

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° Attribué par la Bibliothèque
/ / / / / / / / / / / / / / / /

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG, SPECIALITE : SCIENCES COGNITIVES

REPRESENTATIONS VERBALES MULTISTABLES
EN MEMOIRE DE TRAVAIL :
VERS UNE PERCEPTION ACTIVE DES UNITES DE PAROLE

présentée et soutenue publiquement le 30 septembre 2004 par
M. Marc SATO

Thèse réalisée sous la direction de
M. Jean-Luc SCHWARTZ et M. Christian ABRY

préparée au laboratoire
Institut de la Communication Parlée, UMR CNRS 5009

dans le cadre de l'Ecole Doctorale
"Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement"

JURY

M. Christian ABRY	, Codirecteur de Thèse
M. Alain CONTENT	, Examineur
M. Jean-François DÉMONET	, Rapporteur
M. Jeanny HERAULT	, Président
M. Marc JEANNEROD	, Examineur
M. Jean-Luc SCHWARTZ	, Directeur de Thèse
M. Rudolph SOCK	, Rapporteur

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG, SPECIALITE : SCIENCES COGNITIVES

REPRESENTATIONS VERBALES MULTISTABLES
EN MEMOIRE DE TRAVAIL :
VERS UNE PERCEPTION ACTIVE DES UNITES DE PAROLE

présentée et soutenue publiquement le 30 septembre 2004 par
M. Marc SATO

Thèse réalisée sous la direction de
M. Jean-Luc SCHWARTZ et M. Christian ABRY

préparée au laboratoire
Institut de la Communication Parlée, UMR CNRS 5009

dans le cadre de l'Ecole Doctorale
"Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement"

JURY

M. Christian ABRY	, Codirecteur de Thèse
M. Alain CONTENT	, Examineur
M. Jean-François DÉMONET	, Rapporteur
M. Jeanny HÉRAULT	, Président
M. Marc JEANNEROD	, Examineur
M. Jean-Luc SCHWARTZ	, Directeur de Thèse
M. Rudolph SOCK	, Rapporteur

A ma mère

Remerciements

Mes premières pensées vont à Jean-Luc Schwartz, qui a dirigé cette thèse et dont les enseignements scientifiques et humains m'ont enrichi et stimulé tout au long de ces trois années. Je le remercie infiniment de la confiance qu'il m'a témoignée, de sa patience et de son écoute. Je remercie tout aussi chaleureusement Christian Abry, co-directeur de cette thèse, à l'origine de bon nombre des réflexions et axes de recherche explorés durant ces années, et Hélène Løevenbruck, qui a également encadré ce travail et m'a constamment soutenu et encouragé. Jean-Luc, Christian, Hélène, merci de toutes les connaissances que vous m'avez fait partager, de votre confiance et de votre soutien. Je vous témoigne toute mon amitié et ma reconnaissance.

J'adresse également mes remerciements les plus chaleureux à Marie-Agnès Cathiard, Isabelle Rousset et Nathalie Vallée, de l'Institut de la Communication Parlée, à Monica Baciù, du laboratoire de Psychologie et Neurocognition de l'Université Pierre Mendès-France et à Christoph Segebarth, de l'unité de Neuroimagerie Fonctionnelle et Métabolique de l'Université Joseph Fourier, qui ont tous grandement contribué à la réalisation des travaux présentés ici et avec qui j'ai eu la chance et le réel plaisir de collaborer.

J'exprime mes plus sincères remerciements aux membres du jury d'avoir bien voulu examiner et critiquer ce travail. Leur présence dans ce jury est pour moi un grand honneur.

- A Monsieur Alain Content, Professeur de Psychologie et Linguistique à l'Université Libre de Bruxelles.
- A Monsieur Jean-François Démonet, Directeur de Recherche en Neurologie au Centre Hospitalier Universitaire de Purpan, Université de Toulouse III.
- A Monsieur Jeanny Hérault, Professeur en Traitement du Signal et des Images à l'Université Joseph Fourier, Grenoble I.
- A Monsieur Marc Jeannerod, Membre de l'Académie des Sciences, Professeur de Neurophysiologie à l'Université Claude Bernard, Lyon I.
- A Monsieur Rudolph Sock, Professeur de Phonétique Générale et Expérimentale à l'Université Marc Bloch, Strasbourg II.

Pour leurs encouragements, leurs conseils et leurs critiques scientifiques, je tiens à remercier vivement Alan Baddeley, Jean-François Démonet, Kenneth de Jong, Pascal Perrier, Mark Pitt, Daniel Reisberg, Willy Serniclaes, Rudolph Sock et Yi Xu.

Pour leur aide dans la réalisation technique des expériences et le traitement statistique des données, je remercie Alain Arnal, Mathias Odisio, Carole Peyrin, Christophe Savariaux et Anne Vilain. J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes qui ont m'ont assisté sur le plan administratif et/ou informatique : Nadine Bioud, Christian Bulfone, Laurent Dubet, Yvette Gaudé et Nino Medves.

Je remercie bien sûr tous les membres de la belle et grande famille ICPéenne pour m'avoir chaleureusement accueilli ces trois années dans leur laboratoire ainsi que les chercheurs du Département de Neurosciences de l'Université de Parme, et plus particulièrement Giovanni Buccino, Leonardo Fogassi et Giacomo Rizzolatti, pour m'offrir l'opportunité exceptionnelle de poursuivre mes recherches au sein de leur équipe l'année prochaine.

Je remercie enfin ma famille et mes amis qui ont contribué par leur soutien permanent à faire de ces trois années une belle aventure.

Résumé

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, visant à souligner la dépendance des représentations mentales phonologiques à des contraintes purement articulatoires, ont emprunté au domaine scientifique de la cognition motrice l'idée d'un couplage fonctionnel, d'une co-structuration, des mécanismes de perception, de simulation mentale et de production des gestes de parole. Le paradigme central de ce travail est celui de l'Effet de Transformation Verbale, reposant sur la notion de formes perceptives multistables, et qui fournit un accès original aux mécanismes d'interaction sensorimotrice en relation avec l'imagerie auditive et la mémoire de travail. Les hypothèses formulées, notamment celle d'une mise en forme de certains des principes et paramètres de la phonologie par des contraintes sensorimotrices ou encore celle d'un fonctionnement de la mémoire de travail basé sur le traitement des représentations acoustiques et articulatoires, s'inscrivent dans une conception d'un système de perception de la parole orientée vers et pour le contrôle de l'action. Dans ce cadre théorique, la perception de la parole consisterait en l'ensemble des processus perceptifs permettant au niveau segmental de récupérer et contraindre les cibles et phases des gestes vocaux, mécanismes fournissant par là-même un ensemble de représentations utilisées pour le suivi et la compréhension des actions perçues mais aussi le contrôle et la spécification de nos propres actions. Les résultats obtenus lors d'expériences comportementales et de neuroimagerie fonctionnelle confirment le rôle des contraintes actionnelles dans la perception multistable de la parole et démontrent l'implication de la mémoire de travail verbale dans l'émergence des représentations perceptives. Dès lors, que ce soit dans le contrôle exécutif, la simulation mentale ou encore la perception des gestes de parole, ces "représentations partagées", pourraient être à la base des mécanismes de reconnaissance des unités de parole.

Mots Clés: Imagerie Auditive, Effet de Transformation Verbale, Phasages Articulatoires, Représentations Motrices, Mémoire de Travail Verbale, Systèmes de Production et de Perception de la Parole.

Abstract

In recent years, the studies of cerebral and cognitive systems implied in the control and analysis of actions have provided empirical evidence towards a functional intertwining between perception, execution and mental imagery of actions. Within the framework of speech sciences, the aim of this thesis was to test the existence of purely motor constraints in the birth and analysis of mental phonological forms. The experimental paradigm of this work is that of the Verbal Transformation Effect, resting on the concept of multistable speech perception and providing an original access to sensorimotor interactions in relation to auditory imagery and working memory. By suggesting that phonology could be constrained, in some part, by sensorimotor properties and that verbal working memory could rely on both acoustical and articulatory representations, our hypotheses converge towards the idea of a speech perception system directed towards and for action control. Both behavioural and functional neuroimaging results confirm the existence of purely motor constraints in the multistable perception of speech and demonstrate the verbal working memory involvement during the emergence of perceptual representations. Involved in the executive control, the mental simulation and the perception of speech gestures, these "shared representations" could then form a basis for the recognition of speech units.

Key-Words: Auditory Imagery, Verbal Transformation Effect, Articulatory Phasing, Motor Representations, Verbal Working Memory, Speech Perception and Production Systems.

- Avant Propos -

La Parole Cognitive : Avancées vers une Théorie de la Perception pour le Contrôle de l'Action

Speech is rather a set of movements made audible than a set of sounds produced by movements.

R.L. Stetson¹

La Parole Cognitive

Constitutives d'un nouveau chapitre de la cognition - la cognition motrice - les études des systèmes cérébraux et cognitifs spécialisés dans l'émergence et le traitement des représentations d'action, ont permis de montrer les liens étroits unissant l'observation, la représentation mentale d'une action, enfin, son exécution. Des premières données comportementales, soulignant le couplage fonctionnel entre production et représentation du mouvement, aux travaux récents de neurophysiologie et de neuroimagerie, le concept de représentation d'action s'est étendu au-delà de nos propres actions à celui de "représentations partagées"² impliquées dans la communication et l'intersubjectivité. Face à cette extension du champ de l'action produite ou observable à l'activité de représentation, et dans le cadre des travaux visant à démontrer l'existence d'une instantiation physique et neurophysiologique, donc par la substance, des principes et paramètres de la phonologie, l'objectif premier des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse était de montrer l'existence possible de contraintes purement motrices, liées à l'appareil périphérique articulatoire, dans l'analyse et la construction des représentations mentales phonologiques.

Dans ce but, nous avons testé la sensibilité de l'Effet de Transformation Verbale, un phénomène de perception multistable de la parole lié aux changements pouvant survenir lors de la répétition ou lors de la perception prolongée de séquences langagières et dont nous présentons une revue de littérature détaillée dans le premier chapitre, à des contraintes de production de la parole. Plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés aux variations de stabilité perceptive pouvant survenir lors de la répétition, ouverte ou interne, de séquences monosyllabiques et dépendantes de mécanismes dynamiques articulatoires. Les données expérimentales, qui font l'objet du second chapitre, démontrent clairement l'existence d'un biais d'asymétrie des transformations observées, biais relevant de contraintes purement motrices, actionnelles, liées aux relations de phase, et donc à la cohérence, entre gestes articulatoires des séquences répétées. La conservation des patrons d'attractivité de ces séquences, d'une condition de répétition à voix haute vers une condition de répétition mentale, souligne la perméabilité des représentations mentales phonologiques à des contraintes purement motrices et atteste des liens unissant la représentation mentale d'une action et son exécution.

Dans le cadre des recherches portant sur l'examen des interactions possibles entre les grandes tendances des systèmes phonologiques des langues du monde et les contraintes de production et de perception de la parole, nous avons alors testé, lors de la perception prolongée de séquences réversibles dissyllabiques, l'impact perceptif d'une tendance organisationnelle spécifique du langage, l'effet "LC", indiquant une alternance consonantique préférentielle de type Labiale-(Voyelle)-Coronale plutôt que Coronale-(Voyelle)-Labiale dont les fondements seraient liés à des contraintes biomécaniques articulatoires. L'existence d'une asymétrie des transformations en faveur de la structure Labiale-Coronale, présentée dans le troisième chapitre, atteste de la validité perceptive de l'effet LC durant une tâche de transformation verbale et souligne de fait une interaction entre systèmes de production et de perception de la parole lors de la construction et l'émergence des représentations phonologiques.

Lors de ces deux premières études, c'est ainsi le potentiel de mise en forme du langage par les mécanismes de perception et d'action que nous avons voulu interroger, en adoptant une position visant à étudier la perception, comme la production, des unités de parole sous l'angle des

¹ Stetson, R.H. (1951). *Motor Phonetics: A study of speech movements in action*. Amsterdam: North-Holland, 2nd Edition.

² Jeannerod, M. (2002). *La nature de l'esprit*. Paris, Odile Jacob.

interactions sensorimotrices et de leur lien constant avec la phonologie, ce par le biais de leurs structurations réciproques, ou co-structurations, et non comme deux systèmes indépendants et séparément étudiables. Les résultats obtenus pourraient apporter de nouveaux arguments expérimentaux en faveur d'une "Théorie de la Perception pour le Contrôle de l'Action"³, développée par les chercheurs de l'Institut de la Communication Parlée, pour laquelle la perception des unités de parole consisterait en l'ensemble des processus perceptifs permettant au niveau segmental de récupérer et contraindre les cibles et phases des gestes vocaux, fournissant par là-même un ensemble de représentations utilisées pour le suivi et la compréhension des actions perçues et, en retour, pour le contrôle et la spécification de nos propres actions.

Dans le cadre de cette théorie, cette interaction locuteur-auditeur consisterait donc en l'élaboration progressive de représentations internes sensorimotrices, issues du traitement des entrées sensorielles auditives et contraintes par les propriétés du système articulatoire. De manière plus spécifique, l'estimation des caractéristiques spectrales et événements temporels contenus dans le signal acoustique permettrait une première définition des cibles et du timing des gestes articulatoires associés. Ces traitements auditifs ne permettant qu'une caractérisation partielle, des procédures de régularisation, ancrées dans les mécanismes de contrôle articulatoire, contribueraient alors à une mise en forme spécifiée, une structuration, des représentations construites. Enfin, cette récupération et mise en forme des gestes de parole s'appuierait sur la nature multimodale du système perceptif, la vision pouvant servir de relais à ces mécanismes perceptifs. Les représentations ainsi construites seraient donc intrinsèquement sensorimotrices, ni purs produits sensoriels, ni purs objets moteurs inférés, mais des percepts multimodaux régularisés par l'action.

Dès lors, une question importante est celle de l'identification et localisation des processus cognitifs et cérébraux mis en œuvre lors de l'intégration et du traitement de ces représentations sensorimotrices. Un candidat susceptible de fournir une architecture adaptée aussi bien au traitement phonologique en ligne qu'au suivi attentionnel en parole, est la Boucle Phonologique, la composante verbale du modèle de mémoire de travail de Baddeley et Hitch. Après avoir rappelé les grandes lignes de la littérature sur ce modèle, nous décrivons dans le quatrième chapitre une étude utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle visant à tester l'implication de ce système mnésique dans l'analyse, le contrôle et l'émergence de séquences articulatoires, lors de la recherche active de transformations verbales. Les résultats de cette étude par l'observation d'un réseau neural activé similaire à celui observé dans des tâches de mémoire de travail, démontrent l'engagement de la Boucle Phonologique lors des processus de parsing syllabique, de maintenance attentionnelle de l'information et de prise de décision nécessaires à l'émergence des transformations verbales, et suggèrent sa possible sensibilité et dépendance non seulement à des principes d'organisation phonologique mais aussi à des contraintes spécifiques purement motrices.

Mis en relation, ces travaux s'inscrivent dès lors dans une problématique plus large, celle du rôle possible de la mémoire de travail verbale dans l'acquisition du langage, au travers des relations entre capacités perceptives et motrices. Des recherches récentes ont en effet permis de déterminer l'implication de la Boucle Phonologique dans l'acquisition et le développement du langage. Ces études suggèrent que la contribution de ce système dans la rétention de matériel verbal familier ne serait qu'un produit accidentel de sa fonction première, son véritable rôle étant de servir le langage au travers de l'apprentissage de formes phonologiques nouvelles et de permettre, sinon la création, du moins le renforcement des structures phonologiques sous-jacentes. Dans le cadre des théories soulignant l'importance de l'apprentissage de coordinations orofaciales et orolaryngées nouvelles dans l'acquisition du langage et face aux études récentes indiquant l'existence possible d'un système de communication/imitation fondé sur la reconnaissance gestuelle – travaux reliés notamment à la découverte des fameux neurones miroirs - nous émettons l'hypothèse que ce système de mémoire de travail incorpore un processus de contrôle de la parole, fournissant une plateforme adaptée à la comparaison et l'évaluation des unités de parole et, de là, au développement des capacités langagières.

³ Schwartz, J.-L., Abry, C., Boë, L.-J. & Cathiard, M.A. (2002). Phonology in a theory of perception-for-action-control. In: Durand, J., Lacks, B. (Eds.), *Phonology: From Phonetics to Cognition*. Oxford University Press, Oxford, pp. 240-280. Voir également, Sock, R. (1998). *Organisation temporelle en production de la parole – Emergence de catégories sensori-motrices phonétiques*. Presses Universitaires du Septentrion.

- Chapitre Premier -

Représentations Multistables des Unités de Parole

L'important dans une transformation, c'est ce qu'elle ne transforme pas, c'est-à-dire ce qu'elle laisse invariant.

