de fermeture de la membrane nictitante (Yeo et al., 1998). Après une ablation du cervelet, ce type d'apprentissage conditionné n'est en effet plus possible et la plasticité structurale et fonctionnelle des cellules de Purkinje semblent être la base de cet apprentissage. Ces cellules en détectant les coïncidences (arrivée conjointe des informations issues des fibres grimpantes et des fibres parallèles) peuvent anticiper et corriger les erreurs de programmation avant que le mouvement ne soit effectué : ils génèrent un feedback interne, qui précède le feedback externe (Wolpert et al., 1998).

Le cervelet, du fait de sa structure et de sa plasticité est un élément clé de l'apprentissage moteur. Les différents modèles internes établis en impliquant cette structure, permettent le contrôle des actions motrices qui pourraient éventuellement concerner le langage. Dans les années 1970, Lechtenberg montre le lien entre la dysarthrie et une atteinte cérébelleuse à droite et confirme ainsi l'idée que le cervelet droit est considéré comme régulateur des mouvements volontaires et notamment des mouvements articulatoires nécessaires à la parole (Lechtenberg et al., 1978). Dans une population pédiatrique, des difficultés similaires ont été rapportées. Après une opération de la fosse postérieure, environ 69% des enfants présentaient une dysarthrie (Morgan et al., 2011). Des troubles de l'élocution, des altérations du débit de parole sont souvent retrouvées chez les patients cérébelleux (Silveri

et al., 2000), illustrant l'implication prépondérante du cervelet dans le contrôle des mouvements fins, et notamment dans les aspects "purement" moteurs de la production du langage parlé, l'articulation motrice. Des travaux, complémentaires menés sur le cervelet, grâce au développement des techniques d'investigation de plus en plus perfectionnées (comme l'IRMf ou encore la stimulation magnétique transcrânienne) ont en outre révélé que le rôle du cervelet ne se limite pas à ce pur aspect moteur. Il serait aussi sollicité pour la perception et le traitement des données linguistiques (Mariën et al., 2014). Cette implication "extra motrice" repose sur des connexions, sous forme de boucles, entre le cervelet et des centres cérébraux impliqués dans les différents niveaux du langage que nous avons décrits plus haut dans ce mémoire.

2.2) Rôle non-moteur du cervelet dans le langage

2.2.1) Les boucles cérébro-cérébelleuses

Les structures récentes du cervelet comprenant le cortex cérébelleux latéral et le noyau dentelé se sont développées conjointement aux aires associatives corticales au cours de l'évolution (Leiner et al., 1991). D'un point de vue ontogénétique la maturation du cervelet apparaît vers la préadolescence avec un pic d'évolution vers 10-13 ans (Kosar et al., 2012; Tiemeier et al., 2010). L'augmentation et la spécialisation des connexions cérébro-cérébelleuses associées au développement du cervelet latéral ont permis de considérer ces structures comme le substrat des fonctions cognitives de haut niveau (Leiner et al., 1991).

Le cervelet est relié aux différentes structures cérébrales par un ensemble de boucles. La boucle motrice et somatosensorielle relie le cervelet au cortex moteur. La boucle pariétale relie le cortex pariétal et le cervelet et régule notamment l'attention visuelle. La boucle préfrontale existe relie l'aire préfrontale et le cervelet et serait le soubassement de l'implication du cervelet dans les fonctions exécutives et l'apprentissage procédural notamment. La boucle temporale relie le cervelet au cortex temporal et inclut l'hippocampe et l'amygdale. Il existe également une boucle reliée aux aires oculomotrices et impliquée dans le contrôle des saccades oculaires (D'Angelo et al., 2013). Les structures phylogénétiques

récentes du cervelet sont reliées par ces boucles aux fonctions mentales, tandis que les structures plus anciennes seraient préférentiellement affectées aux fonctions motrices. Comme nous l'avons mentionné plus haut, le cervelet présente une architectonie uniforme et la spécialisation fonctionnelle des régions cérébelleuses dépend donc de la nature des connexions établies avec les différentes aires cérébrales (Tiemeier et al., 2010). L'identification de ces circuits cérébello-thalamo-cortico ont suggéré l'implication du cervelet dans des fonctions autres que motrices (Leiner et al., 1986; Schmahmann, 1991) De nombreuses régions cérébelleuses communiquent avec des zones corticales associatives non-motrices et cognitives, et s'organisent selon une somatotopie précise (Sokolov et al., 2017).

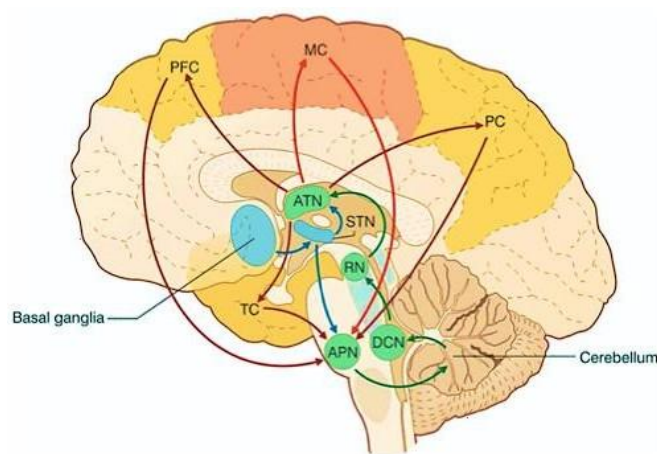


Figure 12. Représentation de la connectivité bidirectionnelle entre le cervelet et le cortex cérébral. Les projections du cortex et des ganglions de la base à travers le noyau subthalamique (STN) et les aires limbiques sont relayées dans le cervelet au niveau des noyaux antérieurs du pons (APN). Le cervelet renvoie des réponses à travers les noyaux cérébelleux profonds (DCN), le noyau rouge (RN) et le noyau thalamique antérieur (ATN) pour ensuite atteindre le cortex moteur (MC), le cortex préfrontal (PFC), le cortex pariétal (PC) et le cortex temporal (TC). Ces connexions sont supportées par l'architecture fonctionnelle et anatomique à l'origine de ces nombreux circuits cérébelleux-thalamo-cérébro-corticaux. (D'après D'Angelo et al., 2013).

2.2.2) Altération cérébelleuse et dysfonctionnement cognitif

L'évaluation neuropsychologique des patients présentant une ataxie cérébelleuse montre que celle-ci peut être associée à une démence, une psychose, des troubles de la mémoire visuelle et verbale et à des déficits en théorie de l'esprit. (Berntson et al., 1982 ;

Watson, 1978). La mise en lumière de l'implication du cervelet dans ces processus mentaux a été étayée notamment avec les observations cliniques et anatomiques de Schmahmann. A partir d'une population de patients, Schmahmann et ses collègues montrent qu'une atteinte cérébelleuse peut provoquer des troubles mentaux qui ne sont pas associés à des désordres moteurs (Schmahmann, 1998). Ces auteurs iront plus loin en proposant un modèle général de la contribution du cervelet dans les fonctions cognitives, dans lequel le cervelet agit comme régulateur de la vitesse, du contenu et des appropriations des idées mentales (Schmahmann, 1991). Par la suite, le concept de dysmétrie de la pensée sera développé, regroupant les troubles de l'intellect et de l'émotion en lien avec un dysfonctionnement cérébelleux et notamment un défaut de régulation et de modulation des processus mentaux (Schmahmann, 1998). Ainsi, Schmahmann notamment, développe l'idée que les troubles non-moteurs s'exprimeraient de la même façon que les troubles moteurs (en termes d'hypo ou d'hypermétrie), correspondant à des réponses non adaptées aux stimuli. Le cervelet régulerait des aspects non-moteurs en se basant sur les modèles utilisés dans la régulation et le contrôle des mouvements développés précédemment.

Le syndrome cognitivo affectif cérébelleux (appelé aussi syndrome de Schmahmann) se caractérise par des altérations des fonctions exécutives se répercutant notamment sur les processus d'attention, la mémoire de travail, le raisonnement abstrait, la planification, l'attention visuo-spatiale. Des changements émotionnels sont rapportés, ainsi qu'une altération du langage avec des déficits notables aussi bien en production qu'en compréhension (Schmahmann, 1998). Ce même syndrome a été retrouvé chez une population pédiatrique constituée d'enfants atteints de tumeurs de la fosse postérieure (Levisohn et al., 2000), confirmant ainsi le rôle du cervelet dans les fonctions cognitives, dites de haut-niveau. Les techniques modernes d'imagerie cérébrales ont permis de localiser plus précisément les zones cérébelleuses impliqués dans ces fonctions.

2.2.3) Somatotopie du cervelet et langage

La nature des différentes boucles cérébello-corticales révèle une organisation topographique précise pour les fonctions motrices et cognitives du cervelet. En effet, il a été avancé puis démontré l'existence d'une dichotomie fonctionnelle entre les aspects moteurs et non-moteurs. L'activation des régions cérébelleuses est dépendante de la nature de la tâche. La moelle épinière, le tronc cérébral et les zones corticales sensorimotrices sont reliées aux

lobes cérébelleux antérieurs, tandis que le cortex associatif est plutôt relié au cervelet postérieur (Stoodley et al., 2012).

Une tâche sensorimotrice active le cortex sensorimoteur et le cervelet et plus précisément le lobe médial (lobules IV, V) et le lobe postérieur (lobule VIII). Une activation simultanée est retrouvée au sein des lobules VI et VII du cervelet lors de tâches cognitives. Le cervelet limbique comprend le noyau fastigial et le vermis (Stoodley et al. 2010 ; Stoodley et al., 2012). Les lobules VI et VII, et plus spécifiquement au sein des Crus I et II semblent affectés plus particulièrement au traitement des processus langagiers (Stoodley et al., 2012; Guell et al., 2018), indépendamment des aspects moteurs de la parole (Runnqvist et al., 2016).

A l'instar du cerveau, la somatotopie du cervelet présente également une latéralisation, qui peut être associée à l'organisation cérébrale hémisphérique. En effet, les lésions cérébelleuses semblent impacter les fonctions soutenues par l'hémisphère cérébral controlatéral, soulignant ainsi l'existence d'un diachisis controlatéral (Cook et al., 2004). Les régions cérébelleuses associées aux régions cérébrales motrices montrent une asymétrie peu développée. Les tâches langagières montrent de façon nette le recrutement préférentiel de l'hémisphère cérébelleux droit, notamment au niveau du Crus I et du Crus II. Les tâches spatiales recrutent de façon prédominante l'hémisphère gauche, au niveau du lobule VI (Wang et al., 2013). De plus, le degré de latéralisation cérébelleux est corrélé au degré de latéralisation cérébral, (Wang et al., 2013). L'asymétrie observée au niveau cérébelleux semble donc refléter l'organisation cérébrale, néanmoins celle-ci est organisée de façon controlatérale, notamment pour le langage (Kavaklioglu et al., 2017).

Il y a désormais un consensus qui reconnaît l'implication du cervelet dans diverses tâches cognitives, comme la mémoire de travail mais surtout dans les différents processus du langage (Mariën et al., 2014). Néanmoins, certains auteurs continuent de considérer son activation lors de tâches cognitives comme des épiphénomènes moteurs (Glickstein et al., 2009). Plusieurs cohortes de patients présentant des anomalies ou des lésions du cervelet ont présenté consécutivement des déficits langagiers. La revue des principales études (*voir figure 13*) a permis de montrer un lien non anecdotique entre le cervelet et le langage. Ces derniers souffrent de déficits qui peuvent porter sur les différentes composantes du langage : phonologie (Ackermann et al., 1997), lexicale (Cook et al., 2004; Tavano et al., 2007; Schweizer et al., 2010; Baillieux et al., 2010), syntaxe (Fiez et al., 1992; Schmahmann, 1998; Fabbro et al., 2000; Tavano et al., 2007) sous différentes modalités, aussi bien en compréhension (Greve et

al., 1999; Riva et al., 2000; Mariën et al., 2009) qu'en production (Levisohn et al., 2000). Le nombre de cas conséquent, rapporté dans la littérature par le biais des études neuro-anatomiques, cliniques et de la neuro-imagerie fonctionnelle montrent que l'intervention du cervelet dans le langage n'est pas négligeable (Murdoch, 2010; Fiez, 2016). Néanmoins, la nature précise de cette intervention dans les processus d'apprentissage, de compréhension et de production du langage demeure encore lacunaire.