S.S. Stevens⁴

L'Effet de Transformation Verbale

Les illusions ont longtemps été considérées comme une erreur des sens. Nombre de philosophes ont ainsi vu en leur existence, par notre inaptitude à percevoir "la réalité de la réalité", la preuve de notre ignorance. Par contraste, la science actuelle voit en elles la capacité de notre cerveau à formuler une solution en réponse à des informations sensorielles ambiguës ou contradictoires. Les illusions perceptives seraient ainsi le reflet des croyances mais aussi et surtout des hypothèses que l'individu pose sur le monde extérieur, sur les autres et sur lui-même⁵.

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont emprunté à cette conception scientifique des illusions l'idée d'une source potentielle de connaissances sur les liens unissant les systèmes de production et de perception de la parole et, de manière plus spécifique, sur la structuration réciproque des mécanismes articulatoires et acoustiques, indispensable selon nous à l'émergence des représentations phonologiques et du langage⁶. Considérée à l'origine comme une illusion purement auditive, l'Effet de Transformation Verbale, utilisé comme outil expérimental d'investigation dans l'ensemble de nos travaux, apparaît adapté aussi bien à l'exploration de l'organisation et du traitement des représentations phonologiques et lexicales qu'à l'étude de contraintes articulomotrices dans l'analyse et l'émergence de telles représentations. Nous présenterons dans cette première partie une revue des études menées sur ce phénomène de perception multistable de la parole.

Syllabes Neckeriennes, Syllabes Enactées...

Dans une étude sur la perception visuelle, Chambers et Reisberg⁷ ont défendu la thèse selon laquelle les images mentales n'ont pas d'existence en dehors de la compréhension que l'on en a, au contraire des stimuli physiques qui existent indépendamment du sujet percevant et nécessitent de fait une interprétation. Selon cette conception, l'émergence d'une image mentale, délibérée ou non, est dès lors toujours accompagnée d'un sens, d'une signification relative. Pour vérifier cette hypothèse, les auteurs ont procédé à une série d'expériences dans lesquelles des sujets imaginaient des figures ambiguës standards, comme le cube de Necker⁸ (voir Figure 1), figures qui ne leur étaient pas familières et dont ils ne parvinrent pas à découvrir mentalement d'autres formes que celle décrite oralement par l'examineur. Suite à cette expérience, les sujets étaient cependant capables de dessiner les figures et de constater visuellement les différentes interprétations possibles de celles-ci. Chambers et Reisberg conclurent de ces données que la réinterprétation des images

⁴ Stevens, S.S. (1951). Mathematics, measurements, and psychophysics. In: Stevens S.S. (Editor), *Handbook of Experimental Psychology*, New York, Wiley, pp. 1-49. *op. cit.* in Jakobson R. & Waugh, L. (1980). *La Charpente Phonique du Langage*. Paris, Les Editions de Minuit.

⁵ Voir Berthoz, A. (1996). *Le Sens du Mouvement*. Paris, Odile Jacob ; Pinker, S. (1997). *Comment Fonctionne L'esprit*. Paris, Odile Jacob ; Berthoz, A. (2003). *La Décision*. Paris, Odile Jacob.

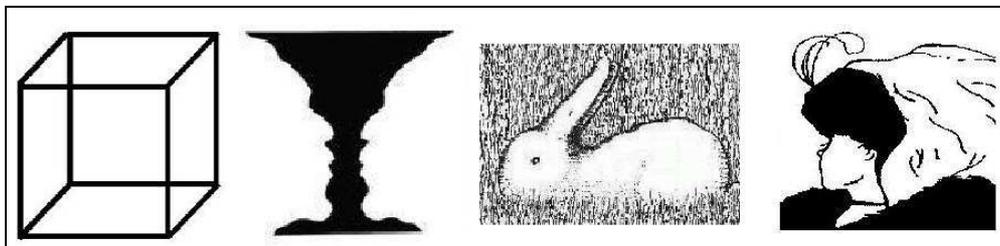
⁶ Abry, C. & Schwartz, J.-L. (1997). La Parole Cognitive. In: Gordon, M.B. & Paugam-Moisy, H. (Eds.), *Sciences Cognitives, Diversité des Approches*, Paris, Hermès, pp.103-114 ; Sock, R. (1998). *op. cit.* ; Schwartz, J.-L. & Escudier, P. (2000). *La Parole Cognitive*. Paris, Hermès ; Schwartz, J.-L., Abry, C., Boë, L.-J. & Cathiard, M.A. (2002). *op. cit.*

⁷ Chambers, D. & Reisberg, D. (1985). Can mental images be ambiguous? *Journal of Experimental Psychology: General*, 11: 317-328.

⁸ Necker, L.A. (1832). Observations on some remarkable phenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *Lond. Edinb. Philos. Mag. Sci.*, 3: 329-337.

mentales visuelles, intrinsèquement porteuses de sens, était impossible et que celles-ci ne pouvaient donc être ambiguës⁹.

Figure 1 : Le phénomène d'ambiguïté globale est caractérisé par le fait qu'un objet dans sa totalité peut susciter différentes interprétations. Par exemple, notre perception du cube de Necker (figure de gauche) va hésiter entre une vue en plongée de sa face supérieure et une vue en contre-plongée de sa face inférieure¹⁰.



Bien que les images auditives diffèrent des images visuelles, Reisberg *et al.*¹¹ ont voulu tester pour cette modalité cette hypothèse de non-ambiguïté des images mentales. Pour ce faire, ils exploitèrent l'Effet de Transformation Verbale découvert par Warren et Gregory¹². Ce "jeu de mot"¹³ correspond en parole à la rivalité perceptive de profondeur du cube de Necker¹⁴ : La répétition rapide et à haute voix de mots ou de séquences de mots produit un flux sonore qui est compatible avec plus d'une segmentation, pouvant alors entraîner une perception différente du stimulus répété. Par exemple, la répétition du mot "life" fournit un flux sonore compatible avec une segmentation de type "life" mais aussi de type "fly". Les auteurs utilisèrent ce paradigme des transformations verbales pour déterminer si la répétition mentale de stimuli langagiers (i.e., sans *feed-back* auditif) pouvaient aussi entraîner l'émergence de transformations.

Dans une série d'expériences, ils proposèrent à des sujets de répéter mentalement un mot et de reporter toute transformation "perçue" de l'image auditive correspondante. Afin de tester plus complètement leur hypothèse, ils demandèrent à d'autres sujets de guetter une transformation lors de la répétition ouverte (à voix haute) du même mot, produite soit par l'examineur, soit par le sujet lui-même. Dans la condition imaginée, il existe cependant une possibilité d'"*enactment*", correspondant à une production implicite du mot par un mécanisme de subvocalisation. Les auteurs testèrent donc différents degrés d'*enactment* lors de la procédure de répétition (chuchotement autorisé, répétition silencieuse sans phonation, répétition mentale) ainsi que des tâches concurrentes censées supprimer toute possibilité d'*enactment* (blocage de la mâchoire, lèvres jointes et langue collée au palais, suppression articulaire conjointe¹⁵, mâcher du chewing-gum).

⁹ Cette conception s'inscrit dans le cadre d'un large et ancien débat scientifique et s'oppose partiellement à l'idée d'une similarité fonctionnelle entre processus visuels d'imagerie et de perception. Pour un aperçu récent des recherches menées sur les liens possibles entre imagerie et perception visuelles, incorporant notamment les données issues des techniques récentes d'imagerie fonctionnelle, voir la discussion récente entre Stephen Kosslyn et Zenon Pylyshyn : Kosslyn, S.M., Ganis, G. & Thompson, W.L. (2003). Mental imagery: Against the nihilistic hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3): 109-111 ; Pylyshyn, Z. (2003). Explaining mental imagery: now you see it, now you don't: Reply to Kosslyn *et al.* *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3): 111-112 ; Pylyshyn, Z. (2003). Return of the mental image: Are there really pictures in the brain? *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3): 113-118.

¹⁰ Pour une description plus détaillée des figures ambiguës : Ninio, J. (1998). *La science des illusions*. Paris, Odile Jacob.

¹¹ Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). Enacted auditory images are ambiguous; Pure auditory images are not. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A: 619-641.

¹² Warren, M.R. & Gregory, R.L. (1958). An auditory analogue of the visual reversible figure. *American Journal of Psychology*, 71: 612-613.

¹³ Treiman, R. (1983). The structure of spoken syllables: Evidence from novel word games. *Cognition*, 15: 49-74.

¹⁴ L'analogie entre figures ambiguës et transformations verbales présente néanmoins certaines limitations : En particulier, les différences entre nature temporelle et spatiale des stimuli, le nombre de transformations pouvant être perçues et la nature des biais possibles dans l'émergence de nouvelles représentations.

¹⁵ La procédure conjointe de suppression articulaire consiste, durant la répétition mentale d'un mot, à répéter à haute voix une séquence non-significative (par exemple, 'bla-bla-bla'). Cette technique expérimentale, très utilisée lors de tâches de mémoire de travail verbale, est présumée empêcher le fonctionnement normal des processus de contrôle

Table 1 : Expérience de transformation verbale - Fréquence des transformations observées selon différentes conditions de répétition¹⁶. D'après Reisberg *et al.* (1989).

Conditions	Résultats (%)
Répétition à haute voix par l'examineur	100
Répétition à haute voix par le sujet	75-100
Répétition chuchotée	65
Répétition silencieuse	55
Répétition mentale	20-50
Répétition mentale avec blocage de l'appareil articulatoire	30
Répétition mentale en mâchant du chewing-gum	25
Répétition mentale avec suppression articulatoire conjointe	15

Les données expérimentales montrent que le phénomène de changement conscient d'une représentation verbale vers une autre n'apparaît que lorsqu'un certain degré d'enactment est possible (voir Table 1). Ainsi, le pourcentage de transformations observées est directement fonction de ce degré d'enactment : Depuis la condition de répétition à voix haute - où le mouvement externe (et donc interne) est entier - jusqu'à la condition où le sujet s'imagine répétant - condition où le mouvement est censé être purement interne. Entre ces deux extrêmes, les conditions où le mouvement est partiellement externalisé : chuchotement, puis articulation silencieuse. Cette diminution progressive du nombre de transformations pourrait s'expliquer par une implication toujours moindre des aires sensori-motrices pendant la simulation mentale du mouvement par rapport au mouvement exécuté. Enfin, les tâches concurrentes de suppression articulatoire, de mâcher du chewing-gum ou encore le fait d'avoir les articulateurs bloqués empêchent les sujets de déceler une transformation. L'engagement des centres moteurs de contrôle et de production articulatoire lors de ses tâches concurrentes empêcherait la formation d'images motrices annexes, nécessaires à l'émergence de nouvelles représentations¹⁷. Le processus de reconstruction perceptive

articulatoire tout en ne sollicitant que de façon minimale les ressources attentionnelles. Murray, D.J. (1967). Overt versus covert rehearsal in short-term memory. *Psychonomic Science*, 7: 362-364 ; Baddeley, A.D. (1986). *Working Memory*. Oxford, Clarendon Press.

¹⁶ Les résultats de la Table 1 concernent les pourcentages de transformations observées lors de la répétition du mot "stress" vers le mot "dress". Reisberg *et al.*, afin de bloquer la possibilité d'une stratégie "combinatoire" par les sujets, utilisèrent également une séquence de mots dont la transformation était facile à entendre mais difficile à deviner (soit la transformation de "kiss the sky" vers "kiss this guy"). Les résultats de transformations obtenus pour ces séquences sont cependant similaires à ceux observés lors de la transformation de "stress" vers "dress". Il est à noter que les deux types de transformations reposent essentiellement sur un contrôle orolaryngé du voisement ([t] vs. [d] pour "stress"/"dress" et [k] vs. [g] pour "kiss the sky"/"kiss this guy").

¹⁷ Ainsi, la possibilité d'évoquer une image motrice pourrait dépendre de l'état d'excitation des centres moteurs, ces systèmes ne pouvant être engagés simultanément dans deux actions concurrentes (l'une externe et l'autre mentale). Il est par exemple difficile de s'imaginer prononcer la lettre "B" ou encore la lettre "F" tout en gardant la bouche grande ouverte ou de forme arrondie : Binet, A. (1886). *La psychologie du raisonnement. Recherches expérimentales par l'hypnotisme*. Paris, Alcan. *op. cit.* in Jeannerod, M. (2002). *op. cit.* ; Stricker, S. (1885). *Du Langage et de la Musique*. Paris, Bibliothèque de Philosophie Contemporaine. *op. cit.* in Sirigu, A. & Duhamel, J.R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(7): 910-919. Pour une revue de questions sur les représentations d'actions, voir également : Jeannerod, M. (1994). The representing brain. Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17: 187-245 ; Jeannerod, M. & Frack, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 9: 735-739 ; Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition, *NeuroImage*, 14: S103-S109 ; Grèzes, J. & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, 12: 1-19. Sur les liens unissant imagerie motrice et exécution du mouvement, il est à noter également certaines études portant sur des patients amputés continuant de ressentir, voire d'utiliser, leurs membres malgré l'absence physique de ces derniers (un symptôme baptisé de "membre fantôme") ou encore les cas de lésions cérébrales entraînant chez des patients des déficits de reconnaissance des actions externes ou propres, des difficultés à imaginer des actions, voire une impossibilité à les inhiber : voir, Georgieff, N. (2000). Neuropsychopathologie cognitive sociale de l'action : Apport à l'étude des symptômes positifs de la schizophrénie. *Intellectica*, 2(31): 191-225 ; Jeannerod, M. (2001). *op. cit.* ; Ramachandran, V.S. & Blakeslee, S. (2002). *Le Fantôme intérieur*. Paris, Odile Jacob ; Schwoebel, J., Boronat, C.B. & Coslett, H.B. (2002). The man who executed

d'une image mentale auditive dépend ainsi du degré de subvocalisation possible. Les auteurs concluent alors en la non-ambiguïté des images mentales auditives "pures", c'est à dire sans possibilité d'enactment, et à l'ambiguïté possible des images "enactées"¹⁸.

Un Phénomène Purement Perceptif ?

La plupart des études sur les transformations verbales considèrent ce phénomène sous un angle purement perceptif. Ainsi, la procédure expérimentale la plus couramment utilisée est celle de l'écoute attentive d'un stimulus auditif langagier répété en boucle sur bande magnétique. Bien qu'initialement le sujet perçoive correctement le stimulus répété, des mots ou pseudo-mots illusoire peuvent ensuite émerger. Ce processus de "transformation" persiste pendant toute la durée de la répétition, correspondant à des changements perceptifs successifs d'une forme à une autre (ou vers la forme originale).

Les études utilisant ce paradigme ont montré que le nombre de transformations pouvaient dépendre de différents facteurs tels que la "longueur" des stimuli utilisés (indice représenté dans les études par la longueur syllabique des stimuli), la durée de l'intervalle inter-stimulus et le nombre de répétitions¹⁹. Les transformations observées, par comparaison à la séquence répétée, peuvent correspondre à des changements de type segmentaux²⁰ (par exemple, une déviation phonétique relative à la substitution d'un phonème par un autre phonétiquement proche ou encore une inversion segmentale²¹), à un regroupement auditivo-perceptif de type *streaming*²² (correspondant à la perception conjointe de plusieurs flux sonores superposés) ou, enfin, à une distorsion de type lexicale ou sémantique²³. Bien qu'il n'existe pas de théorie explicative unifiée des transformations verbales, elles sont généralement considérées comme dépendantes des processus d'organisation perceptive et d'interprétation de la parole. En particulier, deux fonctions, celles de satiété et de changement de critère, sont impliquées dans la ré-interprétation du signal sonore lorsque celui-ci ne fait plus sens²⁴. Ainsi, la présentation répétée d'un stimulus entraîne la satiété de sa représentation en mémoire. Simultanément, le biais utilisé pour catégoriser ce stimulus change brusquement, une nouvelle représentation est alors construite : ces processus se répétant ainsi tout le long de la procédure.

L'une des tentatives les plus élaborées pour rendre compte du phénomène de perception multistable qu'est l'Effet de Transformation Verbale provient du modèle localisationniste de production et de perception du langage élaboré par MacKay *et al.*²⁵. Ce modèle, intitulé "Node Structure Theory" (*NST*), postule l'existence d'un vaste réseau de connections entre unités

« imagined » movements: Evidence for dissociable components of the body schema. *Brain and Cognition*, 50: 1-16 ; Wilson, M. (2003). Imagined movements that leak out. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(2): 53-55.

¹⁸ Pour des résultats similaires, voir également Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). The role of subvocalization in auditory imagery. *Neuropsychologia*, 11: 1433-1454.

¹⁹ Warren, M.R. (1961). Illusory changes of distinct speech upon repetition – The verbal transformation effect. *British Journal of Psychology*, 52: 249-258 ; Warren, M.R. (1982). *Auditory Perception*. Pergamon Press, New-York ; Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). Verbal transformation: Habituation or spreading activation? *Brain and Language*, 71: 285-298 ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). Does node stability underlie the verbal transformation effect? A test of node structure theory. *Perception & Psychophysics*, 64(5): 795-803.

²⁰ Pour une taxonomie des erreurs de type segmentales spontanées et provoquées en production de parole, voir Levelt, W.J.M. (1989). *Speaking: From Intention to Articulation*. MIT Press, Cambridge.