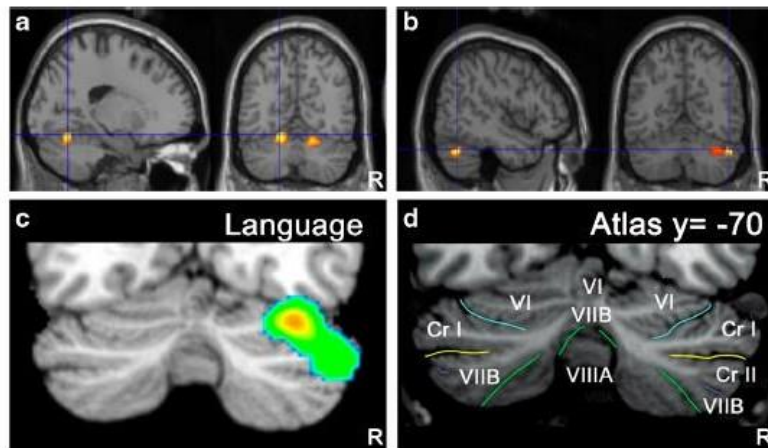
<i>Auteurs</i>	<i>Nombre de cas</i>	<i>Type et localisation de la lésion</i>	<i>Déficits langagiers observés</i>
(Fiez et al., 1992)	1	Lésion artère cérébelleuse supérieure droite	Altération de la génération de verbes, perte du jugement syntaxique et sémantique
(Ackermann et al., 1997)	10	Atrophie cérébelleuse	Déficit dans la perception des paires minimales (analyse phonémique)
(Schmahmann, 1998)	20	Résection vermis (1), AVC bilatéral (2), AVC droit (7), AVC gauche (4), infectieuse (3), atrophie cérébelleuse (3)	Anomie, dysprosodie, agrammatisme
(Greve et al., 1999)	1	Hémisphère cérébelleux droit	Déficits en compréhension orale
(Levisohn et al., 2000)	19	Medulloblastome (11), astrocytome (7), épendymome (1)	Hypospontanéité du langage, temps de latence, manque du mot
(Riva et al., 2000)	26	Astrocytome cérébelleux (15), medulloblastome du vermis (11)	Difficultés dans le langage complexe, déficit de dénomination, désignation voire mutisme (quand atteinte du vermis)
(Fabbro et al., 2000)	4	Atteinte du vermis (2) Atteinte hémisphère droit (1) Atteinte hémisphère gauche (1)	Erreurs morphosyntaxiques, altération de la génération de mots, difficultés de compréhension Erreurs de production morphosyntaxique, synonymes Déficits mineurs en production morphosyntaxique
(Cook et al., 2004)	5	AVC cérébelleux	Altération langage figuratif, association de mots, génération de synonymes/antonymes, définition de mots
(Tavano et al., 2007)	27	Malformation congénitale du cervelet	Déficit de compréhension lexicale et morphosyntaxique
(Mariën et al., 2009)	1	Lésion artère cérébelleuse supérieure droite	Déficits en compréhension orale, Diminution de la fluence sémantique (accès au lexique)
(Baillieux et al., 2010)	18	Hémisphère cérébelleux droit (8), hémisphère cérébelleux gauche (6), vermis (3), bilatérale (1)	Déficit de dénomination, diminution des fluences verbales
(Schweizer et al., 2010)	12	Lésion cérébelleuse droite	Diminution de la fluence phonémique

[Figure 13](#). Les études réalisées sur des cohortes de patients, ont permis d'établir un lien entre des symptômes langagiers et une atteinte cérébelleuse. L'intérêt porté au recrutement des structures cérébelleuses chez des sujets "sains" lors de tâches langagières a permis d'affiner notre compréhension du rôle du cervelet dans ces processus langagiers.

2.2.4) Activation cérébelleuse chez des sujets sains lors de tâches langagières

Selon une première hypothèse l'activation des zones cérébelleuses lors de tâches linguistiques serait le résultat des processus moteurs recrutés lors de la production du langage. Ceux-ci interviendraient notamment dans les aspects perceptifs du langage, au niveau de l'articulation ou la boucle phonologique interne qui permet une répétition subvocale de ce qui est entendu ou produit. Cependant cette hypothèse ne semble pas à elle seule expliquer l'implication du cervelet, aussi bien chez des patients cérébelleux (Justus, 2004) que chez des sujets sains (Chen et al., 2005).

Les tâches de fluence verbale sont des épreuves utilisées en neuropsychologie et en orthophonie. Elles permettent d'évaluer les stratégies d'évocation lexicale ainsi que l'organisation du stock lexical. L'utilisation de l'IRM fonctionnelle a révélé une activation du cervelet chez 12 sujets sains lors de l'exécution de ces tâches, suggérant un rôle dans l'accès lexical (Schlösser et al., 1998). De façon complémentaire, on retrouve une forte activation du cervelet droit lorsque les participants évoquent des mots à partir d'un critère alphabétique (une lettre). Cette activation est moindre lorsque le critère est sémantique (catégories). Ceci suggère que le cervelet est plus impliqué lorsqu'il s'agit de mettre en place une stratégie nouvelle et moins habituelle d'évocation lexicale (Arasanz et al., 2012). D'autres arguments plaident en la faveur d'une implication du cervelet dans la genèse des mots. En effet, quand on présente une lettre (Lurito et al., 2000), une syllabe (Ojemann et al., 1998) ou un mot (Lurito et al., 2000; Seger et al., 2000) à un sujet et qu'on lui est demande d'évoquer un autre mot en lien avec le stimulus, alors l'hémisphère cérébelleux droit est activé, conjointement aux différentes aires cérébrales du langage (Lurito et al., 2000).



[Figure 14.](#) Les études d'IRMf montrent donc que les processus articulatoires activent la partie médiale bilatérale du lobule IV dans le cervelet (image a). Lors d'une épreuve de génération de verbes (évocation lexicale), on retrouve une activation dans le lobule VI au niveau du Crus I et II (image b). Une méta-analyse d'imageries fonctionnelles montre que les tâches de haut niveau et spécifiquement le langage activent le lobule VI et plus précisément le Crus I (images c et d). (D'après Mariën et al., 2014).

Des auteurs ont montré qu'au cours d'une tâche de classification sémantique, qui consiste à classer les mots selon les catégories auxquelles ils appartiennent, une activation est présente dans le cortex préfrontal gauche, le cortex temporal latéral gauche, l'aire antérieure cingulaire et le cervelet droit (Tieleman et al., 2005). Lorsqu'il s'agit d'extraire un critère commun (sémantique ou phonologique) d'une liste de mots présentée visuellement, on retrouve une activation du cervelet droit associée à une activation des deux voies de traitement du langage, la voie phonologique et la voie sémantique (McDermott et al., 2003). Le cervelet semble également intervenir dans la perception des paires minimales (c'est à dire deux mots différents sémantiquement mais qui se différencient par un seul phonème). Le cervelet joue donc un rôle important dans la perception des signaux temporels de la parole et notamment au niveau de la distinction phonétique (Mathiak et al., 2002).

Les tâche de jugement sémantique (ou discrimination sémantique) qui demandent aux sujets de déterminer si deux mots appartiennent à la même catégorie sémantique ou non, recrutent des structures cérébelleuses. Lors d'une tâche de discrimination sémantique de plus en plus précise, Xiang et ses collaborateurs, rapportent une activation du cervelet latéral droit qui tend à augmenter lorsque la tâche se complexifie (Xiang et al., 2003). De plus, le cervelet

occupe un rôle prépondérant dans les processus de compréhension du langage, et notamment au niveau de l'aspect prédictif. Lorsqu'un locuteur devient expert, il peut, grâce à un système de prédiction, anticiper la fin d'une phrase par l'analyse du contexte linguistique (au niveau syntaxique et sémantique) et de l'environnement (Bonhage et al., 2015). Le cervelet serait donc également impliqué dans cette forme de prédiction linguistique. En effet, une étude utilisant l'imagerie fonctionnelle montre une activation plus importante du Crus I et II pour les phrases dont la fin est prédictible (Moberget et al., 2014). Les prédictions linguistiques activent un réseau englobant le cortex prémoteur, le thalamus, le noyau caudé, l'hippocampe et le cervelet (Bonhage et al., 2015). Cela a également été confirmé avec la stimulation transcrânienne, qui inhibe alors ces processus de prédiction lorsqu'elle est appliquée au niveau du cervelet droit (Lesage et al., 2012; Miall et al., 2016). L'implication du cervelet dans la prédiction linguistique est liée au traitement phonologique. En effet, un modèle interne linguistique initié au niveau du cervelet serait spécialisé dans le traitement phonologique et permettrait le traitement des unités sémantiques. En ce sens, le cervelet jouerait donc un rôle prépondérant dans l'aspect sémantique du langage (Lesage et al., 2017).

2.2.5) Influence du cervelet dans certains troubles neurodéveloppementaux

Des dysfonctionnements cérébelleux ont été évoqués dans certains troubles neurodéveloppementaux, notamment l'autisme où les troubles moteurs mais également l'altération du développement des fonctions cognitives (attention, habiletés conceptuelles), sont probablement liés à une altération du vermis cérébelleux (Ciesielski et al., 1997; Jaber, 2017). Dans le cadre de la dyslexie, les difficultés de conscience phonologique, de mémoire de travail et de reconnaissance de mots, aurait aussi pour origine un dysfonctionnement cérébelleux (Nicolson et al., 2001). La comorbidité fréquente d'un trouble développemental du langage associé à des déficits dans les habiletés motrices, en mémoire de travail et un trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité a suggéré une origine commune à l'ensemble de ces troubles. La piste cérébelleuse a été évoquée, et notamment à travers l'idée que ces troubles trouveraient leurs origines dans un déficit de l'apprentissage procédural. Cette idée avait été développée par Ullman et collaborateurs, sous le nom de l'hypothèse du déficit procédural (Ullman et al., 2005). La mémoire procédurale est une mémoire implicite permettant d'acquérir

des connaissances de façon graduelle, pour les utiliser de façon rapide et automatique ensuite. Dans le langage, cette mémoire est fondamentale dans l'acquisition de la syntaxe, de la morphologie et de la phonologie, pour extraire les régularités et comprendre la façon dont sont imbriqués les éléments. Le lexique est dépendant de la mémoire déclarative (Ullman et al., 2005). L'apprentissage procédural sollicite des structures telles que les ganglions de la base et le cervelet. Bates propose une hypothèse basée sur des déficits fonctionnels des infrastructures du langage, pour expliquer un trouble développemental du langage spécifique ou non. En effet, dans le cas d'un trouble développemental du langage (anciennement appelée trouble spécifique du langage ou dysphasie), il semblerait qu'il y ait des déficits au niveau des processus informatifs (temporalité, attention, mémoire). Dans l'autisme, Bates évoque des difficultés d'attention conjointe et un manque d'appétence à la communication qui engendrerait des difficultés à acquérir un langage fonctionnel (Bates, 2004).