²¹ Warren, M.R. (1961). *op. cit.* ; Warren, M.R. & Meyers, D.M. (1987). Effects of listening to repeated syllables: Category boundary shifts versus verbal transformation. *Journal of Phonetics*, 15: 169-181.

²² Pitt, M. & Shoaf, L. (2001). The source of a lexical bias in the verbal transformation effect. *Language and Cognitive Processes*, 16(5/6): 715-721 ; Pitt, M. & Shoaf, L. (2002). Linking verbal transformations to their causes. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception and Performance*, 28(1): 150-162.

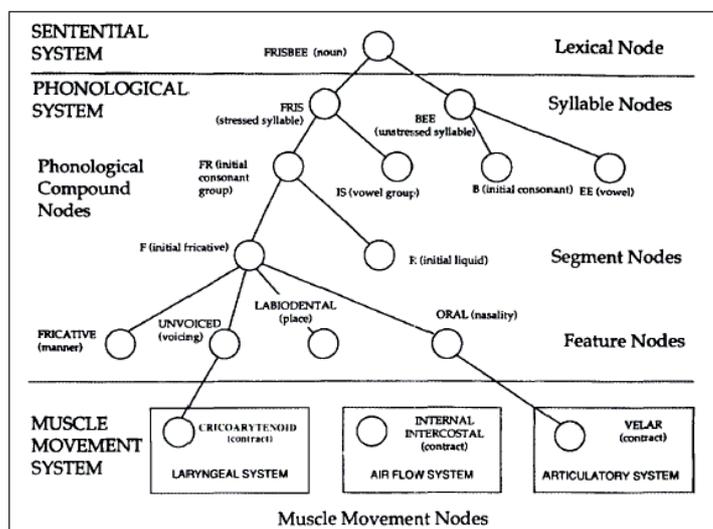
²³ Warren, M.R. (1961). *op. cit.* ; Natsoulas, T. (1965). A study of the verbal transformation effect. *American Journal of Psychology*, 78: 257-263 ; Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). *op. cit.* ; Pitt, M. & Shoaf, L. (2001). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

²⁴ Warren, M.R. & Meyers, D.M. (1987). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). Relations between word perception and production: New theory and data on the verbal transformation effect. *Journal of Memory and Language*, 32: 624-646 ; Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). *op. cit.*

²⁵ MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.*

représentationnelles (*nodes*), hiérarchiquement organisées à l'intérieur de différents systèmes et sous-systèmes, et pouvant être indépendamment activées. Une particularité importante de ce modèle est que l'activation de ces unités peut être provoquée aussi bien lors de la production (ouverte ou mentale) que lors de la perception d'unités de parole, ce "partage" des unités représentationnelles permettant de rendre compte, selon les auteurs, d'une certaine complémentarité fonctionnelle entre les deux systèmes de production et de perception du langage. La Figure 2 illustre l'activation des unités représentationnelles lors de la production du mot "frisbee". La propagation de ces activations se fait graduellement selon un mécanisme *top-down*, du niveau de la phrase (*sentential system*), lié à la représentation lexicale du mot, vers le système phonologique (*phonological system*), représentant ses contours syllabiques et phonémiques (*syllable and phonological compound nodes*) ainsi que les segments et traits distinctifs relatifs²⁶ (*segment and feature nodes*), vers le système de mouvement musculaire (*muscle movement system*), impliqué dans la production ouverte du mot²⁷ et comprenant les sous-systèmes nécessaires aux contrôles laryngé, phonatoire et articuloire (*laryngeal, air flow and articulatory systems*).

Figure 2 : Exemple d'activation des unités représentationnelles dans le modèle NST lors de la production du mot "frisbee". Repris de MacKay *et al.* (1993).



Trois processus fondamentaux permettent d'expliquer l'émergence de nouvelles représentations verbales lors de l'écoute répétée d'un stimulus langagier : Le processus d'amorçage (*priming process*), le processus d'activation (*activation process*) et, enfin, le processus de saturation (*satiation process*). Lors de la perception d'un mot, l'analyse du signal acoustique déclenche l'activation des

²⁶ Il est important de noter l'absence, ou du moins la non-formulation par les auteurs, de connections transversales entre unités d'un même sous-système. L'activation des unités semble donc s'opérer dans ce modèle selon un principe d'organisation syllabique purement sériel, impliquant l'existence d'un mécanisme classique de "scan-copy", parcourant complètement le ou les items lexicaux devant être produits et copiant les sous-représentations adéquates à l'intérieur d'emplacements dans des séries de structures syllabiques simples. Cette hypothèse de "slot/segment" (selon le terme défini par Shattuck-Hufnagel) implique donc que les cadres des structures syllabiques soient représentés de la même façon durant le processus de production indépendamment des contenus segmentaux. Ce mécanisme d'organisation sérielle des unités, pour chaque sous-système, a pour implication que les mécanismes de coarticulation, omniprésents en parole, ne puissent être reliés dans ce modèle qu'à l'activation des unités du système de mouvement musculaire. Pour une discussion sur les principes d'organisation sérielle des unités syllabiques ou segmentales, voir Shattuck-Hufnagel, S. (1979). *Speech errors as evidence for a serial order mechanism in sentence production*. In: W.E. Cooper and E.C.T. Walker (Editors), *Sentence Processing: Psycholinguistic Studies Presented to Merrill Garrett*, Hillsdale NJ: Erlbaum, pp. 295-342 ; Levelt, W.J.M. (1989). *op. cit.* ; Levelt, W.J.M., Roelofs, A. & Meyer, A.S. (1999). *A theory of lexical access in speech production*. *Behavioral and Brain Sciences*, 22: 1-38. Pour une revue des principes de coarticulation, voir Sock, R. (1998). *op. cit.*

²⁷ Concernant les différents modes de production possibles, MacKay *et al.* soulignent la non-implication des unités du système de mouvement musculaire lors de la production mentale d'un mot et l'activation exclusive des unités du sous-système articuloire lors d'une production silencieuse (*mouthng*).

unités responsables des traitements segmentaux (*feature and segment nodes*). Cette activation se propage ensuite, selon des mécanismes compétitifs de type *bottom-up*, vers les unités syllabiques et lexicales. A chaque niveau, une valeur d'amorçage est alors attribuée à chacune des unités, ce, en fonction du nombre de connections et des valeurs d'amorçage correspondantes aux unités du niveau inférieur. Finalement, la perception du mot entendu correspond à l'activation de l'unité lexicale ayant la valeur la plus élevée (*most-primed-wins-principle*). Cette activation se termine par le déclenchement d'un mécanisme d'auto-inhibition²⁸ qui permet de réduire l'intensité d'amorçage de l'unité pendant un courte période temps (150 ms), mécanisme suivi d'une période d'hyperexcitabilité. Le processus de satiété, tel que défini dans le modèle NST, permet de rendre compte de l'émergence de nouvelles représentations verbales lors de la perception répétée d'un mot. Ce processus apparaît lors de l'activation répétée d'une unité et réduit de manière temporaire sa capacité à accumuler des valeurs d'amorçage, fonction des unités inférieures. Ce mécanisme a ainsi pour conséquence de permettre l'activation d'une autre unité dont la valeur d'amorçage serait devenue supérieure, activation entraînant alors la perception d'une nouvelle représentation verbale. Il est important de noter que, pour MacKay *et al.*, les transformations verbales pouvant apparaître lors de la production répétée d'un mot ne seraient en fait qu'un épiphénomène transitoire, lié au traitement du feedback acoustique. Les mécanismes compétitifs d'amorçage et d'activation, n'apparaîtraient pas lors de la production d'un mot (du fait de la conscience par le sujet du mot produit), seules les unités correspondant alors exactement au mot seraient activées. Enfin, le processus de satiété, à la base des transformations dans ce modèle, serait compensé par une activité parallèle d'imagerie²⁹.

Selon le modèle NST, les transformations verbales peuvent varier en fonction de la densité de voisinage, du statut et de la fréquence lexicale du mot répété. La densité de voisinage correspond au nombre d'entrées lexicales "phonologiquement" proches du stimulus original. Ainsi, dans le modèle NAM de reconnaissance de mot (*Neighborhood Activation Model*³⁰), les voisins lexicaux correspondent à toute entrée lexicale pouvant être générée par le remplacement, l'addition ou la suppression d'un phonème du mot initial, quelle que soit sa position. Du fait des mécanismes de compétition entre unités représentationnelles dans le modèle NST, une densité de voisinage élevée d'un mot devrait augmenter le nombre d'unités lexicales pouvant être potentiellement activées et donc entraîner l'apparition de transformations lexicales plus nombreuses et variées. Yin et MacKay ont confirmé cette prédiction en observant une forte corrélation entre valeur de densité de voisinage des stimuli et nombre de transformations rapportées³¹. Il est à noter que cet effet de compétition lexicale entre candidats potentiels a aussi été observé lors d'expériences impliquant la reconnaissance auditive de mots³² et est également supposé jouer un rôle prépondérant dans un certain nombre de modèles connexionnistes de perception du langage³³. Le statut et la fréquence lexicale du mot répété peuvent aussi influencer le nombre et la nature des transformations observées. Du fait des mécanismes de compétition mis en jeu lors de l'activation d'une unité

²⁸ MacKay *et al.* situent, bien que très brièvement, le processus de satiété dans un cadre évolutionniste, ce processus permettant à un individu de rester en alerte par rapport à tout changement survenant dans son environnement proche.

²⁹ Cette activité d'imagerie serait liée selon les auteurs aux différents concepts sémantiques soutenant la représentation lexicale du mot produit. Il est à noter que cette hypothèse apparaît quelque peu contradictoire avec les résultats de Kaminska, Pool et Mayer ayant démontré un nombre de transformations plus important dans le cas de l'écoute répétée de mots présentant une forte valence d'imagerie. Voir Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). *op. cit.*

³⁰ Luce, P.A., Pisoni, D.B. & Goldinger, S.D. (1990). Similarity neighborhoods of spoken words. In: G.T.M. Altman (Editor), *Cognitive models of speech processing: Psycholinguistic and computational perspectives*. Cambridge, MIT Press: 122-147.

³¹ Yin, C. & MacKay, D.G. (1992). Auditory illusions and aging: Transmission of priming in the verbal transformation paradigm. Paper presented at the *IVth Biennial Cognitive Aging Conference*, Atlanta.

³² Vitevitch, M.S. & Luce, P.A. (1998). When words compete: Levels of processing in perception of spoken words. *Psychological Science*, 9: 325-329 ; Vitevitch, M.S. & Luce, P.A. (1999). Probabilistic phonotactics and neighborhood activation in spoken word recognition. *Journal of Memory and Language*, 40: 374-408 ; Dufour, S. & Peereman, R. (2003). Inhibitory priming effects in auditory word recognition: When the target's competitors conflict with the prime word. *Cognition*, 88: B33-B44.

³³ McClelland, J.L. & Elman, J.L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, 18: 1-86 ; Luce, P.A. & Pisoni, D.B. (1998). Recognizing spoken words: The neighborhood activation model. *Ear and Hearing*, 19: 1-36 ; Norris, D., McQueen, J. & Cutler, A. (2000). Merging information in speech recognition. *Behavioural and Brain Sciences*, 23: 299-370.

représentationnelle, activation dépendant de la valeur d'amorçage des unités, les candidats lexicaux présentant une faible fréquence lexicale devraient être désavantagés par comparaison avec ceux présentant une fréquence lexicale plus importante. De la même façon, le modèle NST prédit une stabilité plus faible pour les pseudo-mots que pour les mots, et pour les pseudo-mots présentant une structure phonologique illégale dans le lexique du sujet par rapport à des pseudo-mots présentant une structure phonologique attestée, ce, du fait d'un nombre de connections plus important pour ces derniers. Les résultats de deux expériences ont permis de rendre compte partiellement de la validité de ces prédictions en montrant que le nombre de formes perçues est moins important pour des mots que pour des pseudo-mots³⁴. Cependant, Shoaf et Pitt ont démontré que cette différence de stabilité perceptive dépendait dans une large mesure de la fréquence à laquelle le stimulus original était perçu durant l'expérience. Pour ces auteurs, la stabilité perceptive serait dépendante d'un mécanisme de récupération (ou de rétablissement), ce mécanisme s'avérant plus important dans le cas de mots que dans celui de pseudo-mots.

Concernant la dynamique des transformations lors l'écoute répétée d'un stimulus langagier, ce mécanisme de récupération apparaît relativement en adéquation avec les résultats précédemment obtenus par Ditzinger, Tuller et Kelso. Ces auteurs ont en effet montré que la principale organisation perceptive des transformations était celle d'un couplage par paire, l'une des deux transformations majoritairement perçues correspondant toujours au stimulus original. Ces auteurs ont de plus montré que cette organisation perceptive entre deux formes majoritaires était liée à la fréquence de leur apparition mais non à leur durée de stabilité perceptive. Ditzinger, Tuller, Haken & Kelso ont alors élaboré un modèle devant rendre compte de ce phénomène de couplage des transformations, basé sur un précédent modèle synergétique d'oscillations perceptives pour des figures ambiguës³⁵.

Ainsi, bien que les mécanismes liés à l'émergence de nouvelles représentations ne peuvent être considérés comme équivalents entre, d'une part, la procédure "classique" consistant en l'écoute d'un stimulus auditif répété en boucle, et, d'autre part, celle liée à la production répétée, ouverte ou interne, d'un même stimulus, l'Effet de Transformation Verbale apparaît cependant adapté aussi bien à l'exploration de l'organisation et du traitement des représentations mnésiques lexicales ou sublexicales (ce, par l'examen des variations de stabilité perceptive lors de l'écoute répétée de stimuli langagiers) qu'à l'étude de contraintes articulo-motrices dans l'analyse et l'émergence des représentations verbales (comme le montre l'incidence du degré d'enactment lors de la production répétée de mots).

³⁴ Natsoulas, T. (1965). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

³⁵ Ditzinger, T., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1997). Temporal patterning in an auditory illusion: The verbal transformation effect. *Biological Cybernetics*, 77: 23-30 ; Ditzinger, T., Tuller, B., Haken, H. & Kelso, J.A.S. (1997). A synergetic model for the verbal transformation effect. *Biological Cybernetics*, 77: 31-40. Dans le cadre de ce rapprochement entre dynamiques des transformations verbales et des figures ambiguës, il est intéressant de noter certaines études portant sur les vitesses d'alternances constatées pour les figures ambiguës et faisant référence à un mécanisme temporel d'identification perceptive. Les changements perceptifs spontanés suggèrent en effet une sollicitation périodique des mécanismes attentionnels (d'une latence approximative de trois secondes) permettant l'ouverture des canaux sensoriels à de nouvelles informations. Dans le cas d'un stimulus ambigu, l'interprétation alternative de celui-ci prendrait alors le contrôle sur les processus de jugement perceptif. Gomez, C., Argandona, E.D., Solier, R.G., Angulo, J.C. & Vazquez, M. (1995). Timing and competition in networks representing ambiguous figures. *Brain and Cognition*, 29: 103-114 ; Pöppel, E. (1997). A hierarchical model of temporal perception. *Trends in Cognitive Science*, 1(2): 56-61 ; Pöppel, E. & Wittmann, R. (1999). Time in the mind. In: Wilson & Keil (Editors), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, Cambridge, MIT Press, pp. 841-843.

- Chapitre II -

Contraintes de Contrôle Articulaire dans l'Effet de Transformation Verbale

Le "représenter" ou le "penser" se distingue de l'"agir" ou de l'"exécuter" surtout en ce qu'il déplace des énergies d'investissement beaucoup moindres et qu'il empêche la liquidation de la dépense principale.

S. Freud³⁶

Motor representations can indeed be observed and described in themselves, due to our strange ability of exploring our own minds and displaying our mental states.

M. Jeannerod³⁷

Introduction

Les études récentes des systèmes cérébraux et cognitifs spécialisés dans l'émergence et le traitement des représentations d'action, ont permis de montrer les liens étroits unissant la représentation mentale d'une action, sa préparation intentionnelle, enfin, son exécution. Des premières données comportementales, soulignant le couplage perceptif entre production et représentation du mouvement, aux travaux récents de neuroimagerie démontrant l'analogie - le réseau neural partiellement commun - entre les activités cérébrales mises en jeu lors de la seule représentation mentale consciente d'une action motrice et le contrôle exécutif de celle-ci, le concept de représentations d'action s'est étendu au-delà de nos propres actions à celui de représentations partagées impliquées dans la communication et l'intersubjectivité³⁸.

Face à cette extension du champ de l'action produite ou observable à l'activité de représentation, et dans le cadre des travaux soulignant les relations entre représentations verbales et systèmes de production et perception de la parole, l'objectif de cette première étude est de montrer l'existence de contraintes purement motrices, liées à l'appareil périphérique articulatoire, dans l'émergence et l'analyse des représentations mentales phonologiques, substrats de la parole intérieure.