En somme, nous pouvons retenir deux hypothèses explicatives du trouble développemental du langage. Une altération peut être présente au niveau des systèmes perceptifs et des capacités de communication présentes chez l'enfant à la naissance. Cela va donc engendrer une perception altérée qui va donc conduire à une mauvaise représentation des systèmes linguistiques. Compte tenu des influences que le cervelet exerce au niveau de l'intégration somato sensorielle et de l'apprentissage, il est plus que probable qu'une atteinte de cette structure, en lien avec les aires cérébrales dédiées soit à l'origine de tels troubles

L'avancée des recherches et les technologies actuelles associées à l'émergence de modèles théoriques solides permettent désormais d'ouvrir un large champ de réflexion quant au rôle du cervelet dans les composantes du langage. Ce qui semble moins clair à ce jour reste ses rôles précis dans les différentes tâches ou processus émotionnels ou cognitifs. Comme le suggèrent de nombreux auteurs (Ito, 2008; Sokolov et al., 2017), la compréhension et l'affinement des modèles théoriques internes pour expliquer le fonctionnement du cervelet notamment dans les fonctions motrices, a permis de proposer l'extension de ces modèles aux aspects cognitifs et notamment au langage. Ainsi, nous développerons l'hypothèse selon laquelle le cervelet interviendrait dans le langage en ayant recours à un modèle par anticipation, déjà développé pour les aspects moteurs, afin d'explicitier l'acquisition et le développement du langage, mais également proposer une hypothèse explicative des troubles du langage observés en clinique.

III. Influence de l'anticipation dans le langage

3.1) Le modèle DIVA

3.1.1) *Présentation du modèle*

Un modèle neurobiologique sensorimoteur de la production de la parole, le modèle DIVA (Direction Into Velocities Articulators) souligne l'importance des aspects prédictifs dans le langage et offre un support de réflexion intéressant (*voir figure 15*). Ce modèle met en évidence la nécessité d'intégrer diverses informations (auditives, somatosensorielles, motrices) issues du feedback dans la production de la parole. Pour produire un message vocal, la cartographie des sons de la parole représentée dans le cortex prémoteur gauche s'active et génère deux systèmes de contrôle. Le système direct supervise l'exécution du programme moteur. Parallèlement l'autre système émet des feedbacks pour informer des conséquences sensorielles de l'action. Ces systèmes vont pouvoir établir des comparaisons et corriger si besoin la commande initiale, lorsque celle-ci n'est pas adaptée. Ensuite, la carte articulatoire s'active pour contrôler la position des articulateurs. Au total, le schéma d'activation d'une unité vocale est contrôlé par une commande directe associée à des feedback sensoriels (Guenther, 1994; Guenther et al., 2012). Dans ce modèle, le cervelet est intégré, en dérivation, entre la "carte des sons de la parole" et la "carte des position et vitesse des articulateurs" qui commandent les muscles articulatoires. Il s'intègre donc dans une boucle cervelet-cortex prémoteur et le gyrus frontal postérieur-carte des sons-cervelet. Il est, en outre, en dérivation de la voie qui unit le cortex prémoteur et le gyrus frontal inférieur et le cortex moteur ventral. Cette position du cervelet lui permet de superviser l'exécution motrice de la parole. Néanmoins, nous remarquons qu'aucune afférence sensorielle ne gagne directement le cervelet.

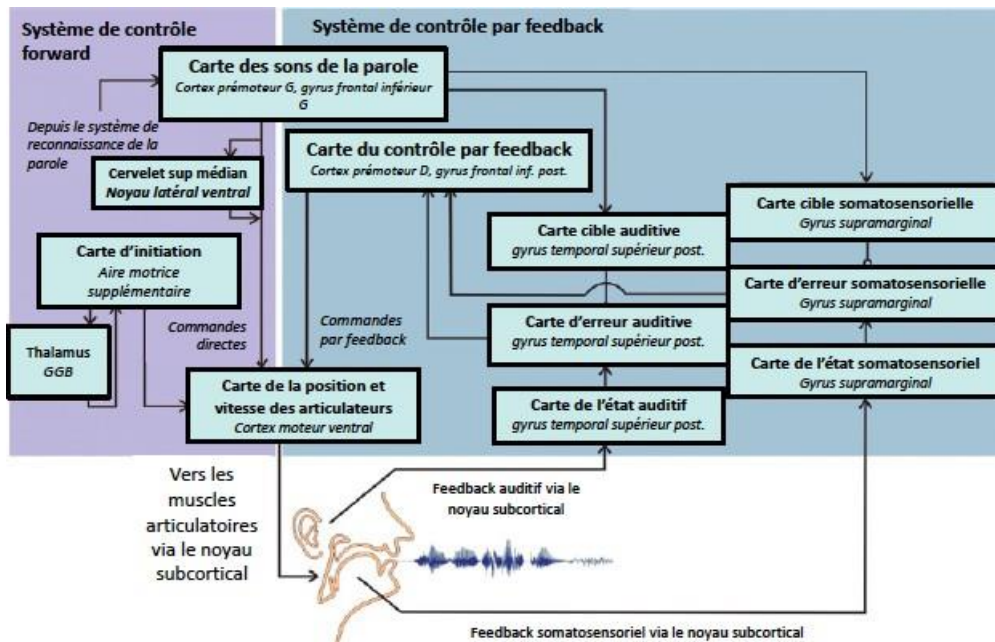


Figure 15. Représentation du modèle computationnel de la parole, le modèle DIVA. (D'après Guenther et al., 2015).

3.1.2) Critiques du modèle

Au moins quatre critiques peuvent être formulées concernant ce modèle, bien qu'il paraisse complet : la première est qu'il ne mentionne que le modèle en forward (existant dans le modèle d'Hickock de 2012), négligeant le second modèle interne que nous avons décrit, le modèle inverse. La seconde critique est l'absence de la perturbation environnementale induite par la production de la parole (comme la réaction du destinataire). Ensuite, comme nous l'avons mentionné plus haut, les afférences sensorielles ne gagnent pas le cervelet dans ce modèle et la carte du contrôle par feedback n'est pas reliée au cervelet, tandis que ce système peut jouer un rôle essentiel dans l'actualisation des modèles internes et la détection de l'erreur. Enfin, nous pensons que les émotions jouent un rôle important dans la communication. La prosodie tout comme les gestes sont indissociables également de la communication. Le modèle heuristique que nous allons proposer, tentera de rassembler les données de diverses disciplines (linguistique, psychologie et neurosciences). Il a pour but de proposer une hypothèse explicative de la façon dont le cervelet peut intervenir dans le langage, via les modèles internes. Nous considérons que grâce à son "pilotage" en dérivation des grandes voies sensorimotrices, de son rôle dans les modèles internes, le cervelet se retrouve à l'interface des processus sensori-moteurs et émotionnels (Hilber et al., 2019). Il permettrait de construire, et d'actualiser les représentations internes en fonctions des conséquences des actions dans l'environnement,

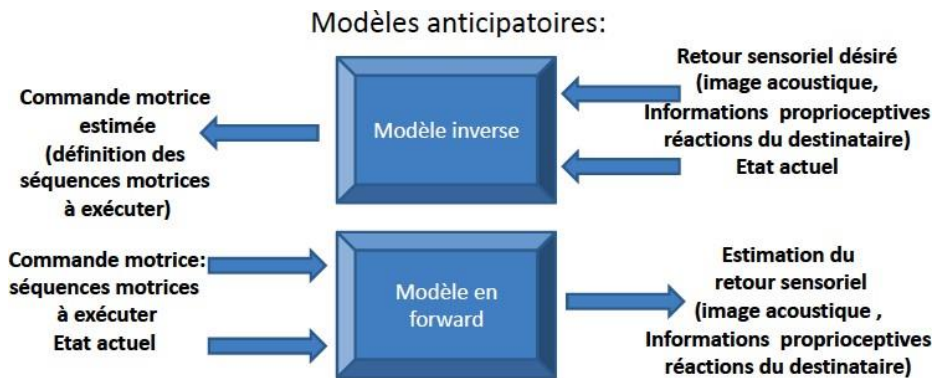
tout au long de l'ontogenèse de l'individu. Impliqué à la fois dans les processus moteurs, sensoriels, émotionnels, cognitifs et sociaux, il apparaît comme un dénominateur commun aux éléments nécessaires à la communication dans sa globalité. C'est pourquoi en partant du modèle cybernétique DIVA, en incluant les données neurobiologiques et les concepts cités jusqu'alors, nous proposons de compléter l'approche computationnelle de l'apprentissage de la parole en considérant le langage comme un moyen complexe de communication multi-canal et en perpétuelle évolution dans un contexte.

3.2) Proposition d'un modèle théorique de la communication intégrant le cervelet

3.2.1) Intrication du langage dans un contexte de communication

Comme nous l'avons déjà évoqué, le modèle DIVA intègre diverses régions corticales et sous-corticales : les ganglions de la base, le thalamus, le cervelet sont associés aux cortex moteur et prémoteur, somatosensoriel, auditif et frontal formant un réseau d'aires interconnectées nécessaires à la production du langage (Guenther et al., 2015). Les apports de la linguistique structuraliste, ont avancé que le langage ne s'entend que par son intégration dans un contexte de communication (Jakobson, 1963). La forme du langage caractérisée par les différentes composantes linguistiques, ne peut être dissociée des aspects sémantiques mais également pragmatiques qui intègre les données de l'environnement pour que le message soit adéquat (INSERM, 2007). Dès lors, le langage est une activité cognitive complexe qui permet la mise en relation d'unités sensorimotrices, articulatoires (image acoustique), avec des concepts, en d'autres termes, la mise en relation d'un signifiant avec son signifié (Saussure, 1916). En ce sens, il apparaît donc cohérent que de nombreuses aires cérébrales soutiennent les processus langagiers. Cela a été confirmé par des données plus récentes illustrant les représentations du langage de façon dynamique, par le biais du modèle à double voie puis du modèle hodotopique (Duffau et al., 2014; Hickok et al., 2007). Dans cette dynamique, nous nous attacherons à intégrer le rôle du cervelet dans les processus langagiers au regard du contexte environnemental et de ses perturbations induites par le locuteur. Nous entendons, de plus, replacer le rôle central joué par les émotions et les systèmes non vocaux non verbaux, vocaux non verbaux dans la communication.

3.2.2) Modèles internes et langage



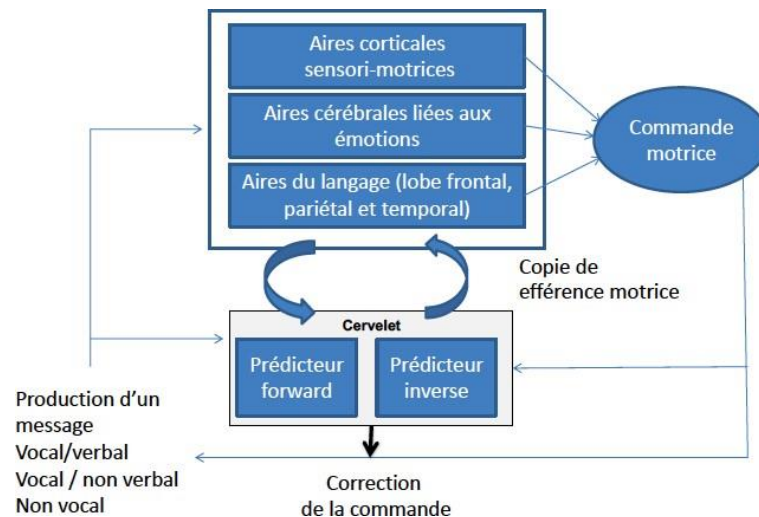
[Figure 16.](#) *Transposition des modèles anticipatoires moteurs dans le cas de la production d'une image acoustique dans un environnement. L'anticipation des retours désirés et des conséquences sensorielles est ici généralisée, en incluant les réactions du destinataire en plus de l'image acoustique.*

Pour compléter la proposition du modèle DIVA, nous allons étendre les modèles internes du cervelet, décrits dans les aspects sensorimoteurs, au langage. Cette idée a déjà été proposée par différents auteurs (Leiner et al., 1986; Ito, 2008). Dans le modèle inverse, à partir l'image acoustique, des retours proprioceptifs et des réactions du destinataires désirés (retours sensoriels anticipés) l'individu détermine une commande articulaire. D'un point de vue moteur, l'association des commandes motrices et des conséquences sensorielles permet de réactualiser la carte de la position et de la vitesse des articulations avec les conséquences somato-sensorielles et auditives. Nous ajoutons dans notre proposition que la cartographie est plus générale et s'étend aux conséquences émotionnelles, dans le sens où, dans un contexte donné, la production génère un retour sensoriel avec une charge émotionnelle. Autrement dit le destinataire génère une commande motrice, non seulement avec un retour sensoriel anticipé mais également avec un feedback émotionnel désiré (ce qui pourrait permettre d'inclure l'apprentissage par renforcement). Le modèle forward agit de façon parallèle, l'apprentissage des conséquences en lien avec une commande motrice va permettre de générer une prédiction de l'état futur et d'évaluer si cette commande est pertinente ou non par rapport à la demande environnementale. Comme nous l'avons déjà évoqué, lorsque la prédiction est correcte, le modèle interne est renforcé. Si une erreur est repérée, le modèle est réactualisé pour améliorer

les prédictions futures qu'elles soient de nature sensorielle ou émotionnelle. En ce sens, les modèles internes par anticipation jouent un rôle prépondérant dans la prise en compte du contexte pour favoriser une adaptation perpétuelle du message linguistique aux contraintes contextuelles. Il a été récemment proposé que les modèles internes et le cervelet jouent un rôle fondamental dans la régulation de la réactivité émotionnelle. Cela se ferait notamment via des processus d'anticipation des conséquences de nos actions dans l'environnement (Hilber et al., 2019). Si nous considérons notre langage comme une action avec un but, dans notre environnement, le cervelet et les modèles internes s'intègrent parfaitement dans ce schéma.