Hypothèse d'un Biais d'Asymétrie dans les Transformations Verbales

L'objectif de cette première étude est de tester l'existence de contraintes articulatoires spécifiques sur les transformations verbales, contraintes pouvant intervenir lors de la production répétée d'un stimulus langagier. Dans ce cadre, une question clé, totalement passée sous silence dans les précédentes études, est celle d'éventuelles dissymétries des transformations. A l'origine de cette question est l'impression subjective d'une transformation de "fly" vers "life" beaucoup plus improbable que celle, inverse, de "life" vers "fly". Ce phénomène, s'il s'avère juste, pourrait être dû à l'existence de phasages articulatoires préférentiels, qui permettent d'associer à la structure fricative-liquide-diphthongue /flai/ une cohérence articulatoire³⁹ plus grande qu'à la structure liquide-diphthongue-fricative /laif/. Ainsi, dans le premier cas, le locuteur peut anticiper dans la constriction labiodentale du [f] la constriction linguale du [l] - l'attaque de la syllabe [fl] présentant alors un degré de synchronie important entre les deux gestes consonantiques - et la position antérieure de la langue pour le départ de la diphthongue [ai]. Le locuteur peut alors "lancer" les trois gestes en quasi-synchronie. Dans le second cas, la synchronisation du [l] en attaque et du [f] en coda est bien sûr impossible. Ceci expliquerait la facilitation pour la transformation de "life" vers

³⁶ Freud, S. (1930). *Le mot d'esprit et ses rapports avec l'inconscient*. Paris, Gallimard.

³⁷ Jeannerod, M. (1994). *op. cit.*

³⁸ Pour une revue, voir Jeannerod, M. (1994). *op. cit.* ; Georgieff, N. (2000). *op. cit.* ; Jeannerod, M. (2002). *op. cit.* ; Jeannerod, M. (2003). *op. cit.* ; Jackson P.L. & Decety, J. (2004). Motor cognition: A new paradigm to study self-other interactions. *Current Opinion in Neurobiology*, 14: 259-263.

³⁹ Browman, C.P. & Goldstein, L. (1989). Articulatory gestures as phonological units. *Phonology*, 6: 201-251 ; Browman, C.P. & Goldstein, L. (2000). Competing constraints on intergestural coordination and self-organization of phonological structures. *Bulletin de la Communication Parlée*, 5: 25-34.

"fly" et, de manière plus générale, pour les transformations concernant des séquences de gestes articulatoires allant du moins phasé au plus phasé⁴⁰.

Depuis le travail pionnier de Stetson en 1928⁴¹, de nombreuses études ont démontré l'existence de relations de phases entre gestes articulatoires lors de la production d'unités de parole. Stetson fut le premier à observer un processus spécifique de resegmentation syllabique (*parsing*), reposant sur les propriétés dynamiques des mécanismes articulatoires de la parole, lors de la répétition prolongée et à débit rapide de séquences monosyllabiques (plus spécifiquement, Stetson observa la resyllabification de séquences VC, consonne-voyelle, en séquence CV par un mécanisme de resyllabification de la coda en attaque ; par exemple la resyllabification de /ib/ vers /bi/). Plus récemment, Tuller et Kelso ont répliqué ce phénomène en introduisant le concept de relations de phase entre gestes articulatoires⁴². Lors de la production de syllabes réitérées de forme VC (/ip/), ils montrèrent que les relations entre la fermeture des lèvres et celle de la glotte étaient modifiées à débit croissant jusqu'à ce que la syllabe VC corresponde articulatoirement et perceptivement à une forme syllabique CV (/pi/). Malgré l'observation à débit rapide de cette bascule de /ip/ vers /pi/, la syllabe /pi/ présentait une stabilité articulatoire et perceptive quelle que soit la vitesse de répétition⁴³. Ces résultats concordent avec les propriétés articulatoires distinctes des deux séquences. En effet, la coordination lèvre-glotte apparaît plus phasée pour la séquence /pi/ que pour la séquence /ip/, ces propriétés expliquant ainsi la stabilité de /pi/ et la bascule de /ip/ vers /pi/ par le rephasage des mouvements labiaux et glottiques. Enfin, Gleason, Tuller et Kelso⁴⁴ observèrent un phénomène semblable pour des structures syllabiques plus complexes de type CCV et VCC (soit l'observation d'une bascule à débit rapide de /opt/ vers /top/ par rephasage des geste labiaux et linguaux).

Il est important de noter que cette explication biomécanique de la stabilité des séquences CV, par comparaison avec la syllabe VC, peut être reliée aux tendances de production syllabiques observées durant les périodes de babillage et d'acquisition précoce du lexique chez les jeunes enfants⁴⁵ et apparaît également en accord avec les données typologiques issues de la comparaison des langues du monde, montrant le caractère universel de la syllabe CV⁴⁶. Prises ensemble ces données semblent donc justifier l'existence de la syllabe comme unité linguistique essentielle dans l'organisation de la parole et du langage. Cependant, l'analyse de contraintes articulatoires telles

⁴⁰ Cette hypothèse de phasages articulatoires préférentiels renvoie aux études de phénomènes observés de transition de phase lors de mouvements exécutés, interprétés en termes de couplage inter-articulateurs, et reliés de manière plus générale aux propriétés des systèmes dynamiques : Kelso, J.A.S. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18: 63 ; Haken, H., Kelso, J.A.S. & Bunzt, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51: 347-356.

⁴¹ Pour une revue de ce travail, voir Stetson, R.H. (1951). *op. cit.*

⁴² Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1990). Phase transitions in speech production and their perceptual consequences. In: M. Jeannerod (Editor), *Attention and Performance XIII*, Hillsdale, NJ: Erlbaum, pp. 429-452 ; Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1991). The production and perception of syllable structure. *Journal of Speech and Hearing Research*, 34: 501-508.

⁴³ de Jong et ses collègues en tentant de répliquer ces résultats observèrent la bascule de la séquence /ip/ vers la séquence /bi/. Le geste consonantique [p] lorsqu'il est produit en attaque est en anglais prononcé avec une aspiration, soit [p^h], au contraire du geste [b] présentant le même lieu d'articulation. L'absence d'aspiration lors de la production de la séquence /ip/ serait conservée lors de la resegmentation de la coda en attaque et expliquerait ainsi la correspondance articulatoire et perceptive de la syllabe ainsi formée vers /bi/, et non vers /p^hi/. Voir, de Jong, K.J. (2001). Rate-induced resyllabification revisited. *Language and Speech*, 44: 197-216 ; de Jong, K.J., Nagao, K. & Lim, B.M. (2002). The interaction of syllabification and voicing perception in american english. *ZAS Papers in Linguistics*, 28: 27-38.

⁴⁴ Gleason, P., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1996). Syllable affiliation of consonant clusters undergoes a phase transition over speaking rates. *Proceedings of the 4th International Conference on Spoken Language Processing*, Philadelphia, Vol. 1, pp. 276-278.

⁴⁵ MacNeilage, P.F. (1998). The frame/content theory of evolution of speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, 21: 499-511 ; MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2000). Origin of the internal structure of words. *Science*, 288: 527-531 ; MacNeilage, P.F., Davis, B.L., Matyear, C.M. & Kinney, A. (2000). Origin of speech output complexity in infants and in languages. *Psychological Science*, 310(5): 459-460.

⁴⁶ Jakobson, R. (1966). Implications of language universals for linguistics. In: J.H. Greenberg (Editor), *Universal of language*, MIT Press, Cambridge, pp. 263-278 ; Maddieson, I. (1984). *Patterns of Sounds*. Cambridge University Press, Cambridge ; Vallée, N., Boë, L.J., Maddieson, I. & Rousset, I. (2000). Des lexiques aux syllabes des langues du monde – Typologie et structures. *Actes des XXIIIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, Aussois, pp. 93-96 ; Rousset, I. (2003). From lexical to syllabic organization: Favored and disfavored co-occurrences. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, Barcelona, pp. 715-718.

que définie dans l'étude des relations de phase entre gestes articulatoires pourrait permettre une meilleure définition de sa nature linguistique (phonologique et/ou phonétique) et des niveaux de traitements auxquels elle est associée⁴⁷.

L'Effet de Transformation Verbale apparaît adapté à l'étude de la stabilité des représentations et de la conscience phonologique du locuteur. La première expérience de cette étude a pour objectif de tester l'incidence de contraintes articulatoires spécifiques, liées à la cohérence entre gestes consonantiques et vocaliques de séquences monosyllabiques, dans l'émergence des transformations verbales, par l'analyse des variations possibles de stabilité lors d'une procédure de répétition ouverte. La mise en évidence de dissymétries dans le paradigme des transformations verbales, par l'observation de transformations préférentielles, permettrait ainsi de démontrer l'implication de contraintes purement motrices, liées à l'appareil périphérique articulatoire, dans l'analyse et l'émergence des représentations mentales phonologiques. La seconde expérience a pour but de tester l'existence de telles dissymétries durant une procédure de répétition interne et de permettre ainsi l'étude de liens possibles unissant la représentation mentale d'une action et son exécution.

⁴⁷ Pour une revue récente de la syllabe comme unité phonologique et/ou phonétique, voir Meynadier, Y. (2001). La syllabe phonétique et phonologique : Une introduction. *Travaux Interdisciplinaires du Laboratoire Parole et Langage*, Vol. 20, 91-148.

Sélection du Matériel Phonétique et Mise en Evidence Expérimentale des Phasages Articulatoires

Cette section a pour objectif de présenter une classification basique des stimuli utilisés dans les expériences de transformations verbales, classification liée au degré de cohérence entre gestes articulatoires, et de fournir pour ces séquences des analyses expérimentales en faveur de l'existence de mécanismes dynamiques de phasage inter-articulatoires lors d'une procédure de répétition externe.

Matériel Phonétique

Afin de tester la question de l'existence de phasages articulatoires à l'intérieur de la syllabe et entre ses segments, nous avons choisi d'utiliser dans cette étude des logatomes monosyllabiques. Chacune de ces séquences – soit, /psə/, /səp/, /əps/, /spə/, /pəs/ et /əsp/ - consiste en la combinaison des consonnes bilabiale [p] et coronale⁴⁸ [s] et de la voyelle neutre [ə]. Le choix de la voyelle neutre, offrant une configuration relativement stable de la langue durant la procédure de répétition, permettait de réduire la complexité des patterns de mouvements articulatoires et ainsi de concentrer nos analyses sur l'organisation dans le temps des deux gestes consonantiques.

L'ensemble des analyses présentées ci-dessous ont été extraites de la base de données lexicales de la langue Française VoCoLex⁴⁹ (~105000 mots). Aucune des séquences sélectionnées n'apparaît en Français, ce critère volontaire de sélection devant permettre de minimiser de possibles interférences lexicales lors des tâches de transformations verbales⁵⁰. Il est cependant important de noter que [ə] est généralement produite comme une voyelle antérieure, semi-ouverte et arrondie, rendant sa réalisation articulatoire proche de la voyelle [œ] dont la réalisation est attestée aussi bien dans une syllabe ouverte que dans une syllabe fermée. De plus, les structures des séquences /psV/, /sVp/, /Vps/, /spV/, /pVs/ et /Vsp/ sont toutes phonotactiquement attestées pour un locuteur français. Les valeurs de fréquence lexicale et de densité de voisinage, calculées pour les six séquences, correspondent respectivement au nombre d'entrées lexicales incorporant, quelle que soit sa position dans le mot, une structure syllabique identique à celle de la séquence et au nombre d'entrées lexicales pouvant être générées par le remplacement, l'addition ou la suppression d'un des phonèmes de la séquence⁵¹. Pour ces deux mesures, la somme (*sfu*) et l'intervalle des fréquences d'usage⁵² associées aux entrées lexicales sont indiquées (en nombre d'occurrences par

⁴⁸ Selon le trait distinctif défini par Chomsky et Halle permettant d'opposer parmi les consonnes antérieures, les dentales et alvéolaires [+ coronales] aux consonnes labiales et palatales [- coronales]. Chomsky, N. & Halle, M. (1968). *The Sound Pattern of English*. New York, Harper & Row. Pour un aperçu des systèmes de traits distinctifs, voir : Duchet, J.-L. (1981). *La Phonologie*. Paris, Presses Universitaires de France.

⁴⁹ Dufour, S., Peereman, R., Pallier, C. & Radeau, M. (2002). VoCoLex: A lexical database on phonological similarity between French words. *L'Année Psychologique*, 102: 725-746.

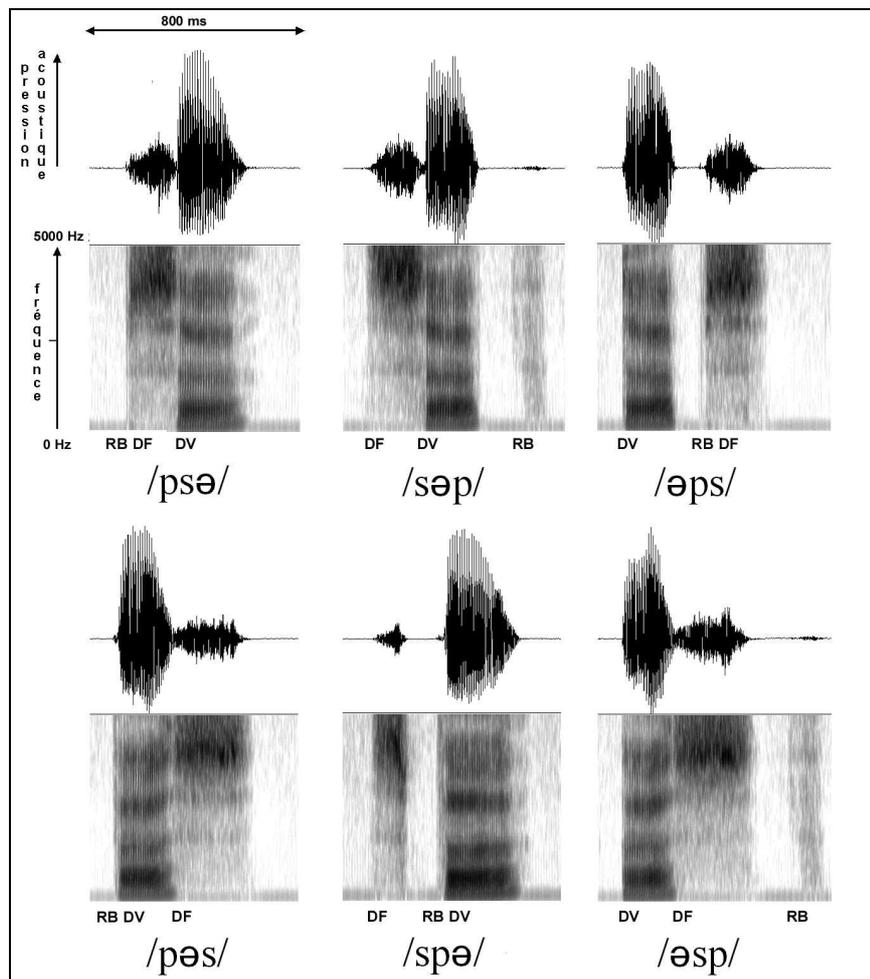
⁵⁰ Natsoulas, T. (1965). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

⁵¹ Luce, P.A., Pisoni, D.B. & Goldinger, S.D. (1990). *op. cit.*

⁵² Les valeurs fréquentielles incorporées dans Vocolex sont extraites de la base de données lexicale du Français écrit, Frantext (Laboratoire "Analyse et Traitement de la Langue Française", Université de Nancy). Sur les différences

million). La valeur de fréquence lexicale est de 114 pour /psV/ (*sfu*: 81, intervalle: 0-13), de 371 pour /sVp/ (*sfu*: 812, intervalle: 0-92), de 131 pour /Vps/ (*sfu*: 170, intervalle: 0-118), de 674 pour /spV/ (*sfu*: 1248, intervalle: 0-119), de 1379 pour /pVs/ (*sfu*: 10676, intervalle: 0-6372) et de 598 pour /Vsp/ (*sfu*: 1539, intervalle: 0-229). La valeur de densité de voisinage est de 31 pour /psV/ (*sfu*: 11357, intervalle: 0-5031), de 59 pour /sVp/ (*sfu*: 20310, intervalle: 0-5031), de 34 pour /Vps/ (*sfu*: 3206, intervalle: 0-2096), de 19 pour /spV/ (*sfu*: 10160, intervalle: 0-5031), de 118 pour /pVs/ (*sfu*: 54538, intervalle: 0-16011) et de 14 pour /Vsp/ (*sfu*: 9320, intervalle: 0-8743).

Figure 3 : Organisation temporelle des événements acoustiques des séquences /psə/, /səp/, /əps/, /spə/, /pəs/ et /əsp/. DF : Départ de la friction pour [s], DV : Début du voisement pour [ə], RB: Relâchement de l'occlusion bilabiale pour [p]. Pour chacune des séquences, le signal acoustique est présenté conjointement avec le spectrogramme correspondant (représentations des temps en abscisse et fréquences acoustiques en ordonnée).



La Figure 3 présente l'organisation temporelle des événements acoustiques des séquences sélectionnées. Chacune de ces séquences peut être définie selon trois événements acoustiques basiques (voir la Figure 4 pour une représentation schématique des cavités supraglottiques et du pharynx) :

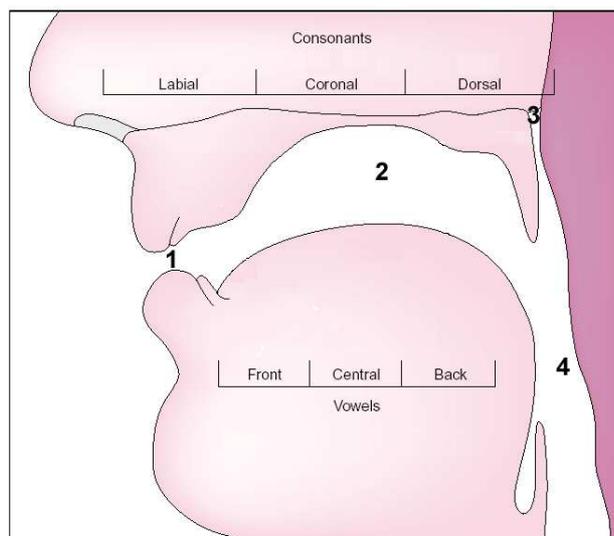
- Le départ de la friction pour [s], caractérisé articulatoirement par un mouvement d'élévation de la position antérieure de la langue vers les alvéoles (partie saillante du palais se trouvant

fréquentielles possibles entre écrit et oral, bien que non établies en Français, des études réalisées sur des lexiques anglais ont montré une corrélation forte entre ces deux mesures. Voir Dufour, S., Peereman, R., Pallier, C. & Radeau, M. (2002). *op. cit.*

juste derrière les dents de la mâchoire supérieure) produisant le rétrécissement de la cavité buccale en une forme semi-arrondie (position des lèvres neutre et dos de la langue abaissée).

- Le début du voisement pour [ə].
- La phase de relâchement de l'air comprimé dans la cavité buccale au moment de l'ouverture de l'occlusion bilabiale (correspondant à l'arrêt momentané du passage de l'air par la fermeture des lèvres et de la glotte) pour la réalisation du [p].

Figure 4 : Vue schématique des principaux lieux d'articulation et résonateurs de l'appareil phonatoire (1 : Cavité labiale ; 2 : Cavité buccale ; 3 : Fosses nasales ; 4 : Pharynx). Repris de MacNeilage & Davis (2001).



Si lors de la réalisation de la séquence /səp/, ces trois événements sont clairement distincts, la synchronisation partielle des gestes articulatoires d'ouverture des lèvres pour [p] et du placement de la position antérieure de la langue pour [s] entraîne le regroupement partiel des deux événements acoustiques correspondants lors de la production de la séquence /psə/. Pour /əps/, ce regroupement reste présent mais n'apparaît que bien après la phase de voisement de la voyelle [ə], phase elle-même suivie de l'occlusion nécessaire des lèvres pour la réalisation de la bilabiale. Pour /spə/ et /pəs/, la phase de relâchement au moment de l'ouverture de l'occlusion bilabiale n'est rendue possible qu'après la fermeture des lèvres, bien après le début de friction du [s]. Ainsi, le début de la friction et la phase de relâchement ne peuvent se regrouper, même partiellement. Enfin, ces deux événements n'apparaissent qu'après la phase de voisement de la voyelle pour la séquence /əsp/.

Hypothèses de Transformations Préférentielles

Face aux mécanismes de resegmentation pouvant apparaître lors de la répétition des stimuli⁵³, les six séquences ont été regroupées en deux groupes distincts.

- Groupe 1 : les séquences /psə/, /səp/, /əps/.
- Groupe 2 : les séquences /spə/, /pəs/, /əsp/.

Autrement dit, nous prédisons que nos sujets, lors de la présentation d'une séquence donnée dans les expériences de transformations verbales, ne se livreront pas à toutes les permutations

⁵³ Pour une revue des théories de resyllabification, voir Goslin, J. & Frauenfelder, U.H. (2000). A comparison of theoretical and human syllabification. *Language and Speech*, 44(4): 409-436.

possibles mais seront naturellement amenés à "lire mentalement" le résultat de leur répétition selon une procédure de "parsing glissant" au sein du groupe correspondant⁵⁴. Par exemple, la répétition de la séquence /psə/ pourrait entraîner le repositionnement perceptif de la frontière inter-syllabique après [p] ou [s] (correspondant respectivement à la stabilité de la séquence ou à une resegmentation vers /səp/ ou vers /əps/).

Table 2 : Classification des séquences sélectionnées en fonction de leur degré de phasage respectif et hypothèses de transformations préférentielles.

Séquence	Phasage	Prédiction
/psə/	Complet – Phasage de l'attaque et de la voyelle, phasage des consonnes en attaque	/psə/
/səp/	Moyen – Phasage de l'attaque et de la voyelle, déphasage de la coda	/psə/
/əps/	Faible – Déphasage de la voyelle et des consonnes, phasage des consonnes dans la coda	/psə/
/pəs/	Moyen – Phasage de la consonne en attaque et de la voyelle, déphasage de la coda	/pəs/ - /spə/
/spə/	Moyen – Phasage de l'attaque et de la voyelle, déphasage des consonnes en attaque	/pəs/ - /spə/
/əsp/	Très faible – Déphasage de la voyelle et des consonnes, déphasage des consonnes dans la coda	/pəs/ - /spə/

La Table 2 montre notre classification des six séquences selon leur degré de phasage respectif : soit le degré de cohérence articulatoire entre gestes consonantiques et vocaliques. Cette classification est basée sur un raisonnement simple pouvant être décrit en termes de relations de phases entre gestes articulatoires de l'attaque, du noyau vocalique, et de la coda de la syllabe répétée. Nous considérons tout d'abord la possibilité de synchroniser le(s) geste(s) articulatoire(s) consonantique(s) en attaque avec le geste articulatoire du noyau vocalique, ce, par des mécanismes classiques de coarticulation consonne-voyelle⁵⁵. En revanche, la synchronisation entre gestes du noyau vocalique et de la coda est selon nous impossible, du fait du temps séparant leur réalisation articulatoire. D'autre part, le phasage entre gestes consonantiques de la structure bilabiale-coronale /ps/, présente soit en attaque soit en coda, serait selon nous du à la possibilité d'anticiper la position de la langue, nécessaire à la réalisation du [s], lors de l'ouverture de l'occlusion bilabiale pour [p]. Enfin, la structure coronale-bilabiale /sp/ devrait présenter un degré de phasage faible entre gestes consonantiques, du fait de l'ouverture maintenue des lèvres durant la réalisation de [s], maintien nécessaire à son audibilité, et de la fermeture et réouverture indispensable de celles-ci pour la réalisation du [p]. Nous considérons le degré de phasage, ainsi établi pour les six stimuli, comme le facteur principal déterminant la transformation ou la stabilité d'une séquence lors de la procédure de répétition. Plus ce degré de phasage est important et plus la séquence devrait être stable. Inversement, plus ce degré de phasage est faible et plus la transformation vers une séquence mieux phasée devrait être obtenue.

Mise en Evidence Expérimentale de l'Existence de Mécanismes Dynamiques de Phasage Inter-Articulatoires

De manière à mettre en évidence l'existence de telles relations de phase entre gestes articulatoires, nous avons conduit une première expérience pilote consistant en la production ouverte et répétée des séquences sélectionnées.

⁵⁴ Pour une discussion sur les résultats obtenus face aux théories phonologiques et données psycholinguistiques de resyllabification, voir la partie "Contre-Hypothèses Lexicales et Phonologiques".

⁵⁵ Öhman, S.E.G. (1967). Numerical model of coarticulation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 41: 310-320.

La mise en boucle des séquences devrait entraîner la réorganisation suivante des événements articulatoires :

- La composante supraglottique de la voyelle neutre [ə] est selon nous caractérisée par une configuration relativement stable de la langue à l'intérieur du tract vocal durant la procédure de répétition. La réalisation de la composante glottale de cette voyelle serait elle aérodynamiquement dépendante de l'abaissement de la langue à la fin du [s] pour les séquences du Groupe 1 et de l'ouverture des lèvres nécessaire à la réalisation du [p] pour les séquences du Groupe 2. Ainsi, lors de la répétition rapide des séquences, /əps/ et /əsp/ ne devraient plus être distinguables, en termes d'événements acoustiques, de la séquence /psə/ dans le Groupe 1 et de la séquence /spə/ dans le Groupe 2, respectivement.
- Comme décrit précédemment, les réalisations articulatoires de [p] et de [s] ne peuvent être synchronisées lors de la répétition des séquences /spə/ et /pəs/ du Groupe 2. Par conséquent, nous n'avons pas fait de prédictions de stabilité et de transformation préférentielle distinctes pour ces deux séquences.
- Par contre, une question importante est de savoir si la répétition de /səp/ peut entraîner un mécanisme de resynchronisation des gestes consonantiques d'ouverture labiale et d'élévation linguale en attaque de la syllabe. Dans ce cas, la séquence présenterait alors un degré de cohérence articulatoire des gestes consonantiques identique à celui de la séquence /psə/, résultant ainsi en une resegmentation de /səp/ vers /psə/.

Procédure

De manière à tester ces hypothèses, nous avons donc procédé à des enregistrements audio-visuels des séquences /psə/, /səp/, /spə/ et /pəs/. Cette procédure d'acquisition a été choisie de manière à pouvoir mesurer le moment d'ouverture de l'occlusion bilabiale de [p] même lors d'une réalisation implosive, un phénomène se traduisant par l'absence de relâchement audible, rendant impossible la détection de cet événement sur le seul signal acoustique. Nous avons utilisé la technique d'acquisition audio-vidéo mise en place à l'Institut de la Communication Parlée⁵⁶, consistant en un enregistrement synchrone, effectué dans une chambre sourde, des deux signaux lors de la production des séquences. L'utilisation du maquillage des lèvres en bleu lors de cette acquisition permet de mesurer - par une technique de chroma-key filtrant les composantes bleues présentes dans l'image - le degré d'aperture, de protrusion et l'aire aux lèvres du locuteur (avec une précision spatiale de 1 mm et une précision temporelle de 20 ms - voir la Figure 5).

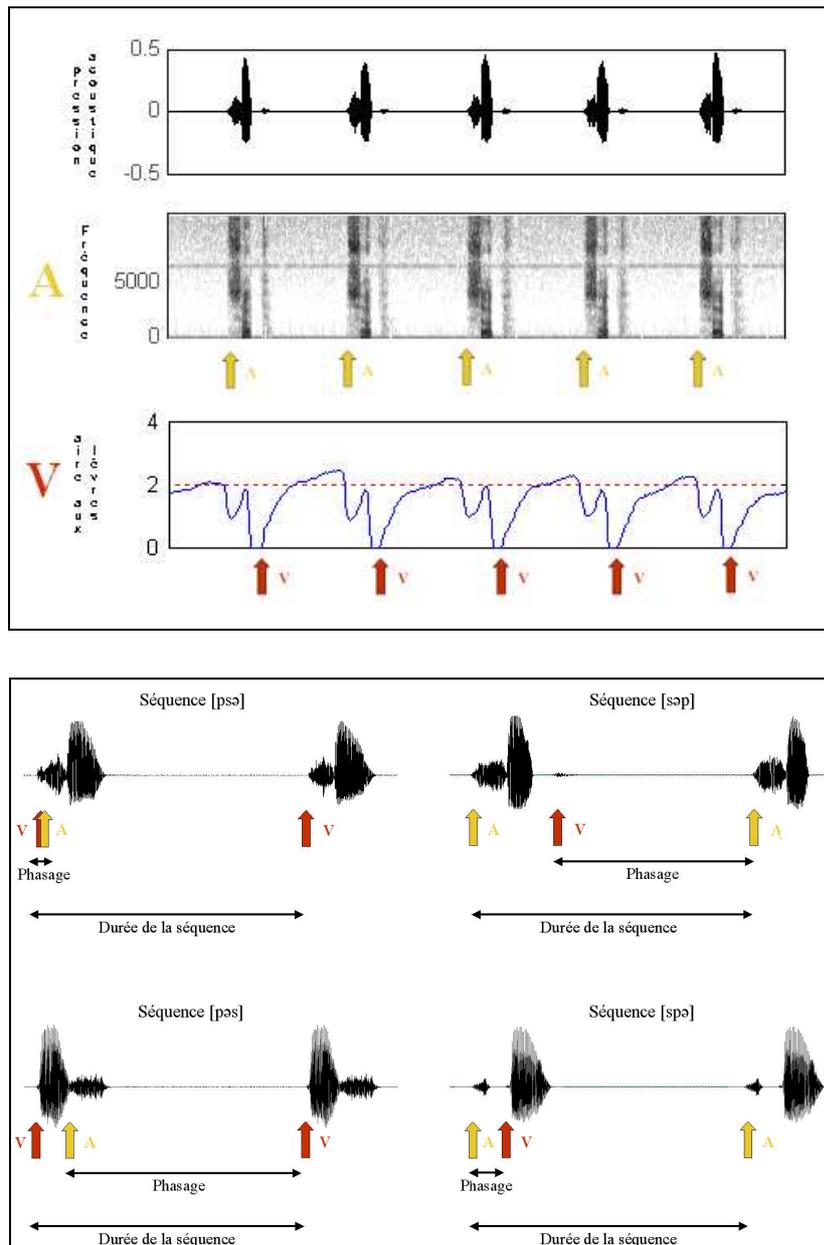
Figure 5 : Procédure d'acquisition des images vidéos par l'intermédiaire de 2 caméras face et profil. L'utilisation du maquillage des lèvres permet l'analyse et extraction des contours labiaux nécessaire aux mesures du degré d'aperture, de protrusion et de l'aire aux lèvres du locuteur.



⁵⁶ Lallouache, M.T. (1990). Un poste 'visage-parole'. Acquisition et traitement de contours labiaux. *Actes des XVIIIèmes Journées d'Études sur la Parole*, Montréal, pp. 282-286.

Les quatre séquences furent individuellement enregistrées par un locuteur de langue maternelle Française (Jean-Luc Schwartz) dans une chambre sourde selon deux procédures de répétition distinctes. La première procédure consistait en une accélération progressive de la vitesse de répétition des séquences, d'un débit faible (environ 1 cycle par seconde) vers un débit rapide (environ 6 cycles par seconde). La seconde procédure consistait en une répétition à débit constant des séquences selon deux vitesses distinctes, la première à débit faible (environ 1 cycle par seconde), la deuxième à débit moyen (environ 2 cycles par seconde).

Figure 6 : Haut. Exemple de décours temporel de l'aire aux lèvres lors de la production de la séquence /səp/ à débit fixe. Bas. Représentation schématique des index de phasage entre gestes d'ouverture bilabiale (V : Etiquetage vidéo) et de friction (A : Etiquetage audio).



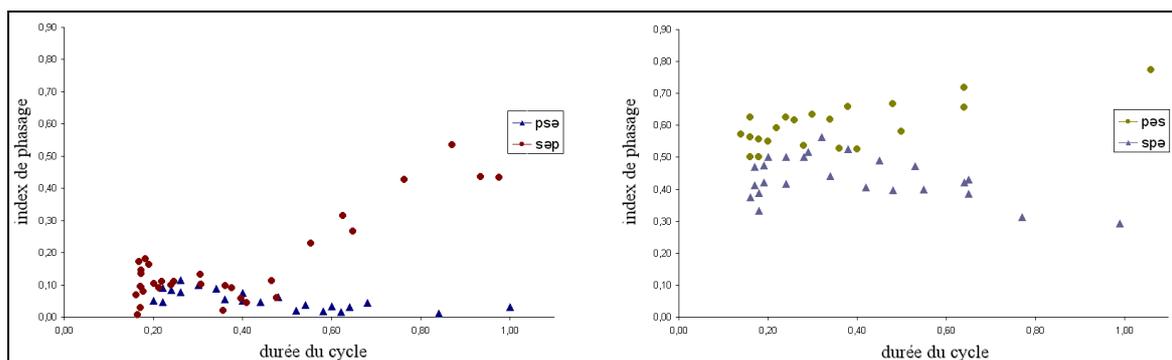
Les stimuli furent analysés de la manière suivante. Les événements correspondant au départ de la friction pour [s] furent détectés sur les enregistrements audio, par l'analyse du spectrogramme des signaux acoustiques et l'étiquetage du début du bruit haute-fréquence caractéristique de la réalisation articulaire de la friction. Les événements relatifs à l'ouverture de l'occlusion bilabiale

pour [p] furent localisés sur les enregistrements vidéos, par l'analyse des variations de l'aire aux lèvres et par la localisation de la première image présentant une aire aux lèvres non-nulle après la période d'occlusion bilabiale⁵⁷. La mesure relative au temps séparant les deux gestes articulatoires d'ouverture bilabiale et de friction, divisé par la durée de la séquence (soit le temps séparant deux gestes successifs d'occlusion bilabiale, pour les séquences /psə/ et /pəs/, ou deux gestes successifs de friction, pour les séquences /səp/ et /spə/), fut choisie comme index de cohérence articulatoire des séquences (voir la Figure 6).