3.2.3) Aspects prédictifs du langage

Le cervelet, par le biais de ses modèles internes, apparaît donc comme un structure-clé dans les processus de prédiction et d'anticipation au niveau linguistique. En effet, son rôle prépondérant dans ces processus avait été établi dans un fonctionnement métabolique typique au niveau sémantique et phonologique (Moberget et al., 2014; Bonhage et al., 2015; Lesage et al., 2017). Les modèles internes du cervelet peuvent intervenir dans les processus langagiers par le biais des nombreuses boucles cérébello-corticales. Les boucles cérébro- cérébelleuses reliant les différentes aires cérébrales et le cervelet. Le cervelet peut donc être assimilé à une interface qui favorise le lien entre les différentes aires cérébrales impliquées dans l'élaboration et la production d'un message linguistique. Ces prédictions se réalisent à différents niveaux linguistiques, au niveau phonologique, syntaxique et sémantique (Argyropoulos, 2016). C'est une structure de régulation et de coordination dans divers domaines cognitifs : il intervient dans les aspects moteurs, les aspects émotionnels mais également les aspects sociaux (Adamaszek et al., 2016). En ce sens, il permet la liaison entre des aires cérébrales de nature diverse, impliquées dans les processus langagiers (aires sensorimotrices, aires émotionnelles et aires du langage).



[Figure 17](#). Illustration des liens fonctionnels entre les aires cérébrales et les modèles internes du cervelet lors de la production du langage. En supervisant, grâce aux modèles internes, les sorties, le cervelet, en lien avec les aires cérébrales, ajuste en permanence les actions aux perturbations de l’environnement

3.2.4) Modèle cybernétique global de la communication

Un modèle computationnel regroupant les théories motrices et psycholinguistiques, que nous avons présenté précédemment a mis en évidence le rôle du cervelet dans les aspects phonologiques (Hickok, 2012). Néanmoins, nous proposons ici de considérer l’ensemble des composantes linguistiques qui permettent la constitution d’un message à partir d’un modèle cybernétique dynamique, global et “augmenté”. Augmenté car ce modèle vise à intégrer le cervelet comme une interface de régulation des processus initiés dans les différentes aires cérébrales : les aires soutenant le langage mais aussi celles impliquées dans les émotions. Global car nous ne reviendrons pas sur les différents éléments du langage cités plus haut (phonologie, syntaxe et sémantique). Dynamique car ce schéma global tient compte de l’importance des modifications permanentes du contexte de communication lors de l’échange d’un message linguistique, accompagné de gestes, entre des personnes communicantes (avec des réactions). Nous reprenons plus spécifiquement ici les fonctions de communication développées par Jakobson qui stipule que le langage ne peut exister qu’en présence d’un destinataire et d’un destinataire qui s’échangent un message, dans un environnement commun (Jakobson, 1963).

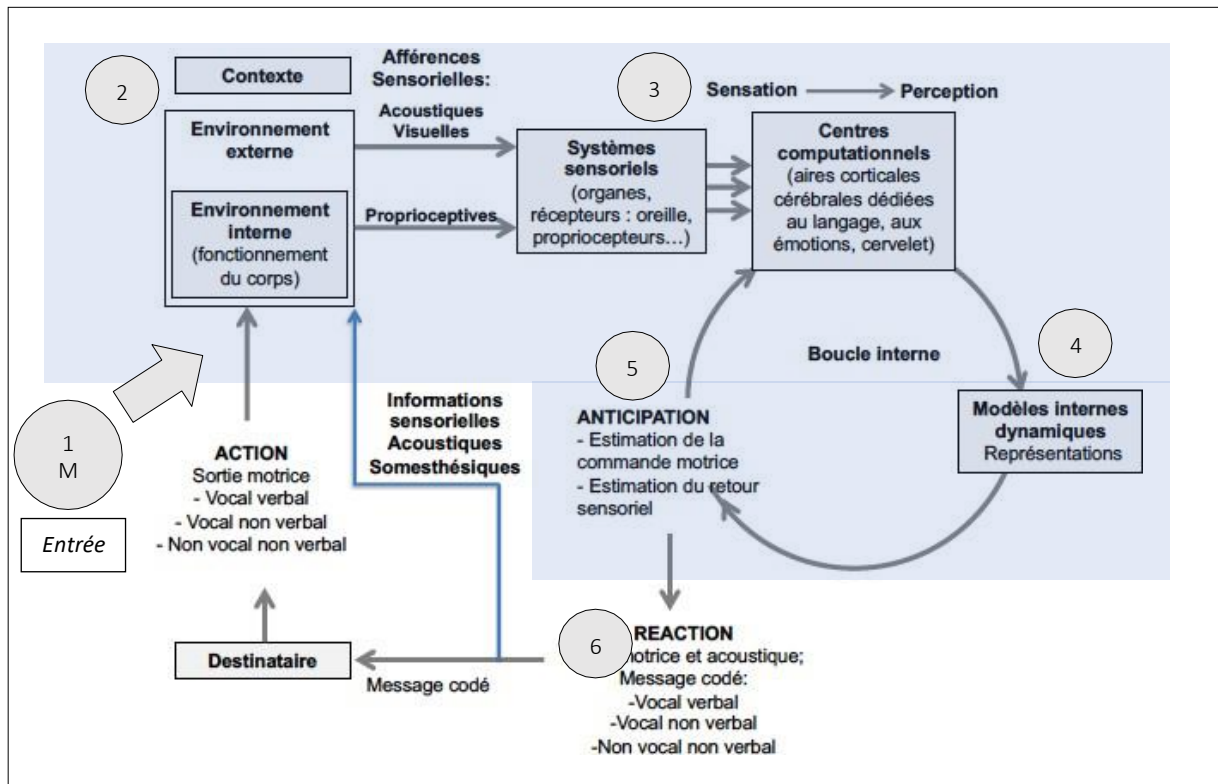


Figure 18. Schéma général de la communication englobant les processus d'anticipation et les modèles internes. Les éléments relatifs au destinataire sont représentés en bleu.

Pour expliciter le schéma 18, nous allons nous placer dans le cadre d'une communication entre deux individus et tenter de retracer les événements à partir du moment où l'un des deux s'adresse à l'autre (une action de communication notée 1 et correspondant à un message M sur la figure, comme point de départ)

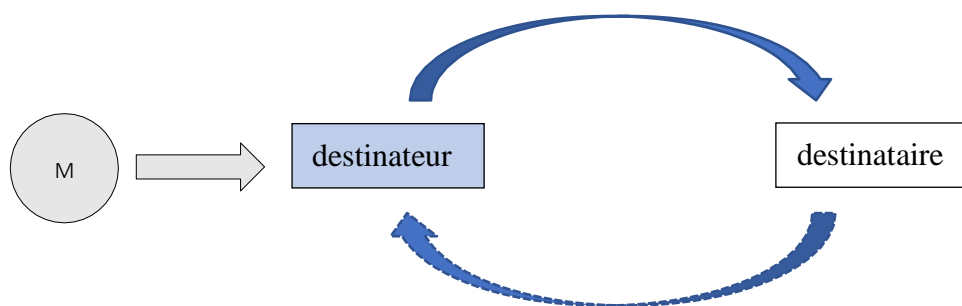


Figure 19. Nous tâcherons de décrire le modèle global en se plaçant dans un contexte de communication, similaire à celui décrit par Jakobson (Jakobson, 1963). Ici nous nous attacherons à décrire les étapes dans la communication, qui permettent au destinataire de produire un message en réponse au destinataire. Nous décrivons uniquement les processus initiés chez le destinataire, tout en sachant que les mêmes processus sont initiés chez le destinataire (en pointillé sur la flèche). Ce modèle se place dans le cadre d'une acquisition

perpétuelle de compétences de communication (la boucle interne réajuste à chaque interaction les modèles internes).

Nous allons revenir de façon plus précise sur les différentes étapes proposées dans ce modèle global de la communication lorsque deux individus s'adressent l'un à l'autre.

- 1) Un message « M » est envoyé dans l'environnement et perçu par le destinataire (qui, de fait est le récepteur initial dans cet exemple). Ce message qui peut recouvrir diverses modalités :
 - Le vocal verbal renvoie au langage articulé et donc aux composantes proprement linguistiques.
 - Le vocal non verbal, correspond aux intonations, à la prosodie associées à ce message.
 - Le non vocal non verbal, réfère aux différents aspects de la communication non verbale : les expressions faciales, les gestes, les postures.

Nous considérons que ce message est porteur de sens. Il va ainsi modifier le contexte initial dans lequel se trouvent les interlocuteurs. Nous décrivons par la suite les « perturbations » engendrées chez le futur destinataire.

- 2) Le contexte est constitué de l'environnement externe qui correspond à la situation dans laquelle se trouvent les individus, associé à l'environnement interne qui correspond à leur état interne (dont l'état émotionnel). La modification du contexte va engendrer des afférences sensorielles. Ici nous considérons uniquement les afférences visuelles et auditives, ainsi que les afférences somesthésiques. Nous négligeons les autres types d'afférences (olfactives par exemple) pouvant éventuellement être associées à ce message.
- 3) Les sensations créent un flux sensoriel, transmis ensuite aux centres computationnels, en lien avec le système des émotions pour lui donner du sens (passage de la sensation à la perception). Les aires du langage, par un réseau dynamique d'aires interconnectées, comme cela a été détaillé précédemment, vont participer à cette intégration complexe et permettre de donner du sens à un contexte global (accès sémantique).

- 4) Le cervelet est également sollicité dans ces processus grâce aux connexions cérébro-cérébelleuses. Il va participer, progressivement à la genèse d'une représentation interne du monde externe, grâce à l'élaboration et/ou à l'actualisation des modèles internes (Wolpert et al., 1998).

- 5) Ces modèles internes favorisent l'anticipation. Leur mise à jour influence, en retour, le traitement des informations par les centres computationnels (boucle interne). Si une erreur est détectée, que la réponse programmée ne convient pas, alors le modèle interne est mis à jour afin de proposer une réponse plus adéquate. Nous envisageons la participation de ces modèles internes, non seulement pour les programmations motrices nécessaires à la communication mais aussi pour le traitement des informations émotionnelles (Hilber et al., 2019) et le traitement d'un contexte dans son ensemble (Ito, 2008). Ainsi, pour paraphraser Schmahmann en 1996 : "de la même manière que le cervelet régule la vitesse, le rythme et la précision du mouvement, il règle également la vitesse, la cohérence et la pertinence des processus mentaux ou cognitifs" (Schmahmann, 1996). Cette opération s'opère grâce aux différentes boucles cérébro-cérébelleuses. L'anticipation joue un rôle prépondérant dans ce mécanisme puisqu'elle permet d'émettre des hypothèses sur des conséquences sensorielles, motrices futures sur l'individu lui-même mais aussi et sur son interlocuteur. Le but est d'assurer l'adéquation de la réponse générée par les centres computationnels dans l'environnement actuel.

- 6) La réponse est ensuite produite et correspond à une sortie acoustique et motrice. Cette action (on parle aussi de sortie ou "output") est émise dans un contexte (environnement) et va de fait le perturber. Cette perturbation va agir sur le destinataire, chez qui elle va engendrer les mêmes mécanismes que nous venons de décrire. Elle va, en outre, générer un certain nombre de réafférences sensorielles chez le destinataire. Lui-même devra donc intégrer les informations sensorielles émises par sa propre action et celles émises par son destinataire. C'est cette association de la son action avec les conséquences de cette action qui participera à réactualiser le modèle interne et alimenter les processus anticipatoires (forward et inverses décrits précédemment)

Ce modèle relativement simple propose donc d'intégrer la communication humaine comme une action dynamique qui tient compte des exigences environnementales. Le cervelet apparaît comme une structure fondamentale qui permet d'une part de considérer les changements environnementaux mais également d'anticiper les actions futures afin de programmer les réponses adéquates. Ce modèle considère donc l'individu dans son environnement mais surtout la considération de sa représentation interne prend tout son sens et son importance afin de développer un système de communication efficace. Il repose sur un processus d'apprentissage permanent dans le sens où les modèles sont actualisés en fonction des conséquences des actions et du contexte. Nous pensons qu'il prend ainsi tout son sens dans le domaine du développement de l'enfant et plus particulièrement dans le développement de ses capacités de communication.

IV. Apports dans la pratique orthophonique

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, le cervelet joue un rôle majeur dans le langage. De plus, c'est une structure très plastique et qui soutient de nombreux apprentissages, par ses caractéristiques propres, il trouve sa place dans les processus d'acquisition précoces des systèmes de communication. Nous sommes convaincus que l'intégration du cervelet dans les processus langagiers peut apporter des pistes de réflexions quant au trouble développemental du langage, caractérisé par une difficulté d'acquisition du langage mais également favoriser une meilleure compréhension des difficultés de langage dans diverses pathologies. Pour cela nous allons revenir brièvement sur les processus d'acquisition du langage afin de comprendre de quelle façon les modèles internes ont leur place.

4.1) Acquisition du langage

4.4.1) *Co-requis nécessaires à l'acquisition du langage*

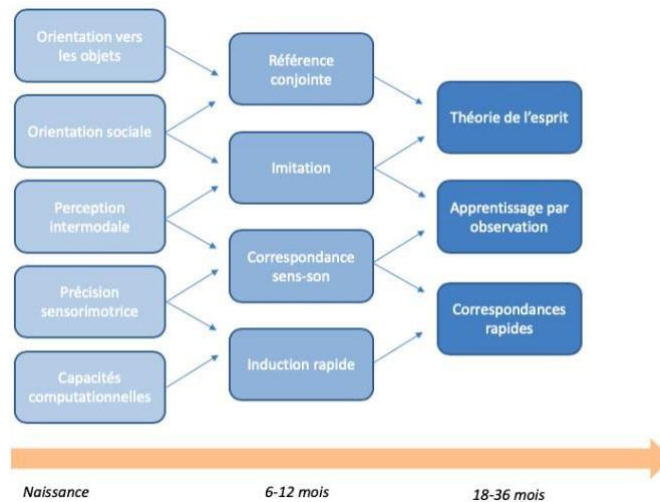
Le développement des compétences linguistiques qui favorise l'acquisition d'un langage fonctionnel se fait grâce aux moyens intrinsèques mis à la disposition d'un individu comprenant notamment les systèmes cognitif, sensoriel, émotionnel, social et neurobiologique. Néanmoins, un contexte d'expérimentation et la motivation de l'individu sont nécessaires pour que l'acquisition du langage soit optimale (Kohner cité par Mayer-Crittenden et al., 2014). C'est dans cette dynamique que les théories fonctionnalistes et émergentistes en s'appuyant sur l'évolution des sciences cognitives (psychologie, neuroscience, linguistique) ont permis de mettre en évidence les habiletés clefs nécessaires à l'acquisition du langage. Ces données que nous allons développer sont donc en adéquation avec le modèle global de la communication proposé précédemment.

L'enfant construit, en l'espace de 3 ans, un système de communication efficace intégrant les différents éléments constitutifs de sa langue maternelle (Bassano et al., 2007). Au travers des approches fonctionnalistes et émergentistes, des structures préétablies nécessaires au langage ont été mises en évidence. Elles se développent et s'organisent par le biais des sollicitations externes. Schématiquement, un ensemble de co-requis va favoriser l'organisation des systèmes cognitifs du langage. La plasticité cérébrale est un mécanisme fondamental pour

expliquer cette organisation et le développement des processus cognitifs (Bassano et al., 2007). Elle se caractérise par une synaptogenèse importante présente en période anténatale mais également dans les premiers mois de vie jusqu'à 12 ans environ (Kail, 2004). Cette plasticité est notamment très présente au niveau du cervelet comme cela a été démontré, et apparaît comme un support idéal pour l'apprentissage et la mise à jour des modèles internes lors de l'acquisition du langage. A cette plasticité s'ajoutent des aptitudes de communication précoces, notamment liées à la théorie de l'esprit et comprennent entre autres, l'attention conjointe, l'imitation, la compréhension des intentions de communication. Les autres capacités sont liées à la catégorisation (des percepts ou des concepts) (Tomasello, 2003). L'input langagier est également fondamental pour que l'enfant puisse s'approprier sa langue. Comme nous l'avons décrit dans le modèle, cet input va permettre à l'enfant d'organiser ses représentations internes pour constituer progressivement son monde interne. En effet, les interactions de l'enfant avec son environnement vont lui permettre de développer des conduites imitatives (gestuelle ou vocale) impliquées dans l'acquisition de la langue maternelle (Veneziano et al., 2000). Les interactions avec l'entourage vont permettre une imprégnation des règles de communication qui seront ensuite indispensables dans la constitution d'un modèle interne adéquat.

L'enfant présente à la naissance différents systèmes pour intégrer l'input langagier présenté par son entourage. Ces différents systèmes, appelés les structures fonctionnelles du langage par Bates (Bates, 2004), apparaissent comme nécessaires pour acquérir un langage optimal, lui permettant de s'inscrire dans un acte de communication de façon adéquate. A la naissance, l'intérêt pour les objets et pour les visages vont favoriser l'apparition d'une attention conjointe, permettant à l'enfant et aux parents de partager leur intérêt sur un objet extérieur. L'attention conjointe facilitera ensuite le développement la théorie de l'esprit, des gestes déictiques comme le pointage, pour ensuite acquérir le nom des objets. L'intérêt de l'enfant pour le visage humain, l'aidera à reproduire les gestes et les sons émis par l'adulte. Les systèmes de perception et les capacités sensorimotrices vont notamment favoriser l'association d'un sens au son entendu. S'ajoute à cela le système d'induction rapide statistique (analyse des règles phonotactiques), qui amènera l'enfant à apprendre de nouveaux mots pour développer ensuite un système syntaxique. En somme, des habiletés non-linguistiques vont donc permettre à l'enfant d'acquérir un système linguistique efficace et autonome (Bates,

2004). L'acquisition et l'automatisation de l'ensemble de ces habiletés, dans le modèle proposé sont donc supervisées par les modèles internes.



[Figure 20](#). Articulation des structures fonctionnelles du langage. (D'après Bates, 2004).

4.4.2) Modifications structurelles

Comme nous l'avons mentionné, l'acquisition du langage est indissociable de la notion de plasticité cérébrale et conduit à des transformations structurelles dans le cerveau du bébé. Les études d'IRMf ont montré que chez le jeune enfant les réseaux cérébraux impliqués dans le traitement du langage sont déjà en place (Dubois et al., 2016). Le bébé naît donc avec des circuits organisés, pré-établis et disposés à coordonner le langage. Cependant, les trajectoires de maturation des structures sont différentes.

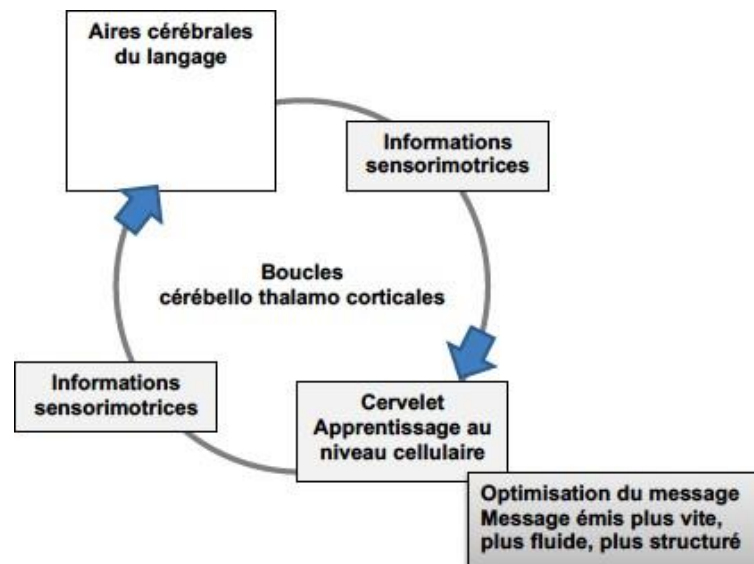
L'étude des différentes aires cérébrales montre que les premières régions matures sont les régions soutenant les fonctions les plus basiques : fonctions sensorielles et motrices primaires. Les régions soutenant des fonctions de haut niveau telles que le langage et les fonctions spatiales atteignent leur maturité bien plus tard, vers 12-13 ans. Les aires soutenant les fonctions les plus développées comme les aires associatives d'intégration d'informations sensorielles, le raisonnement et les fonctions exécutives atteignent leur maturation encore plus tardivement, en fin d'adolescence. Au niveau cérébral, on observe donc une maturation progressive qui va des aires impliquées dans des fonctionnements plus élémentaires vers celles soutenant les fonctions les plus complexes (Habib, 2018). Ces processus de maturation font écho également à la maturation de cervelet qui est plus tardive et qui permet de soutenir les processus cognitifs (Tiemeier et al., 2010).

Observée dès la naissance, l'asymétrie structurale et fonctionnelle est conservée chez l'adulte (Dehaene-Lambertz et al., 2000). Une spécialisation et une latéralisation croissante des fonctions langagières sont retrouvées dès 6 ans (Dubois et al., 2016). C'est cette consolidation de la latéralisation qui va permettre l'apprentissage de compétences plus élaborées, telles que le langage (Dehaene-Lambertz et al., 2006). L'organisation cérébrale pour le langage chez l'enfant est similaire à celle de l'adulte avec cependant une différence de maturation qui sera progressive. Chez le nourrisson, les deux voies de traitement linguistique présentent une différence de maturation. La voie dorsale est moins mature que la voie ventrale, puis cet écart diminue au cours des premières semaines (Dubois et al., 2016). Ces processus de maturation cérébrale qui sont nécessaires pour aboutir à des fonctionnements cognitifs et langagiers optimaux coïncident avec le modèle et notamment l'ajustement progressif des modèles internes cérébelleux via les expériences prodiguées par l'environnement.