Résultats

Les variations des index de phasage des séquences durant les conditions de répétition accélérée et de répétition à vitesses constantes sont représentées respectivement sur les Figures 7 et 8. Durant la condition de répétition accélérée, l'index de phasage pour la séquence /psə/ reste stable et autour de zéro quel que soit le débit du locuteur : L'ouverture labiale pour [p] et le début du bruit de friction haute fréquence pour [s] sont synchronisés. La valeur de l'index de phasage pour la séquence /səp/ est d'environ .50 à vitesse de répétition lente (autour d'un cycle par seconde) et décroît brutalement vers zéro à partir d'un débit moyen d'environ deux cycles par seconde. Des valeurs similaires des index pour ces deux séquences sont observées lors de la condition de répétition à vitesses constantes. Quel que soit le débit du locuteur (lent ou moyen), la valeur de l'index de phasage est stable et autour de zéro pour la séquence /psə/ (moyenne = 0.02, écart-type= 0.01 à débit lent - moyenne = 0.03, écart-type = 0.01 à débit moyen). Pour la séquence /səp/, la valeur de l'index de phasage est d'environ .40-.50 à débit lent (moyenne = 0.43, écart-type = 0.02) et d'environ .10-.20 à débit moyen (moyenne = 0.15, écart-type= 0.06). Une analyse à deux facteurs de la variance (ANOVA) des valeurs d'index, avec le type de séquence (/psə/, /səp/) et le type de débit (lent, moyen) désignés comme variables indépendantes, montre une différence significative entre les deux séquences [$F(1,32) = 620.79$, $MSe = 0.65$, $p < .001$], une différence significative entre les deux débits [$F(1,32) = 159.76$, $MSe = 0.17$, $p < .001$], et une interaction significative entre les deux variables [$F(1,32) = 186.32$, $MSe = 0.19$, $p < .001$].

Figure 7 : Variations de l'index de phasage des séquences en fonction de la durée du cycle (en ms) durant la condition de répétition accélérée.

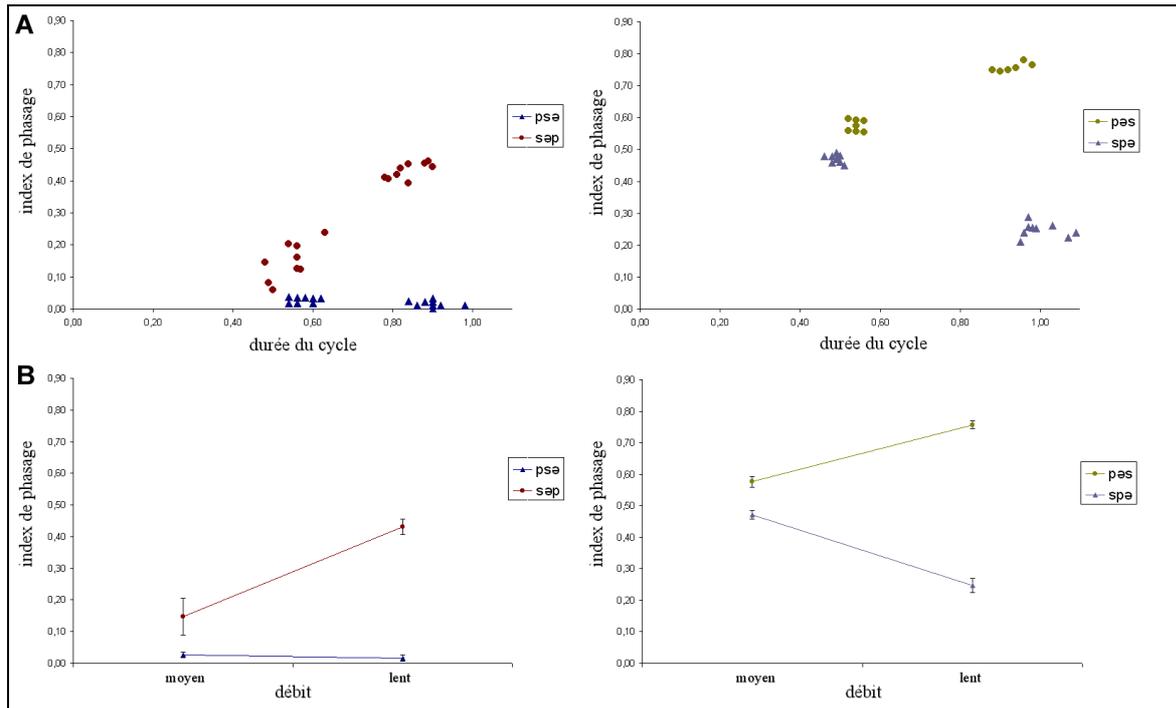


Durant la condition de répétition accélérée, un rapprochement progressif autour de .50 des valeurs des index de phasage pour les séquences /pəs/ et /spə/ est observé à partir d'un débit d'environ deux cycles par seconde. Lors la condition de répétition maintenue à débit lent, la valeur de l'index de phasage est d'environ .70-.80 pour la séquence /pəs/ (moyenne = 0.76, écart-type = 0.01) et d'environ .20-.30 pour la séquence /spə/ (moyenne = 0.25, écart-type= 0.02). A débit moyen, une valeur d'index d'environ .45-.60 est observée pour les deux séquences (moyenne =

⁵⁷ Ces deux types d'analyses furent effectuées respectivement via les logiciels Praat (Institute of Phonetic Sciences, University of Amsterdam) et Trap (Institut de la Communication Parlée, INPG / Université Stendhal).

0.58, écart-type= 0.02 pour /pəs/ - moyenne = 0.47, écart-type = 0.01 pour /spə/). Une analyse ANOVA à deux facteurs des valeurs d'index, avec le type de séquence (/pəs/, /spə/) et le type de débit (lent, moyen) désignés comme variables indépendantes, montre une différence significative entre les deux séquences [$F(1,32) = 3046.85$, $MSe = 0.85$, $p < .001$], une différence significative entre les deux débits [$F(1,32) = 14.97$, $MSe = 0.00$, $p < .001$], et une interaction significative entre les deux variables [$F(1,32) = 1328.84$, $MSe = 0.37$, $p < .001$].

Figure 8 : A - Variations de l'index de phasage des séquences en fonction de la durée du cycle (en ms) durant la condition de répétition maintenue à vitesses constantes (débit lent : environ 1 cycle par seconde, débit moyen : environ 2 cycles par seconde). B - Représentations des différences entre moyennes des index de phasage (avec indication des écarts-types).



Ainsi, lors d'une vitesse de répétition lente, les deux gestes articulatoires consonantiques apparaissent phasés pour la séquence /psə/ et non pour la séquence /səp/, alors qu'à partir d'une vitesse de répétition d'environ 2 cycles par seconde on observe le phasage de ces deux gestes pour /səp/. Ce résultat semble donc valider la stabilité prédite de la séquence /psə/ et son rôle potentiel d'attracteur lors de la répétition de la séquence /səp/. Quelle que soit la vitesse de répétition, les deux gestes articulatoires consonantiques restent déphasés pour les séquences /pəs/ et /spə/. Cependant, les deux séquences présentent un degré de phasage proche à partir d'une vitesse de répétition d'environ deux cycles par seconde, ce résultat confirmant la difficulté à établir une distinction de ces deux séquences en termes d'événements acoustiques. Pris ensemble, ces résultats apportent donc des arguments expérimentaux en faveur de notre classification des séquences, classification basée sur le degré de cohérence articulatoire entre les gestes consonantiques d'ouverture bilabiale et de friction.

Expérience de Transformation Verbale : Procédure de Répétition Ouverte

La section précédente présentait des arguments expérimentaux en faveur de l'existence de contraintes de contrôle articulatoire, soit les relations de phasage entre gestes d'occlusion bilabiale et de friction, lors de la répétition de séquences monosyllabiques. L'objectif de l'expérience présente était de tester l'incidence de tels mécanismes dynamiques articulatoires dans l'analyse et l'émergence des transformations verbales, par l'examen des variations de stabilité et d'attraction de ces séquences. Comme démontré par Reisberg et ses collègues, le processus de reconstruction perceptive d'une séquence répétée dépend du degré d'enactment du locuteur⁵⁸, nous avons donc choisi d'utiliser dans cette première expérience une procédure de répétition ouverte, plus favorable à l'émergence de transformations.

Méthode Expérimentale

Sujets

Cinquante six étudiants de l'Université Stendhal de Grenoble participèrent à l'expérience. Les sujets, tous francophones et ne présentant pas de troubles auditifs ou articulatoires manifestes⁵⁹, se présentèrent individuellement au test sans avoir été au préalable renseignés sur l'expérience.

Procédure

Il était dans un premier temps demandé au sujet d'écouter attentivement la répétition du mot "life", produite à haute voix par l'examineur à une vitesse approximative de 2 répétitions par seconde, et de détecter tout changement perceptif de ce mot. L'examineur demandait ensuite au sujet si celui-ci avait perçu une autre séquence et, le cas échéant, lui indiquait la possibilité d'entendre le mot "fly". Cet exemple avait pour but de fournir une brève description de l'Effet de Transformation Verbale et de donner une estimation de la vitesse de répétition attendue lors de la procédure expérimentale. La consigne alors indiquée au sujet consistait à répéter à haute voix chacune des séquences données, à la même vitesse que l'examineur, sans interruption ni pause entre les répétitions. Si le sujet percevait une transformation, il devait s'arrêter et la signaler. Dans le cas contraire, l'examineur l'arrêtait au bout d'une quinzaine de secondes. Il était enfin indiqué que les changements perceptifs pouvant survenir lors de la répétition d'une séquence pouvaient être subtils ou très importants et correspondre aussi bien à des mots qu'à des pseudo-mots. Bien entendu, il ne fut proposé aucune indication quant aux transformations envisagées⁶⁰.

Durant l'expérience, les six séquences - /psə/, /səp/, /əps/, /spə/, /pəs/ et /əsp/ - étaient présentées oralement par l'examineur⁶¹. Les six ordres de présentation sélectionnés consistaient

⁵⁸ Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.* ; Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). *op. cit.*

⁵⁹ Un questionnaire fut mené en ce sens auprès des participants ; Ceux-ci déclarèrent ne pas être, ou avoir été, sujet à des troubles de perception et/ou de production de la parole.

⁶⁰ Cette procédure expérimentale est en tout point similaire à celle utilisée par Reisberg et ses collègues.

⁶¹ Il est à noter que les six séquences furent présentées oralement par l'examineur selon une procédure de production unique (i.e., non répétée). Cette procédure devait permettre de minimiser l'incidence des informations visuelles perçues par le sujet (notamment sur la dynamique des geste articulatoires) lors de sa propre production répétée des séquences.

toutes en l'alternance des séquences d'un groupe vers l'autre, excluant la présentation successive de deux séquences présentant une attaque consonantique ou vocalique similaire (e.g., /psə/, /spə/, /əsp/, /pəs/, /səp/ et /əsp/). Relativement à ces six ordres, chaque séquence apparaissait une fois en première position dans la liste, une fois en seconde position, etc... Enfin, l'ordre des séquences était contrebalancé entre les sujets. Dans le cas d'une prononciation erronée de la séquence, d'une pause prolongée lors de la répétition, d'une accélération ou diminution du débit ou d'un arrêt de la répétition sans report d'une transformation avant la fin de la période critique de 15 secondes, l'examineur demandait au sujet de recommencer la répétition de la séquence. La durée totale de l'expérience était d'approximativement 6 minutes, des temps de repos étaient offerts après chaque séquence. Les transformations et stabilités observées des séquences furent consignées par l'examineur et les productions des sujets enregistrées sur bande magnétique. Les enregistrements des répétitions furent ensuite transférés sous format numérique à une fréquence d'échantillonnage de 22.05 kHz (codage sur 16 bits).

Résultats

La Table 3A présente les fréquences de transformations et stabilités observées pour les cinquante six sujets : Les fréquences de transformation sont représentées en colonnes, les fréquences de stabilité correspondant à la première diagonale.

Table 3 : Expérience de transformation verbale, procédure de répétition ouverte – (A) Fréquence des transformations et stabilités observées des séquences (N = 56, "div." : Autres transformations – Les fréquences de stabilité des séquences sont représentées en gras). (B) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 1. (C) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 2.

(A)

Séquence	⇒ /psə/	⇒ /səp/	⇒ /əps/	⇒ /pəs/	⇒ /spə/	⇒ /əsp/	⇒ div.
/psə/	.75	.18			.02		.05
/səp/	.50	.30	.02				.18
/əps/	.29		.64				.07
/pəs/				.41	.43		.16
/spə/	.04			.46	.39		.11
/əsp/	.07		.04	.20	.05	.55	.09

(B)

Séquence	Stabilité	Attractivité
/psə/	.75	.75
/səp/	.30	.29
/əps/	.64	.02

(C)

Séquence	Stabilité	Attractivité
/pəs/	.41	.63
/spə/	.39	.47
/əsp/	.55	.00

Nous pouvons émettre les commentaires suivants sur les transformations observées. Pour le Groupe 1, la séquence /psə/, supposée très stable, n'entraîne pour 75% des sujets aucune transformation, 18% percevant une transformation vers /səp/ et aucun vers /əps/. En revanche, les

séquences /səp/ et /əps/ sont transformées vers /psə/ pour respectivement 50% et 29% des sujets. De plus, les transformations de /səp/ vers /əps/ et de /əps/ vers /səp/ sont quasi-inexistantes (2% et 0%). Pour ce groupe, le résultat inattendu est le maintien de la séquence /əps/ pour 64% des participants. Pour le Groupe 2, les séquences /pəs/ et /spə/, supposées moyennement stables, entraînent des transformations réciproques pour respectivement 46% et 43% des sujets ; ces séquences restant stables pour 39% et 41% des participants. La séquence /əsp/ se transforme vers /pəs/ pour 20% des sujets et vers /spə/ pour 5%, les transformations inverses n'existant pas. Enfin, comme pour la séquence /əps/ du groupe 1, /əsp/ se maintient de façon inattendue pour 55% des sujets.

Procédure de parsing glissant

Les transformations observées d'un groupe vers l'autre sont extrêmement faibles : Représentant en moyenne moins de 1% des résultats observés pour le Groupe 1 et 5% pour le Groupe 2. La colonne "div." représente le pourcentage de transformations non-envisagées. La majorité de ces transformations étaient d'ordre lexical (4% du total des réponses ; Par exemple : "ce", /sœ/, pour la séquence /psə/, "ça se peut", /saspə/, pour la séquence /spə/) ou correspondaient à un pseudo-mot de longueur segmentale supérieure (6% du total des réponses ; Par exemple /psəp/ pour la séquence /səp/). Le nombre de ces transformations (en moyenne 11%), bien que non négligeable, reste cependant faible en regard de la non-information des sujets face aux transformations attendues. Ainsi, l'essentiel des réponses rapportées s'est effectué au sein de chaque groupe (86% des réponses en moyenne) : Ce résultat confirme ainsi la réalisation d'une procédure de parsing glissant lors de la recherche de transformation.

Stabilités et transformations préférentielles

Les analyses statistiques globales des résultats montrent des différences significatives de réponses des sujets entre les séquences (effet stimulus : $\chi^2(5) = 32.10$, $p < .0005$) mais pas de différences significatives en fonction de l'ordre de présentation des stimuli (effet d'ordre : $\chi^2(5) = 4.39$, p supérieur à .05, choisi comme seuil statistique critique).

Du fait de la procédure de parsing glissant observée, les analyses statistiques suivantes ont été effectuées séparément pour les deux groupes. Nous avons testé les différences possibles entre séquences du même groupe selon deux mesures distinctes correspondant aux degrés de stabilité et d'attractivité des séquences. En effet, outre la mesure de stabilité d'une séquence (représentée par le nombre de sujets n'ayant pas rapporté de transformation), une manière indirecte de tester la cohérence articulatoire d'une séquence est de déterminer sa capacité à "attirer", ou encore "capturer", les séquences du même groupe durant le processus de répétition. Pour une séquence donnée, ce degré d'attractivité est représenté par le nombre de transformations observées vers celle-ci pour les séquences du même groupe, divisé par le nombre total de transformations observé pour ces séquences (voir Tables 3B & 3C).