4.2) Application du modèle dans le cadre de l'acquisition du langage

Les notions de feedback et de contrôle moteur des articulateurs, développées dans le modèle DIVA, suggèrent que l'apprentissage du langage est progressif. Il s'opère par étapes. Lors du babillage, phase qui correspond aux premiers essais de production de l'enfant, le feedback va permettre d'intégrer les conséquences sensorielles des positions articulaires. Puis une fois que celles-ci sont apprises, l'enfant va pouvoir anticiper ces conséquences et donc programmer la commande motrice adéquate (Guenther, 1994). Progressivement l'enfant, grâce à ses systèmes perceptifs fait le lien entre les sons et le sens (Bates, 2004) et peut imiter. Les réactions de l'environnement, l'input langagier adressé à l'enfant associé à une plasticité cérébrale importante mais aussi à une appétence pour communiquer permettent à l'enfant d'acquérir les structures linguistiques (Bassano et al., 2007). De plus, les interactions étroites entre les diverses composantes du langage vont soutenir l'interprétation des retours proprioceptifs et participent à la structuration des modèles internes. En somme, le système cérébral devient un système prédictif qui prend en compte les retours sensoriels mais aussi le contexte pour générer les commandes les plus adéquates. L'apprentissage des conséquences sensorielles permet donc progressivement l'automatisation des processus qui s'effectue par la réduction des temps de traitement des informations et la minimisation des activités neuronales associées. Cela est confirmé notamment avec la stimulation électrique du cervelet qui a

montré une augmentation dans la rapidité d'exécution des processus initiés au niveau cérébral et confirme donc que le cervelet participe à l'automatisation des processus cognitifs et notamment langagiers (Argyropoulos, 2016).



[Figure 21.](#) Illustration du système en boucle fermée qui permet au cervelet de devenir une structure clé dans l'automatisation du langage. La répétition via l'expérience et les retours sensoriels, les liens ténus entre les aires cérébrales et le cervelet vont ainsi permettre au locuteur d'exercer son langage et de devenir expert.

4.3) Dysfonctionnement du modèle et trouble du langage

L'élaboration de modèle global de la communication, apporte des hypothèses complémentaires pour comprendre l'origine d'un trouble développemental du langage. Bates explique un trouble développemental du langage, par un déficit ou des déficits dans les infrastructures nécessaires langage (Bates, 2004). Dans cette considération, si les systèmes perceptifs de base sont altérés, l'élaboration des modèles internes sera défectueuse et l'acquisition d'un langage adapté, intégrant les paramètres contextuels semble donc compromise.

Le modèle MUC développé par Hagoort, développe les processus langagiers à travers trois composantes fonctionnelles, la mémoire, l'unification et le contrôle (Hagoort, 2013). A partir de cette représentation, nous pouvons situer l'hypothèse du déficit procédural qui suggère une altération de la mémoire procédurale, au niveau de la composante mémoire

(Ullman et al., 2005). Le trouble du langage serait donc consécutif d'un dysfonctionnement de la composante mémoire. Cependant, dans le modèle heuristique que nous avons proposé, l'action du cervelet se situerait au niveau des composantes unification et/ou contrôle. Pour rappel, l'unification permet la combinaison des éléments linguistiques en tenant compte du contexte, tandis que le contrôle recrute les systèmes attentionnels et exécutifs afin d'évaluer la pertinence du choix des cibles linguistiques par rapport au contexte social et pragmatique. Nous proposons l'hypothèse que le cervelet pourrait avoir un rôle dans l'unification, dans la prise en compte du contexte qui va guider le choix des éléments linguistiques adéquats. Au niveau du contrôle, le cervelet permettrait de mobiliser les systèmes attentionnels et exécutifs. Cela contribue à identifier d'éventuelles erreurs et de les corriger avant qu'elles ne soient commises. Ceci est possible grâce à un feedback interne précédant le feedback externe (Ito, 2008). Il interviendrait grâce aux modèles anticipatoires décrits plus haut et en les ajustant en permanence. Le modèle heuristique proposé offre donc une piste de réflexion quant à l'origine d'un trouble du langage et met en évidence le rôle complémentaire du cervelet et des aires corticales pour aboutir à un système langagier fonctionnel.

Conclusion

Nous proposons ici pour conclure ce travail d'intégrer les apports de ce modèle dans la pratique orthophonique afin d'améliorer la qualité des prises en charge proposées.

En effet, le modèle global dynamique de la communication présentée précédemment, souligne l'importance de l'anticipation et du contrôle dans les processus langagiers. Dans certaines pathologies développementales un trouble du langage est régulièrement observé. Chez les enfants prématurés, des anomalies cérébelleuses anté et post natales sont présentes. Celles-ci semblent associées à des troubles moteurs mais également des troubles de la communication ou du langage (Biran et al., 2011). Dans les TSA (Trouble du Spectre de l'Autisme), des anomalies cérébelleuses sont évoquées et peuvent être à l'origine de certaines difficultés cognitives (Rogers et al., 2013). La compréhension du rôle du cervelet en termes de structure clé dans la construction du "monde interne" de l'individu et de ses aptitudes anticipatoires permet de mieux cerner le déroulement des processus linguistiques chez ces patients. En ce sens, il est donc important de considérer que leur représentation du monde diffère de la nôtre et il est donc important de favoriser la construction des modèles internes en proposant des contextes similaires qui vont leur permettre de mettre en place des comportements adaptés. La représentation explicite du contexte environnemental, peut favoriser la mise en place d'une communication adaptée. Nous pensons que l'utilisation de supports multimodaux (visuels, auditifs, tactiles ...), couplée à une réelle considération des feedbacks émotionnels (aider le patient à associer son ressenti émotionnel au contexte) apparaît comme des outils favorisant la sollicitation du cervelet en aidant le sujet à se construire des représentations de l'environnement.

Comme nous l'avons évoqué, le cervelet favorise les processus d'automatisation. Il apparaît donc fondamental face à ces patients de ralentir le débit de parole pour favoriser une meilleure intégration du message et un meilleur traitement cognitif. De plus, le manque d'automatisation de ces circuits demande aux patients un temps de traitement plus long pour produire un message. La prise en compte du temps est nécessaire et permettra aux patients de proposer des réponses et d'affiner ses représentations internes

Dans le cadre du bégaiement, l'hypothèse d'un défaut de mise à jour des modèles internes a été avancée, empêchant ainsi d'anticiper les erreurs de production au niveau moteur (Golfinopoulos et al., 2010).

De plus, les émotions, étroitement liées au langage, sont fondamentales. Pour favoriser la construction des représentations de l'environnement, il est important d'associer les émotions dans les activités langagières. Il est donc important de renforcer les actes de langage par le biais des émotions et notamment des émotions positives. Expliciter les émotions et les comportements attendus peuvent favoriser la construction de représentation (modèles internes) adéquats ou du moins répondant aux sollicitations de l'environnement.

Ce modèle global rend compte également de l'importance du cervelet dans le langage et la communication. Il permet ainsi de mettre en lumière l'importance d'une évaluation langagière et neuropsychologique dans le cadre d'une atteinte de cette structure. En effet, il apparaît ici évident de prendre en compte les éventuels troubles cognitifs et émotionnels, associés aux atteintes du cervelet qui sont encore peu considérés à ce jour. La compréhension du rôle du cervelet dans le langage et les émotions offre donc de nouvelles pistes de prise en charge et amène à reconsidérer les pratiques actuelles pour améliorer la qualité de vie des patients.

Ce manuscrit constitue un outil de travail pour la rédaction d'un article (en cours) qui sera soumis à publication dans la revue *L'Encéphale*. Nous expliciterons dans cet article le rôle du cervelet dans la communication, via son importance dans les modèles internes.

Bibliographie

- Ackermann, H., Gräber, S., Hertrich, I., et al., (1997). Categorical Speech Perception in Cerebellar Disorders. *Brain and Language*, 60(2), 323-331.
<https://doi.org/10.1006/brln.1997.1826>
- Adamaszek, M., D'Agata, F., Ferrucci, R., et al., (2016). *Consensus Paper : Cerebellum and Emotion*. 16, 552-576. <https://doi.org/10.1007/s12311-016-0815-8>
- Adams, J. (1971). *A Closed-Loop Theory of Motor Learning : Journal of Motor Behavior*. 3(2), 111-149. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Arasanz, C. P., Staines, W. R., Roy, E. A., et al., (2012). The cerebellum and its role in word generation : A cTBS study. *Cortex*, 48(6), 718-724.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.02.021>
- Argyropoulos, G. P. D., (2016). The cerebellum, internal models and prediction in 'non-motor' aspects of language : A critical review. *Brain and Language*, 161, 4-17.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.08.003>
- Axer, H., Klingner, C. M., Prescher, A., (2013). *Fiber anatomy of dorsal and ventral language streams*. 127(2), 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.04.015>
- Azevedo, F., Ludmila, R., Grinberg, L., et al., (2009). *Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain*. 513(5), 532-541. <https://doi.org/10.1002/cne.21974>
- Baillieux, H., De Smet, H., J., Dobbeleir, A., et al., (2010). *Cognitive and affective disturbances following focal cerebellar damage in adults : A neuropsychological and SPECT study*. 46(7), 869-879. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.09.002>
- Banich, M. T., Brown, W. S., (2000). *A Life-Span Perspective on Interaction Between the Cerebral Hemispheres*. 18(1), 1-10. https://doi.org/10.1207/S15326942DN1801_1
- Bassano, D., Demont, E., Metz-Lutz, M. N., (2007). Emergence et développement du langage : Enjeux et apports des nouvelles approches fonctionnalistes. In *L'acquisition du langage et ses troubles* (p. 13-46). Solal.
- Bates, E., (2004). *Explaining and interpreting deficits in language development across clinical groups : Where do we go from here?* 88, 148-253. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00102-0)
- Bélanger, N., Baum, S. R., Titone, D., (2009). *Use of prosodic cues in the production of idiomatic and literal sentences by individuals with right- and left-hemisphere damage*. 110(1), 38-42.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.02.001>
- Berntson, G. G., Torello, M. W., (1982). The paleocerebellum and the integration of behavioral

function. *Physiological Psychology*, 10(1), 2-12. <https://doi.org/10.3758/BF03327003>

Bonhage, C. E., Mueller, J. L., Friederici, A. D., et al., (2015). *Combined eye tracking and fMRI reveals neural basis of linguistic predictions during sentence comprehension*. 68, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.04.011>

Bookheimer, S. Y., Zeffiro, T. A., Blaxton, T. A., et al., (2000). *Activation of language cortex with automatic speech tasks*. 55(8), 1151-1157. <https://doi.org/10.1212/WNL.55.8.1151>

Carlson, T. A., Simmons, R. A., Kriegeskorte, N., et al., (2014). *The Emergence of Semantic Meaning in the Ventral Temporal Pathway*. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(1), 120-131. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00458

Chen, S. H. A., Desmond, J. E. (2005)., *Temporal dynamics of cerebro-cerebellar network recruitment during a cognitive task*. 43(9), 1227-1237. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.12.015>

Chevalier, N., Guay, M. C., (2006). *Trouble Déficitaire de L'Attention Avec Hyperactivité : Soigner, Éduquer, Surtout Valoriser* (Presses de l'Université du Québec).

Ciesielski, K., T., Harris, R., J., Hart, B., L., et al., (1997). *Cerebellar hypoplasia and frontal lobe cognitive deficits in disorders of early childhood*. 35(5), 643-655. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(96\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(96)00119-4)

Cook, M., Murdoch, B., Cahill, L., et al., (2004). *Higher-level language deficits resulting from left primary cerebellar lesions*. 18(9), 771-784. <https://doi.org/10.1080/02687030444000291>

D'Angelo, E., Casali, S., (2013). *Seeking a unified framework for cerebellar function and dysfunction : From circuit operations to cognition*. 6(116), 1-23. <https://doi.org/10.3389/fncir.2012.00116>

Dehaene-Lambertz, G., Dupoux, E., Gout, A., (2000). *Electrophysiological Correlates of Phonological Processing : A Cross-linguistic Study*. 12(4), 635-647. <https://doi.org/10.1162/089892900562390>

Dehaene-Lambertz, G., Hertz-Pannier, L., Dubois, J., (2006). *Nature and nurture in language acquisition : Anatomical and functional brain-imaging studies in infants*. 29(7), 367-373. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.05.011>

Delignières, D., Teulier, C., Nourrit, D., (2009). *L'apprentissage des habiletés motrices complexes : Des coordinations spontanées à la coordination experte*. *Bulletin de psychologie*, Numéro 502(4), 327-334.