A l'intérieur du Groupe 1, la comparaison globale des stabilités observées montre une différence significative entre les séquences (effet de stabilité : $\chi^2(2) = 24.76$, $p < .0001$). Les analyses individuelles de stabilité entre séquences, une fois une correction de Bonferroni⁶² appliquée, montre une différence significative entre /psə/ et /səp/ ($\chi^2(1) = 22.39$) et entre /səp/ et /əps/ ($\chi^2(1) = 12.93$). La comparaison du degré d'attractivité des séquences montre une différence globale significative (effet d'attractivité : $\chi^2(2) = 64.12$, $p < .0001$) et des différences individuelles significatives entre /psə/ et /səp/ ($\chi^2(1) = 18.07$), entre /psə/ et /əps/ ($\chi^2(1) = 61.38$) et entre /səp/ et /əps/ ($\chi^2(1) = 14.21$). En résumé, pour les séquences du Groupe 1, /psə/ et /əps/ présentent une stabilité supérieure à celle de /səp/ ; /psə/ est la séquence la plus attractive, /səp/ montrant une

⁶² Une correction de Bonferroni, bien que non-indiquée dans la suite du texte, a été appliquée systématiquement pour les comparaisons individuelles de stabilité et d'attractivité.

attractivité supérieure à /əps/. A l'intérieur du Groupe 2, la comparaison globale des stabilités observées ne montre pas de différence significative entre les séquences (effet de stabilité : $\chi^2(2) = 3.51$, N.S.). La comparaison du degré d'attractivité des séquences montre une différence globale significative (effet d'attractivité : $\chi^2(2) = 59.57$, $p < .0001$) ainsi que des différences individuelles significatives entre /pəs/ et /əsp/ ($\chi^2(1) = 59.49$) et entre /spə/ et /əsp/ ($\chi^2(1) = 39.78$). En résumé, les séquences du Groupe 2 ne montrent pas de différences en termes de stabilité ; en revanche, une plus forte attractivité des séquences /pəs/ et /spə/ est observée par rapport à la séquence /əsp/.

Analyses temporelles

Comme aucun dispositif de contrôle du débit des sujets n'était utilisé durant l'expérience, ce, de manière à rendre la production des séquences la plus naturelle possible, la vitesse de répétition des sujets fut analysée ultérieurement. La Table 4 présente la durée moyenne de production de chaque séquence calculée sur les 5 premières et 5 dernières répétitions des enregistrements⁶³. La durée moyenne globale de répétition pour les six séquences est de 0.42 s. (intervalle: 0.38 – 0.49 s.). La comparaison globale des résultats entre le début et la fin du processus de répétition montre une légère augmentation du cycle (diminution du débit des sujets, en moyenne: +0.02 s. par répétition, intervalle: +0.01 – +0.04 s.), cet effet étant dû en grande partie aux différences observées pour les séquences /əps/ et /əsp/. Ces résultats confirment donc l'absence de tout mécanisme d'accélération durant la production répétée des séquences. L'analyse des enregistrements permettent de plus d'écarter le temps moyen de transformation d'une séquence comme indice indirect de stabilité (on pourrait en effet supposer que plus une séquence présente un degré de stabilité fort, plus la durée de transformation de cette séquence devrait être important). Les durées totales de répétition des séquences transformées présentent une grande variabilité inter-locuteurs et ne peuvent donc être facilement interprétées en regard des fréquences de stabilité et d'attractivité observées (temps moyen de transformations : /psə/: 7.25 s., ET= 2.93 - /səp/: 8.54 s., ET = 6.65 - /əps/: 5.85 s., ET = 2.38 - /pəs/: 8.07 s., ET = 5.00 - /spə/: 6.27 s., ET = 1.91 - /əsp/: 6.43 s., ET = 3.96).

Table 4 : Durée moyennes de production de chacune des séquences, extraite en début et fin d'enregistrements (M : Moyenne, ET : Ecart-type). Procédure de répétition ouverte.

Séquence	Durée de Cycle (en secondes)			
	Début		Fin	
	M	ET	M	ET
/psə/	0.37	0.07	0.38	0.07
/səp/	0.38	0.09	0.39	0.08
/əps/	0.41	0.07	0.45	0.08
/pəs/	0.40	0.08	0.41	0.08
/spə/	0.41	0.09	0.42	0.08
/əsp/	0.47	0.08	0.51	0.09

Test d'un effet d'attaque glottique

Bien que non-attractives, les syllabes à attaque vocalique /əps/ et /əsp/, pourtant prédites comme très instables, n'ont pas entraîné de transformation pour respectivement 64% et 55% des sujets. Cette stabilité des séquences pourrait s'expliquer par la présence d'un coup de glotte produit en attaque de la syllabe par les participants. La réalisation de ce coup de glotte peut être considérée

⁶³ Les procédures d'étiquetage du signal acoustique et d'extraction des durées de cycle ont été réalisées à l'aide du logiciel Praat (Institute of Phonetic Sciences, University of Amsterdam).

comme un geste consonantique additionnel, transformant de fait les syllabes VCC, /əps/ et /əsp/, en syllabe CVCC, /ʔəps/ et /ʔəsp/. Cet effet d'attaque glottique aurait pour conséquence d'empêcher le sujet d'enchaîner rapidement la production des séquences et ainsi de bloquer temporairement le phasage des articulateurs⁶⁴.

Une analyse phonétique *a posteriori* des enregistrements⁶⁵ a permis de confirmer que 71% et 63% des sujets produisaient une attaque glottique à la fin du processus de répétition des séquences /əps/ et /əsp/. Pour /əps/, cet effet d'attaque glottique est présent pour 86% des séquences restées stables et pour 45% des séquences transformées. Pour /əsp/, cet effet apparaît pour 82% des séquences restées stables et pour 40% des séquences transformées. Ces derniers résultats semblent donc confirmer que le degré de stabilité observé pour ces deux séquences est en grande partie dû à un effet d'attaque glottique. Les analyses des enregistrements ont de plus révélé que, durant la procédure de répétition de la séquence /əsp/, 48% des sujets commettaient des erreurs de production vers la séquence /əps/ (bien que seulement 4% des sujets aient rapporté une transformation de /əsp/ vers /əps/). Le patron inverse d'erreurs de production de /əps/ vers /əsp/ n'apparaissait que pour 2% des sujets. Pris ensemble, ces résultats indiquent une plus grande "facilité" de réalisation articulaire pour la structure labiale-coronale /ps/ que pour la structure coronale-labiale /sp/, prédite comme moins phasée. Finalement, la réanalyse des résultats de transformations, une fois écartées les réponses des sujets ayant produit une attaque glottique, montre que la séquence /əps/ est transformée majoritairement vers /psə/ pour 50% des sujets et reste stable pour 36% des sujets. De la même manière, la séquence /əsp/ est transformée vers /pəs/, /spə/ et /psə/ pour respectivement 41%, 9% et 9% des sujets et reste stable pour 27% des participants. Relativement à cette réanalyse des réponses, nos prédictions de stabilité et de transformations préférentielles pour ces deux séquences sont donc largement validées.

Discussion

Globalement, le patron des résultats observés permet donc de valider nos prédictions sur le degré de cohérence articulaire des séquences. Pour le groupe 1, nos prédictions sur l'attractivité de ces séquences sont validées avec une hiérarchie de type "/psə/ > /səp/ > /əps/". Le maintien perceptif important de la séquence /əps/, pourtant prédite comme très instable, s'explique par la présence d'un effet d'attaque glottique. Cet effet permet donc d'expliquer la hiérarchie observée, "/psə/ = /əps/ > /səp/", en terme de stabilité. Pour le Groupe 2, malgré la stabilité perceptive non-prédite de la séquence /əsp/ et, de fait, aucune différence observée de stabilité entre les séquences, nos prédictions en termes d'attractivité sont validées avec une hiérarchie des séquences de type "/pəs/ = /spə/ > /əsp/". Ces résultats permettent ainsi de démontrer, pour la première fois, l'existence d'un biais d'asymétrie dans le paradigme des transformations verbales lors d'une procédure de répétition ouverte. Les dissymétries observées sont directement fonction du degré de cohérence articulaire des séquences répétées, impliquant des mécanismes dynamiques spécifiques de phasage entre gestes consonantiques d'occlusion bilabiale et de friction lors de la répétition des séquences. Cette expérience semble donc indiquer l'incidence de contraintes purement motrices, liées à l'appareil périphérique articulaire, dans les processus phonologiques liés à l'analyse et l'émergence des transformations verbales.

⁶⁴ Sur l'existence d'un tel phénomène lors de la répétition prolongée de syllabe VC, voir de Jong, K.J. (2001). *op. cit.* L'existence d'un tel mécanisme est de plus consistante avec les durées de cycle plus importantes observées pour ces deux séquences.

⁶⁵ Cette analyse phonétique, menée par deux phonéticiens experts (Jean-Luc Schwartz et Hélène Lævenbruck), consistait à détecter la présence ou l'absence d'un coup de glotte en fin de production des séquences, sans indication sur la stabilité ou transformation rapportée pour chacune d'elles.

Expérience de Transformation Verbale : Procédure de Répétition Interne

Face aux résultats de la première expérience démontrant l'incidence de mécanismes moteurs de la parole dans l'émergence des transformations verbales, et dans le cadre plus général des liens possibles entre action imaginée et action exécutée, cette seconde expérience avait pour objectif de tester l'influence du degré d'enactment sur les dissymétries des transformations précédemment observées, par l'utilisation d'une procédure de répétition interne, réalisée sans mouvement externe de l'appareil périphérique articulatoire.

Conformément aux données de Reisberg et ses collègues⁶⁶, cette condition de répétition interne devrait entraîner une baisse significative du nombre de transformations par rapport à l'expérience précédente. Cependant, le maintien, ou à l'extrême opposé, la disparition des patterns de transformations précédemment observés permettrait de tester une possible implication des représentations motrices dans la construction des images mentales phonologiques, nécessaires à l'émergence des transformations verbales.

Méthode Expérimentale

Sujets

Vingt-neuf nouveaux étudiants de l'Université Stendhal de Grenoble participèrent à l'expérience. Les sujets, tous francophones et ne présentant pas de troubles auditifs ou articulatoires manifestes, se présentèrent individuellement au test sans avoir été au préalable renseignés sur l'expérience.

Procédure

Comme pour l'expérience précédente (Expérience 1⁶⁷), une brève description de l'Effet de Transformation Verbale, au travers de l'exemple "life"/"fly", fut donnée aux sujets. La consigne consistait ensuite à répéter mentalement chacune des six séquences –à la même vitesse que l'examineur, la bouche fermée, sans interruption ni pause entre les répétitions – et à tenter de détecter mentalement tout changement possible de la séquence. Si le sujet trouvait une transformation, il devait s'arrêter et la signaler. Dans le cas contraire, l'examineur l'arrêtait au bout d'une quinzaine de secondes. Il était enfin indiqué que les changements perceptifs pouvant survenir lors de la répétition d'une séquence pouvaient être subtils ou très importants et correspondre aussi bien à des mots qu'à des pseudo-mots. Il ne fut proposé aucune indication quant aux transformations envisagées.

Durant l'expérience, les six séquences - /psə/, /səp/, /əps/, /spə/, /pəs/ et /əsp/ - étaient présentées oralement par l'examineur, l'ordre des séquences étant contrebalancé entre les sujets (les six ordres de présentation sélectionnés étaient identiques à l'expérience 1). Lors de la procédure de répétition, il pouvait arriver que le sujet effectue un mouvement des lèvres ou de la

⁶⁶ Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.* ; Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). *op. cit.*

⁶⁷ Pour des raisons de commodité, cette numérotation des expériences sera désormais appliquée.

mâchoire sans phonation ; Dans ce cas, l'examineur l'en avertissait et lui demandait de recommencer sa répétition, les lèvres closes. La durée totale de l'expérience était d'approximativement 4 minutes, des temps de repos étaient offerts après chaque répétition.

Résultats

La Table 5 présente les fréquences de transformations et stabilités observées pour les vingt-neuf sujets (même présentation que la Table 3).

Table 5 : Expérience de transformation verbale, procédure de répétition interne – (A) Fréquence des transformations et stabilités observées des séquences (N = 29, "div." : Autres transformations - Les fréquences de stabilité des séquences sont représentées en gras). (B) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 1. (C) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 2.

(A)							
Séquence	⇒ /psə/	⇒ /səp/	⇒ /əps/	⇒ /pəs/	⇒ /spə/	⇒ /əsp/	⇒ div.
/psə/	.63	.10		.07	.10		.10
/səp/	.31	.62					.07
/əps/	.42	.07	.34				.17
/pəs/	.07			.69	.21		.03
/spə/	.10	.03		.11	.48		.28
/əsp/	.21	.03	.07	.17	.07	.35	.10

(B)			(C)		
Séquence	Stabilité	Attractivité	Séquence	Stabilité	Attractivité
/psə/	.63	.70	/pəs/	.69	.24
/səp/	.62	.17	/spə/	.48	.29
/əps/	.34	.00	/əsp/	.35	.00

Nous pouvons émettre les commentaires suivants sur les transformations observées. Pour le Groupe 1, la séquence /psə/ reste stable pour 63% des sujets, 10% percevant une transformation vers /səp/ et aucun vers /əps/. La séquence /səp/ reste stable pour 62% des sujets et est transformée vers /psə/ pour 31%. Enfin, la séquence /əps/, stable pour 34% des sujets, est transformée majoritairement vers /psə/ pour 42% des sujets et vers /səp/ pour 7%. Pour le Groupe 2, les séquences /pəs/ et /spə/ sont stables pour respectivement 69% et 48% des sujets. Des transformations réciproques entre ces deux séquences sont observées pour 21% et 11% des participants, aucune transformation n'étant rapportée vers /əsp/. Enfin, la séquence /əsp/ reste stable pour seulement 35% des participants, 17% reportant une transformation vers /pəs/ et 7% vers /spə/. Ainsi, par rapport à l'Expérience 1, une stabilité plus importante des séquences /səp/, /pəs/ et /spə/ est observée. De plus, un nombre important de transformations est rapporté pour les séquences /əps/ et /əsp/ (principalement vers /psə/ pour /əps/, et vers /pəs/ ou /psə/ pour /əsp/).

Procédure de parsing glissant

Les transformations observées d'un groupe vers l'autre représentent en moyenne 6% des résultats observés pour le Groupe 1 et 17% pour le Groupe 2. Le nombre des transformations non-envisagées (colonne "div.", en moyenne 13%), bien que non négligeable, reste cependant faible en regard de la non-information des sujets face aux transformations attendues. La majorité des ces transformations étaient d'ordre lexicale (7% du total des réponses) ou correspondaient à un pseudo-mot de longueur segmentale supérieure (4% du total des réponses). Dans l'ensemble, malgré un nombre de transformations d'un groupe vers l'autre plus important que dans l'Expérience 1, l'essentiel des réponses rapportées s'est effectué au sein de chaque groupe (76% des réponses en moyenne) : Ce résultat confirme ainsi la réalisation d'une procédure de parsing glissant lors de la resegmentation des séquences.

Stabilités et transformations préférentielles

Les analyses statistiques globales des résultats montrent des différences significatives de réponses des sujets entre les séquences (effet stimulus : $\chi^2(5) = 12.98, p < .05$) mais pas de différences significatives en fonction de l'ordre de présentation des stimuli (effet d'ordre : $\chi^2(5) = 1.74, N.S.$).

A l'intérieur de chaque groupe, les comparaisons statistiques en termes de stabilité et d'attractivité montrent les résultats suivants. Pour le Groupe 1, la comparaison globale des stabilités observées ne montre pas de différence significative entre les séquences (effet de stabilité : $\chi^2(2) = 5.90, N.S.$). La comparaison du degré d'attractivité des séquences montre une différence globale significative (effet d'attractivité : $\chi^2(2) = 43.39, p < .0001$) et des différences individuelles significatives entre /psə/ et /səp/ ($\chi^2(1) = 17.38$) et entre /psə/ et /əps/ ($\chi^2(1) = 25.83$). En résumé, les séquences du Groupe 1 ne montrent pas de différences en termes de stabilité ; /psə/ présente un degré d'attractivité supérieure à /səp/ et à /əps/. A l'intérieur du Groupe 2, la comparaison globale des stabilités observées montre une différence significative entre les séquences (effet de stabilité : $\chi^2(2) = 6.99, p < .05$). Les analyses individuelles de stabilité montrent une différence significative entre /pəs/ et /əsp/ ($\chi^2(1) = 6.90$). La comparaison du degré d'attractivité des séquences montre une différence globale significative (effet d'attractivité : $\chi^2(2) = 10.81, p < .005$) ainsi que des différences individuelles significatives entre /pəs/ et /əsp/ ($\chi^2(1) = 6.55$) et entre /spə/ et /əsp/ ($\chi^2(1) = 8.10$). En résumé, la séquence /pəs/ présente une stabilité supérieure à celle de la séquence /əsp/, les séquences /pəs/ et /spə/ montrent une plus forte attractivité que la séquence /əsp/.