Doya, K., (2000). *Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control*. 10(6), 732-739. [https://doi.org/10.1016/s0959-4388\(00\)00153-7](https://doi.org/10.1016/s0959-4388(00)00153-7)

Dubois, J., Poupon, C., Thirion, B., et al., (2016). Exploring the Early Organization and Maturation of Linguistic Pathways in the Human Infant Brain. *Cerebral Cortex*, 26(5), 2283-2298. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv082>

Duffau, H., Moritz-Gasser, S., Mandonnet, E., (2014). *A re-examination of neural basis of language processing : Proposal of a dynamic hodotopical model from data provided by brain stimulation mapping during picture naming*. 131, 1-10.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2013.05.011>

Fabbro, F., Moretti, R., Bava, A., (2000). *Language impairments in patients with cerebellar lesions*. 13(2-3), 173-188. [https://doi.org/10.1016/S0911-6044\(00\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0911-6044(00)00010-5)

Fiez, J. A., (2016). *The cerebellum and language : Persistent themes and findings*. 161, 1-3.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.09.004>

Fiez, J., A., Petersen, E., E., Cheney, M., K., et al., (1992). *Impaired non-motor learning and error detection associated with cerebellar damage*. 115(1), 155-178.
<https://doi.org/10.1093/brain/115.1.155>

Fine, E., J., Ionita, C., C., Lohr, L., (2002). *The History of the Development of the Cerebellar Examination*. 22(4), 375-384. <https://doi.org/10.1055/s-2002-36759>

Flourens, P., (1842). *Recherches expérimentales sur les propriétés et les fonctions du système nerveux dans les animaux vertébrés*. J.-B. Baillères.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9691571v>

Francis, B. A., Wonham, W. M., (1976). *The internal model principle of control theory*. 12(5), 457-465. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(76\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0005-1098(76)90006-6)

Geschwind, N. (1970). The Organization of Language and the Brain. *Science*, 170(3961), 940-944. JSTOR.

Geschwind, N., Levitsky, W., (1968). Human Brain : Left-Right Asymmetries in Temporal Speech Region. *Science*, 161(3837), 186-187. <https://doi.org/10.1126/science.161.3837.186>

Glickstein, M., Strata, P., Voogd, J., (2009). *Cerebellum : History*. 162(3), 549-559.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.02.054>

Golfinopoulos, E., Tourville, J. A., Guenther, F. H., (2010). The integration of large-scale neural network modeling and functional brain imaging in speech motor control. *NeuroImage*, 52(3), 862-874. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.023>

Goucha, T., Friederici, A., (2015). *The language skeleton after dissecting meaning : A functional segregation within Broca's Area*. 114, 294-302.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.011>

- Greve, K., Stanford, M., Sutton, C., et al., (1999). *Cognitive and Emotional Sequelae of Cerebellar Infarct*. 14, 455-469. [https://doi.org/10.1016/S0887-6177\(99\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0887-6177(99)00010-4)
- Guell, X., Gabrieli, J. D. E., Schmahmann, J. D., (2018). *Triple representation of language, working memory, social and emotion processing in the cerebellum : Convergent evidence from task and seed-based resting-state fMRI analyses in a single large cohort*. 172, 437-449. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.01.082>
- Guenther, F. H., (1994). A neural network model of speech acquisition and motor equivalent speech production. *Biological Cybernetics*, 72(1), 43-53. <https://doi.org/10.1007/BF00206237>
- Guenther, F. H., Hickok, G., (2015). Chapter 9—Role of the auditory system in speech production. In M. J. Aminoff & al. (Éds.), *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 129, p. 161-175). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00009-3>
- Guenther, F. H., Vladusich, T., (2012). *A Neural Theory of Speech Acquisition and Production*. 25(5), 408-422. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2009.08.006>
- Habib, M., (2018). *La constellation des dys : Bases neurologiques de l'apprentissage et de ses troubles* (De Boeck Supérieur). De Boeck Supérieur.
- Hagoort, P., (2013). *MUC (Memory, Unification, Control) and beyond*. 4(416), 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00416>
- Hickok, G., (2012). *Computational neuroanatomy of speech production*. 13, 135-145.
- Hickok, G., Poeppel, D., (2007). *The cortical organization of speech processing*. 8, 393-402.
- Hikosaka, O., Nakamura, K., Sakai, K., et al., (2002). Central mechanisms of motor skill learning. *Current Opinion in Neurobiology*, 12(2), 217-222. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00307-0](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00307-0)
- Hilber, P., Cendelin, J., Le Gall, A., et al., (2019). Cooperation of the vestibular and cerebellar networks in anxiety disorders and depression. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 89, 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2018.10.004>
- INSERM, (Institut national de la santé et de la recherche). (2007). *Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie : Bilan des données scientifiques*. Les éditions Inserm. <http://www.ipubli.inserm.fr/handle/10608/110>
- Ito, M., (1979). *Is the cerebellum really a computer?* 2, 122-126. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(79\)90050-X](https://doi.org/10.1016/0166-2236(79)90050-X)
- Ito, M., (1986). *Long-term depression as a memory process in the cerebellum*. 3(6), 531-539. [https://doi.org/10.1016/0168-0102\(86\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0168-0102(86)90052-0)

Ito, M., (2005). *Bases and implications of learning in the cerebellum—Adaptive control and internal model mechanism*. 148, 95-109. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(04\)48009-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(04)48009-1)

Ito, M., (2008). *Control of mental activities by internal models in the cerebellum*. 9(4), 304-313. <https://doi.org/10.1038/nrn2332>

Ito, M., Yamaguchi, K., Nagao, S., et al., (2014). Long-Term Depression as a Model of Cerebellar Plasticity. In *Progress in brain research* (Vol. 210, p. 1-30). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63356-9.00001-7>

Jaber, M., (2017). *Le cervelet comme acteur majeur dans les troubles moteurs des syndromes autistiques*. 43(2), 170-175. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2016.03.018>

Jakobson, R., (1963). *Essais de linguistique générale : Les fondations du langage* (Les Editions de Minuit).

Justus, T., (2004). The cerebellum and English grammatical morphology : Evidence from production, comprehension, and grammaticality judgments. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(7), 1115-1130. <https://doi.org/10.1162/0898929041920513>

Kail, M., (2004). *Développement du langage et plasticité : L'innéisme en question*. 11(2), 39-73.

Karmiloff-Smith, A., Karmiloff-Smith, K., (2014). Comment s'acquiert le langage ? In *Le cerveau et la pensée: Vol. 2e éd.* (p. 300-308). Editions Sciences Humaines. <https://www.cairn.info/le-cerveau-et-la-pensee--9782361060466-page-300.htm>

Kavaklioglu, T., Guadalupe, T., Zwiers, M., et al., (2017). *Structural asymmetries of the human cerebellum in relation to cerebral cortical asymmetries and handedness*. 222(4), 1611-1623. <https://doi.org/10.1007/s00429-016-1295-9>

Kosar, M. I., Karacan, K., Otag, I., et al., (2012). *Determination of cerebellar volume in children and adolescents with magnetic resonance images* (N° 2). 71(2), 65-70.

Lechtenberg, R., Gilman, S., (1978). *Speech disorders in cerebellar disease*. 3(4), 285-290. <https://doi.org/10.1002/ana.410030402>

Leiner, H. C., Leiner, A. L., Dow, R. S., (1986). *Does the Cerebellum Contribute to Mental Skills?* 100(4), 443-454. <https://doi.org/10.1037//0735-7044.100.4.443>

Leiner, H. C., Leiner, A. L., Dow, R. S., (1991). The human cerebro-cerebellar system : Its computing, cognitive, and language skills. *Behavioural Brain Research*, 44(2), 113-128. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(05\)80016-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(05)80016-6)

Lesage, E., Hansen, P. C., Miall, R. C., (2017). *Right Lateral Cerebellum Represents Linguistic Predictability*. 37(26), 6231-6241. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3203-16.2017>

Lesage, E., Morgan, B. E., Olson, A. C., et al., (2012). *Cerebellar rTMS disrupts predictive language processing*. 22(18), 794-795. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.07.006>

Levisohn, L., Cronin-Golomb, A., Schmahmann, J. D., (2000). *Neuropsychological consequences of cerebellar tumour resection in children : Cerebellar cognitive affective syndrome in a paediatric population*. 123(5), 1041-1050. <https://doi.org/10.1093/brain/123.5.1041>

Lurito, J., Kareken, D., Lowe, M., et al., (2000). Comparison of rhyming and word generation with fMRI. *Human Brain Mapping*, 10, 99-106. [https://doi.org/10.1002/1097-0193\(200007\)10:3<99::AID-HBM10>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-0193(200007)10:3<99::AID-HBM10>3.0.CO;2-Q)

Mariën, P., De Smet, H. J., De Smet, H. J., et al., (2009). *Cognitive, linguistic and affective disturbances following a right superior cerebellar artery infarction : A case study*. 45(4), 527-536. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.12.010>

Mariën, Peter, Ackermann, H., Adamaszek, M., et al., (2014). *Consensus Paper : Language and the Cerebellum : An Ongoing Enigma*. 13(3), 386-410. <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0540-5>

Martinet, A., (1970). *Eléments de linguistique générale* (Armand Collin).

Mathiak, K., Hertrich, I., Grodd, W., et al., (2002). *Cerebellum and Speech Perception : A Functional Magnetic Resonance Imaging Study*. 14(6), 902-912. <https://doi.org/10.1162/089892902760191126>

Mayer-Crittenden, C., Minor-Corriveau, M., (2014). De la complexité d'usage des termes langue et langage dans Reguigui, Ali et Julie Boissonneault (dir.). In *Langue et territoire. Etudes en aménagement linguistique* (Vol. 14, p. 463-510). Université Laurentienne, Série monographique en sciences humaines. <https://micheleminorcorriveau.com/chapitres-de-livres/>

Mazoyer, B. M., Tzourio, N., Frak, V., et al., (1993). *The cortical representation of speech*. 5(4), 467-479.

McDermott, K. B., Petersen, S. E., Watson, J. M., et al., (2003). *A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging*. 41(3), 293-303. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00162-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00162-8)

Mesgarani, N., Cheung, C., Johnson, K., et al., (2014). *Phonetic Feature Encoding in Human Superior Temporal Gyrus*. 343(6174), 1006-1010. <https://doi.org/10.1126/science.1245994>

Miall, R. C., Antony, J., Goldsmith-Sumner, A., et al., (2016). *Modulation of linguistic prediction by TDCS of the right lateral cerebellum*. 86, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.04.022>

- Miall, R. C., Weir, D. M., Stein, J. F., (1993). *Is the Cerebellum a Smith Predictor ?* 25(3), 203-216. <https://doi.org/10.1080/00222895.1993.9942050>
- Moberget, T., Gullesen, E. H., Andersson, S., et al., (2014). *Generalized Role for the Cerebellum in Encoding Internal Models : Evidence from Semantic Processing.* 34(8), 2871-2878. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2264-13.2014>
- Morgan, A. T., Liégeois, F., Liederkerke, C., et al., (2011). *Role of cerebellum in fine speech control in childhood : Persistent dysarthria after surgical treatment for posterior fossa tumour.* 117(2), 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.01.002>
- Murdoch, B. E., (2010). The cerebellum and language : Historical perspective and review. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 46(7), 858-868. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.07.018>
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Dean, P., (2001). *Developmental dyslexia : The cerebellar deficit hypothesis.* 24(9), 508-511. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01896-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01896-8)
- Nuñez, S. C., Dapretto, M., Katzir, T., et al., (2011). *fMRI of syntactic processing in typically developing children : Structural correlates in the inferior frontal gyrus.* 1(3), 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.02.004>
- Ojemann, J. G., Buckner, R. L., Akbudak, E., et al., (1998). *Functional MRI studies of word-stem completion : Reliability across laboratories and comparison to blood flow imaging with PET.* 6(4), 203-215. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1998\)6:4<203::AID-HBM2>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1998)6:4<203::AID-HBM2>3.0.CO;2-7)
- Onaolapo, J. O., Onaolapo, Y. A., (2017). *The 21st Century Cerebellum : An Evolution of Cognitive Functions, Connections, Disorders, and Pharmacotherapeutic Modulation.* 4(4), 189-222. <https://doi.org/10.3934/Neuroscience.2017.4.189>
- Paillard, J., (1999). Dialogues sensori-moteurs et représentation mentale : Un problème d'interface. In *Psychologie et cerveau* (p. 19-52). Presses Universitaires de France. <https://www.cairn.info/psychologie-et-cerveau--9782130425311-page-19.htm>
- Pinto, S., Sato, M., (2016). *Traité de neurolinguistique.* De Boeck Supérieur.
- Poldrack, R., Wagner, A., Prull, M., et al., (1999). *Functional Specialization for Semantic and Phonological Processing in the Left Inferior Prefrontal Cortex.* 10(1), 15-35. <https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0441>
- Riva, D., Giorgi, C., (2000). The cerebellum contributes to higher functions during development : Evidence from a series of children surgically treated for posterior fossa tumours. *Brain: A Journal of Neurology*, 123 (Pt 5), 1051-1061. <https://doi.org/10.1093/brain/123.5.1051>
- Rondal, J., A., Seron, X., (2000). *Troubles du langage—Bases théoriques, diagnostic et rééducation* (Mardaga).

Runnqvist, E., Bonnard, M., Gauvin, H. S., et al., (2016). Internal modeling of upcoming speech : A causal role of the right posterior cerebellum in non-motor aspects of language production. *Cortex*, 81, 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.05.008>
Saussure, F. (1916). *Cours de linguistique générale*. Payot.

Schlösser, R., Hutchinson, M., Joseffer, S., et al., (1998). *Functional magnetic resonance imaging of human brain activity in a verbal fluency task*. 64(4), 492-498.
<https://doi.org/10.1136/jnnp.64.4.492>

Schmahmann, J. D., (1991). *An Emerging Concept : The Cerebellar Contribution to Higher Function*. 48(11), 1178-1187. <https://doi.org/10.1001/archneur.1991.00530230086029>

Schmahmann, J. D., (1996). From movement to thought : Anatomic substrates of the cerebellar contribution to cognitive processing. *Human Brain Mapping*, 4(3), 174-198.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1996\)4:3<174::AID-HBM3>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1996)4:3<174::AID-HBM3>3.0.CO;2-0)

Schmahmann, J. D., (2019). *The cerebellum and cognition*. 688, 62-75.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.07.005>

Schmahmann, J. D., (1991). *An Emerging Concept : The Cerebellar Contribution to Higher Function*. 48(11), 1178-1187. <https://doi.org/10.1001/archneur.1991.00530230086029>

Schmahmann, J., D., (1998). *Dysmetria of thought : Clinical consequences of cerebellar dysfunction on cognition and affect*. 2(9), 10.

Schmidt, R. A., (1975). *A schema theory of discrete motor skill learning*. 82(4), 225-260.
<https://doi.org/10.1037/h0076770>

Schweizer, T., A., Alexander, M., P., Gillingham, B. A., et al. (2010). *Lateralized Cerebellar Contributions to Word Generation : A Phonemic and Semantic Fluency Study*. 23(1-2), 31-37.
<https://doi.org/10.1155/2010/102421>

Seger, C. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., et al. (2000). *Functional magnetic resonance imaging evidence for right-hemisphere involvement in processing unusual semantic relationships*. 14(3), 361-369. <https://doi.org/10.1037//0894-4105.14.3.361>

Silveri, M. C., Misciagna, S., (2000). *Language, memory, and the cerebellum*. 13(2), 129-143.
[https://doi.org/10.1016/S0911-6044\(00\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0911-6044(00)00008-7)

Snider, R., Eldred, E., (1951). *Electro-anatomical studies on cerebro-cerebellar connections in the cat*. 95(1), 1-16. <https://doi.org/10.1002/cne.900950102>

Sokolov, A. A., Miall, R. C., Ivry, R. B., (2017). *The Cerebellum : Adaptive Prediction for Movement and Cognition*. 21(5), 313-332. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.02.005>

Speedie, L. J., Wertman, E., Ta'ir, J., et al., (1993). *Disruption of automatic speech following a*

right basal ganglia lesion. 43(9), 1768-1774. <https://doi.org/10.1212/WNL.43.9.1768>

Stoodley, C. J., Schmahmann, J. D., (2009). *Functional topography in the human cerebellum : A meta-analysis of neuroimaging studies*. 44(2), 489-501.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.08.039>

Stoodley, C., J., Schmahmann, J. D., (2010). *Evidence for topographic organization in the cerebellum of motor control versus cognitive and affective processing*. 46(7), 831-844.

<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.11.008>

Stoodley, C., J., Valera, E., M., Schmahmann, J. D., (2012). *Functional topography of the cerebellum for motor and cognitive tasks : An fMRI study*. 59(2), 1560-1570.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.065>

Tavano, A., Grasso, R., Gagliardi, C., et al., (2007). *Disorders of cognitive and affective development in cerebellar malformations*. 130(10), 2646-2660.

<https://doi.org/10.1093/brain/awm201>

Tieleman, A., Seurinck, R., Deblaere, K., et al., (2005). *Stimulus pacing affects the activation of the medial temporal lobe during a semantic classification task : An fMRI study*. 26(2), 565-572.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.02.017>

Tiemeier, H., Lenroot, R. K. K., Greenstein, D. K., et al., (2010). *Cerebellum development during childhood and adolescence : A longitudinal morphometric MRI study*. 49(1), 63-70.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.08.016>

Tomasello, M., (2003). *Constructing a language : A Usage-Based Theory of Language Acquisition*. (Harvard University Press).

Trébuchon, A., Démonet, J.-F., Chauvel, P., et al., (2013). *Ventral and dorsal pathways of speech perception : An intracerebral ERP study*. 127, 273-283.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2013.04.007>

Tulving, E., Donaldson, W., (1972). Episodic and semantic memory. In *Organization of memory* (Academic Press).

Tyler, L. K., Marslen-Wilson, W. D., Randall, B., et al., (2011). *Left inferior frontal cortex and syntax : Function, structure and behaviour in patients with left hemisphere damage*. 134(2), 415-431.

<https://doi.org/10.1093/brain/awq369>

Ullman, M. T., & Pierpont, E. I., (2005). Specific Language Impairment is not Specific to Language : The Procedural Deficit Hypothesis. *Cortex*, 41(3), 399-433.

[https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70276-4](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70276-4)

Ulrich, M., Hoenig, K., Grön, G., Kiefer, M., (2013). Brain Activation during Masked and Unmasked Semantic Priming : Commonalities and Differences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(12), 2216-2229.

https://doi.org/10.1162/jocn_a_00449

Veneziano, E., Kail, M., Fayol, M., (2000). Interaction, conversation et acquisition du langage dans les trois premières années. In *L'acquisition du langage. Vol. 1 : Le langage en émergence* (Vol. 1, p. 231-265). Presses Universitaires de France.

Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., (2006). *Meta-analyzing left hemisphere language areas : Phonology, semantics, and sentence processing*. 30, 1414-1432.

Vuillier, F., Medeiros de Bustos, É., Tatu, L., (2011). *Organisation fonctionnelle du cervelet : Approche neuro-anatomique*. 167(5), 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2010.07.045>

Wang, D., Buckner, Liu, H., (2013). *Cerebellar asymmetry and its relation to cerebral asymmetry estimated by intrinsic functional connectivity*. 109(1), 46-57. <https://doi.org/10.1152/jn.00598.2012>

Watson, P. J., (1978). *Nonmotor functions of the cerebellum*. 85(5), 944-967. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.85.5.944>

Wolpert, D. M., Miall, R. C., Kawato, M., (1998). *Internal models in the cerebellum*. 2(9), 338-347. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01221-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01221-2)

Xiang, H., Lin, C., Ma, X., et al., (2003). *Involvement of the cerebellum in semantic discrimination : An fMRI study*. 18(3), 208-214. <https://doi.org/10.1002/hbm.10095>

Yeo, C. H., Hesslow, G., (1998). *Cerebellum and conditioned reflexes*. 2(9), 322-330. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(98\)01219-4](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(98)01219-4)



Influence du cervelet dans la communication humaine : Implication des fonctions évaluatives et anticipatrices dans l'ontogenèse du langage.

Présenté et soutenu par
Oriane BARGAIN

Résumé

L'étude du langage et de ses réseaux cérébraux a nettement évolué ces dernières années. La compréhension actuelle est donc celle d'une organisation complexe en réseaux. Cependant, le cervelet est une structure qui est encore peu considérée dans les modèles proposés, car sa fonction propre reste encore à définir. Néanmoins, l'implication du cervelet dans le langage fait désormais consensus. Le cervelet intervient notamment par ses interrelations étroites entretenues avec les différentes aires cérébrales via des circuits fermés. En tenant compte des modèles actuels neurobiologiques du langage et en intégrant les fonctions de communication, nous proposerons un modèle heuristique computationnel de la communication qui tentera d'illustrer la façon dont le cervelet intervient dans les aspects d'anticipation et de contrôle du langage. Ce modèle vise donc à démontrer que le langage est un phénomène complexe indissociable d'un environnement. En d'autres termes, négliger les représentations internes de l'individu ainsi que ses émotions serait un biais à une compréhension fine des phénomènes en question. Ainsi, le modèle proposé pourra s'appliquer aux processus d'acquisition du langage et permettra d'apporter un regard nouveau sur le rôle du cervelet trop longtemps cantonné aux aspects moteurs. Ce nouveau modèle affinera notre compréhension du langage pour améliorer, de fait, la pratique orthophonique.

Mots clés : Cervelet, langage, prédiction, modèle interne, acquisition du langage, trouble développemental du langage (TDL)

Titre du mémoire en anglais

Summary

The study of language and more specifically of the brain networks that enable language, has improved sufficiently in current years to achieve a model that shows a complex networked organization. However, the cerebellum is only partially considered in the structure of the networks at stake. Still, the fact that the cerebellum is essential in mental functions, and especially in language, is not challenged anymore. Moreover, its role is understood regarding the interrelationships of the different cerebral areas via the so-called closed circuits. Hence, one might work on a computational heuristic model of communication to illustrate how the cerebellum intervenes in the anticipation and in the control of language. This might be done by dealing with current neurobiological models of language and also with integrating communication functions. As a result, this model aims to point out that language is a highly complex phenomenon that is to be understood as part of an environment. In other terms, not taking into account the mental representations of the person and its emotions, might prevent any deep understanding of the core mechanism at stake. Furthermore, this model can also be applied to the processes of language acquisition and now allows a better understanding of the role of this structure, too long narrowed to motor aspects. In practice, this model might improve speech therapy as well as the comprehension of language.

Key words : Cerebellum, language, prediction, internal model, language acquisition, developmental language disorder (DLD)

Mémoire dirigé par Pascal Hilber MCU HDR en neurosciences, Département de biologie, centre de recherche sur les fonctionnements et les dysfonctionnements psychologiques, Mont-Saint-Aignan (Université de Rouen)