Discussion

En résumé, malgré l'absence de différence en termes de stabilité pour les séquences du Groupe 1, le patron des attractivités observées est globalement en accord avec nos prédictions sur le degré de cohérence articulatoire des séquences, avec une hiérarchie de type "/psə/ > /səp/ = /əps/", pour les séquences du Groupe 1, et de type "/pəs/ = /spə/ > /əsp/", pour les séquences du Groupe 2. Cette conservation des patrons d'attractivité des séquences, d'une condition de répétition ouverte vers une condition de répétition interne, tend dès lors à démontrer, du fait de la diminution possible de l'implication des aires sensori-motrices⁶⁸ et l'absence de feed-back auditif dans cette dernière

⁶⁸ Des études récentes d'imagerie neurofonctionnelle ont ainsi montré une activation similaire de régions du cortex moteur primaire lors de la simulation mentale d'une action et lors de son exécution, bien qu'à un degré d'activation moindre dans le cas d'une action imaginée (~ 30%) : Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C., Segebarth, C., Morand, S., Gemignani, A., Decorps, M. & Jeannerod, M. (1996). Possible involvement of primary cortex in mentally simulated movement: A functional magnetic resonance imaging. *Neuroreport*, 7: 1280-1284 ; Porro, C.A., Francescato, M.P., Cettolo, V., Diamond, M.E., Baraldi, P., Suiiani, C., Bazzochi, M. & di Prampero, P.E. (1996). Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery. A functional magnetic resonance study. *Journal of Neurosciences*, 16: 7688-7698 ; Ehrsson, H.E., Geyer, S. & Naito, E. (2003). Imagery of voluntary movements of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representation.

condition, que des représentations purement actionnelles peuvent participer à la construction des images mentales phonologiques, substrat de la parole intérieure, et souligne de fait les liens existant entre production de la parole et imagerie auditivo-verbale.

Expérience de Transformation Verbale : Procédure Contrôle

Suite à l'expérience précédente (Expérience 2.1) et afin de pouvoir comparer les différences possibles des résultats de transformations entre une condition de répétition interne et une condition de répétition ouverte pour les mêmes sujets, nous avons demandé aux participants de procéder à une nouvelle expérience de transformations verbales (Expérience 2.2), selon une condition de répétition à haute voix. La procédure expérimentale utilisée étant similaire à celle de l'Expérience 1, cette expérience "contrôle" permettait de plus de vérifier la cohérence des résultats observés lors des deux conditions de répétition externe.

Méthode Expérimentale

Sujets

Les vingt-neuf sujets de l'Expérience 2.1 participèrent à l'expérience.

Procédure

Une fois la procédure de répétition mentale des séquences terminée, il était demandé aux sujets de procéder à une nouvelle expérience. La procédure utilisée était la même que précédemment, excepté la consigne de répétition à haute voix des séquences.

Durant l'expérience, les six séquences - /psə/, /səp/, /əps/, /spə/, /pəs/ et /əsp/ - étaient présentées oralement par l'examineur, l'ordre de présentation étant contrebalancés entre les sujets. Comme dans l'expérience 1, dans le cas d'une prononciation erronée de la séquence, d'une pause prolongée lors de la répétition, d'une accélération ou diminution du débit ou d'un arrêt de la répétition sans report d'une transformation avant la fin de la période critique de 15 secondes, l'examineur demandait au sujet de recommencer la répétition de la séquence. La durée totale de l'expérience était d'approximativement 4 minutes, des temps de repos étaient offerts après chaque répétition.

Les transformations et stabilités observées des séquences furent consignées par l'examineur et les productions des sujets enregistrées sur bande magnétique. Les enregistrements des répétitions furent ensuite transférés sous format numérique à une fréquence d'échantillonnage de 22.05 kHz (codage sur 16 bits).

Résultats

La Table 6 présente les fréquences de transformations et stabilités observées pour les vingt-neuf sujets (même présentation que la Table 3). Nous pouvons émettre les commentaires suivants sur les transformations observées. Pour le Groupe 1, la séquence /psə/ n'entraîne pour 56% des sujets aucune transformation, 21% percevant une transformation vers /səp/ et 3% vers /əps/. Les séquences /səp/ et /əps/ sont transformées vers /psə/ pour respectivement 52% et 42% des sujets. Un nombre faible de transformations est observée de /səp/ vers /əps/ et de /əps/ vers /səp/ (3% et

7%). Pour le Groupe 2, il est à noter une stabilité plus forte de la séquence /pəs/ par rapport à la séquence /spə/. En effet ces séquences restent stables pour respectivement 45% et 17% des participants et entraînent des transformations réciproques pour 28% et 48% des sujets. La séquence /əsp/ reste stable pour 35% des sujets et se transforme vers /pəs/, /spə/, /əps/ et /psə/ pour respectivement 24%, 17%, 14% et 11% des participants.

Table 6 : Expérience de transformation verbale, procédure contrôle de répétition ouverte – (A) Fréquence des transformations et stabilities observées des séquences (N = 29, "div." : Autres transformations - Les fréquences de stabilité des séquences sont représentées en gras). (B) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 1. (C) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 2.

(A)							
Séquence	⇒ /psə/	⇒ /səp/	⇒ /əps/	⇒ /pəs/	⇒ /spə/	⇒ /əsp/	⇒ div.
/psə/	.56	.21	.03		.03		.17
/səp/	.52	.28	.03				.17
/əps/	.42	.07	.34		.07		.10
/pəs/	.03	.07		.45	.28	.03	.14
/spə/	.21			.48	.17		.14
/əsp/	.11	.03	.14	.24	.17	.24	.07

(B)			(C)		
Séquence	Stabilité	Attractivité	Séquence	Stabilité	Attractivité
/psə/	.56	.68	/pəs/	.45	.46
/səp/	.28	.25	/spə/	.17	.34
/əps/	.34	.06	/əsp/	.24	.03

Procédure de parsing glissant

Les transformations observées d'un groupe vers l'autre sont peu nombreuses et représentent en moyenne 3% des résultats observés pour le Groupe 1 et 19% pour le Groupe 2. Le nombre des transformations non-envisagées (colonne "div.", en moyenne 11%), bien que non négligeable, reste cependant faible. La plupart de ces transformations étaient d'ordre lexicale (3% du total des réponses) ou correspondaient à un pseudo-mot de longueur segmentale supérieure (8% du total des réponses). Dans l'ensemble, l'essentiel des réponses rapportées s'est effectué au sein de chaque groupe (75% des réponses en moyenne), ce résultat confirme ainsi une nouvelle fois la réalisation d'une procédure de parsing glissant lors de la resegmentation des séquences.

Stabilités et transformations préférentielles

Les analyses statistiques globales des résultats montrent des différences significatives de réponses des sujets entre les séquences (effet stimulus : $\chi^2(5) = 11.29, p < .05$) mais pas de différences significatives en fonction de l'ordre de présentation des stimuli (effet d'ordre : $\chi^2(5) = 1.67, N.S.$).

A l'intérieur du Groupe 1, la comparaison globale des stabilités observées ne montre pas de différence significative entre les séquences (effet de stabilité : $\chi^2(2) = 5.02$, N.S.). La comparaison du degré d'attractivité des séquences montre une différence globale significative (effet d'attractivité : $\chi^2(2) = 33.82$, $p < .0001$) et des différences individuelles significatives entre /psə/ et /səp/ ($\chi^2(1) = 12.85$) et entre /psə/ et /əps/ ($\chi^2(1) = 29.28$). En résumé, les séquences du Groupe 1 ne montrent pas de différences en termes de stabilité et une attractivité supérieure pour /psə/ que pour /səp/ et /əps/. A l'intérieur du Groupe 2, la comparaison globale des stabilités observées ne montre pas de différence significative entre les séquences (effet de stabilité : $\chi^2(2) = 5.83$, N.S.). La comparaison du degré d'attractivité des séquences montre une différence globale significative (effet d'attractivité : $\chi^2(2) = 18.72$, $p < .0001$) ainsi que des différences individuelles significatives entre /pəs/ et /əsp/ ($\chi^2(1) = 20.93$) et entre /spə/ et /əsp/ ($\chi^2(1) = 13.31$). En résumé, les séquences du Groupe 2 ne montrent pas de différences en termes de stabilité. En revanche, une plus forte attractivité des séquences /pəs/ et /spə/ est observée par rapport à la séquence /əsp/.

Analyses temporelles

Comme aucun dispositif de contrôle du débit des sujets n'était utilisé durant l'expérience, la vitesse de répétition des sujets fut analysée ultérieurement. La Table 7 présente la durée moyenne de production de chaque séquence calculée sur les 5 premières et 5 dernières répétitions des enregistrements.

Table 7 : Durée moyennes de production de chacune des séquences, extraite en début et fin d'enregistrements (M : Moyenne, ET : Ecart-type). Procédure contrôle de répétition ouverte.

Séquence	Durée de Cycle (en secondes)			
	Début		Fin	
	M	ET	M	ET
/psə/	0.32	0.08	0.35	0.08
/səp/	0.31	0.07	0.32	0.07
/əps/	0.36	0.08	0.38	0.11
/pəs/	0.33	0.08	0.35	0.08
/spə/	0.35	0.08	0.37	0.07
/əsp/	0.40	0.09	0.42	0.09

La durée moyenne globale de répétition pour les six séquences est de 0.36 s. (intervalle: 0.32 – 0.41 s.). Comme dans l'Expérience 1, la comparaison globale des résultats entre le début et la fin du processus de répétition montre une légère augmentation de la durée du cycle des sujets (en moyenne: +0.02 s. par répétition, intervalle: +0.01 – +0.03 s.). Ces résultats confirment donc l'absence de tout mécanisme d'accélération durant la production répétée des séquences. Comme pour l'Expérience 1, le temps moyen de transformation d'une séquence présente une grande variabilité et n'apparaît donc pas comme un bon indice indirect de la stabilité des séquences (temps moyen de transformations : /psə/: 8.97 s., $ET = 5.08$ - /səp/: 6.46 s., $ET = 4.03$ - /əps/: 7.03 s., $ET = 3.91$ - /pəs/: 8.16 s., $ET = 4.46$ - /spə/: 7.40 s., $ET = 4.72$ - /əsp/: 6.21 s., $ET = 3.64$).

Test d'un effet d'attaque glottique

Comme observé dans l'Expérience 2.1 et contrairement à l'Expérience 1, les syllabes à attaque vocalique /əps/ et /əsp/ sont majoritairement transformées pour respectivement 66% et 76% des participants. Une analyse phonétique *a posteriori* des enregistrements, similaire à celle réalisée dans l'Expérience 1, a montré que 45% et 47% des sujets produisaient une attaque glottique à la fin

du processus de répétition des séquences. Pour /əps/, cet effet d'attaque glottique est présent pour 80% des séquences restées stables et pour 26% des séquences transformées. Pour /əsp/, cet effet apparaît pour 94% des séquences restées stables et pour 29% des séquences transformées. Comme observé précédemment, les analyses des enregistrements ont de plus révélé que, durant la procédure de répétition de la séquence /əsp/, 59% des sujets commettaient des erreurs de production vers la séquence /əps/ (bien que seulement 14% des sujets aient rapporté une transformation de /əsp/ vers /əps/). Le patron inverse d'erreurs de production de /əps/ vers /əsp/ n'apparaissait jamais.

Finalement, la réanalyse des résultats de transformations, une fois écartées les réponses des sujets ayant produit une attaque glottique, montre que la séquence /əps/ est transformée majoritairement vers /psə/ pour 63% des sujets et reste stable pour 13% des sujets. De la même manière, la séquence /əsp/ est transformée vers /pəs/, /spə/, /psə/ et /əps/ pour respectivement 39%, 22%, 22% et 11% des sujets et reste stable pour 6% des participants.

Discussion

Globalement, le patron des résultats observés permet donc de valider nos prédictions sur le degré de cohérence articulatoire des séquences. Malgré une absence de différence globale en termes de stabilité pour les séquences du Groupe 1 et du Groupe 2, nos prédictions sur l'attractivité de ces séquences sont validées avec une hiérarchie de type "/psə/ > /səp/ = /əps/", pour le Groupe 1, et de type, "/pəs/ = /spə/ > /əsp/", pour le Groupe 2. Une nouvelle fois, ces résultats suggèrent fortement l'existence d'un biais d'asymétrie dans le paradigme des transformations verbales, impliquant des mécanismes dynamiques spécifiques de phasage entre gestes articulatoires.

Comparaison des Résultats des Expériences

De manière à pouvoir tester de possibles différences entre les résultats des trois expériences de transformations verbales, nous avons procédé à la comparaison statistique des patrons observés de stabilité et d'attractivité. Ni la comparaison des résultats globaux de stabilité par séquence ($\chi^2(10) = 15.89$, N.S.), ni celle des résultats globaux d'attractivité par séquence ($\chi^2(10) = 8.33$, N.S.), ne montrent de différences significatives entre les trois expériences. Cependant, la comparaison du nombre total de séquences stables/transformées montre une différence significative entre les trois expériences ($\chi^2(2) = 15.57$, $p < .0001$), des différences significatives étant observées entre l'Expérience 1 et l'Expérience 2.2 ($\chi^2(1) = 13.36$) et entre l'Expérience 2.1 et l'Expérience 2.2 ($\chi^2(1) = 11.27$).

Ainsi, excepté la différence de stabilité par séquence observée entre les expériences 1 et 2.1 et l'Expérience 2.2, il existe une remarquable convergence entre les résultats des trois expériences. En termes d'attractivité, les principales asymétries observées des transformations verbales sont les mêmes dans les conditions de répétition à voix haute et celle de répétition mentale, avec une hiérarchie commune d'attractivité des séquences de type, "/psə/ > /səp/ ≥ /əps/", pour le Groupe 1, et de type, "/pəs/ = /spə/ > /əps/", pour le Groupe 2 (voir la Table 8 pour un récapitulatif des hiérarchies observées). De plus, cette hiérarchie des transformations observées est parfaitement conforme à nos prédictions sur la cohérence articulatoire des séquences répétées.

Cependant, cette convergence de résultats ne doit pas masquer deux différences importantes. Une première différence importante des résultats est celle de la baisse des fréquences de stabilité des séquences /əps/ et /əsp/ de l'Expérience 1 (où elles présentent une stabilité importante) vers l'Expérience 2.1 et l'Expérience 2.2 (où ces séquences présentent une stabilité faible, plus conforme à nos prédictions). Notre interprétation de la stabilité non-prédite de ces séquences dans l'Expérience 1, selon une condition de répétition ouverte, est celle de la réalisation par les sujets

Table 8 : Hiérarchies des séquences en termes de différences significatives d'attractivité et de stabilité dans les trois expériences ($p < .05$).

Attractivité		
	Groupe 1	Groupe 2
Expérience 1	/psə/ > /səp/ > /əps/	/pəs/ = /spə/ > /əsp/
Expérience 2.1	/psə/ > /səp/ = /əps/	/pəs/ = /spə/ > /əsp/
Expérience 2.2	/psə/ > /səp/ = /əps/	/pəs/ = /spə/ > /əsp/
Stabilité		
	Groupe 1	Groupe 2
Expérience 1	/psə/ = /əps/ > /səp/	-
Expérience 2.1	-	/pəs/ > /əsp/
Expérience 2.2	-	-

d'un coup de glotte en début d'attaque syllabique, réalisation confirmée par des analyses phonétiques menées *a posteriori* sur les enregistrements et indiquant l'existence d'un tel effet pour 67% des sujets en moyenne. Cet effet d'attaque glottique aurait selon nous pour conséquence d'empêcher le sujet d'enchaîner rapidement la production des syllabes et ainsi de bloquer temporairement le phasage des articulateurs, nécessaire à leur transformation⁶⁹. La stabilité plus faible de ces séquences dans l'Expérience 2.1 selon une condition de répétition mentale (64% vs. 34% pour la séquence /əps/, 55% vs. 35% pour la séquence /əsp/) pourrait indiquer que l'effet d'attaque glottique dépend du degré d'enactment et apparaîtrait plus fortement lors de la production ouverte des séquences. Un autre résultat intéressant est celui donné par l'analyse phonétique menée *a posteriori* sur les enregistrements de l'Expérience 2.2. En effet, malgré une stabilité relativement faible des séquences /əps/ et /əsp/ (34% et 24%), ces analyses ont montré qu'en moyenne 46% des sujets produisaient une attaque glottique à la fin du processus de répétition. Ces données contradictoires entre l'existence d'une attaque glottique (bien que moins prononcée que dans l'Expérience 1) et la stabilité faible de ces séquences pourraient s'expliquer par l'influence de l'Expérience 2.1 sur la performance des participants dans l'Expérience 2.2 ou par l'utilisation de sujets différents entre les expériences. Malheureusement, comme l'ordre de passation des deux conditions de répétition interne et ouverte n'a pas été contrebalancé entre les sujets, il est difficile de juger de la validité de cette hypothèse.

Une autre différence majeure est celle d'un nombre de transformations moindre durant la condition de répétition interne par rapport aux conditions de répétition ouverte. En effet, une fois écartées les séquences /əps/ et /əsp/ pour les raisons présentées ci-dessus, on observe une fréquence de stabilité des séquences plus importante dans l'Expérience 2.1 par rapport à l'Expérience 1 (en moyenne, 60% vs. 46%) et l'Expérience 2.2 (en moyenne, 60% vs. 36%)⁷⁰. Cette baisse moyenne du nombre de transformations observées des conditions de répétition externe vers la condition de répétition interne est très proche de celle constatée par Reisberg *et al.*⁷¹ et confirme ainsi le lien entre degré d'enactment et nombre de transformations montré par ces auteurs.

⁶⁹ Pour une interprétation similaire, voir de Jong, K.J. (2001). *op. cit.*

⁷⁰ Une fois écartées les séquences à attaque vocalique, la comparaison du nombre total des séquences stables/transformées entre les expériences 1 et 2.2 ne montre plus de différence significative ($\chi^2(1) = 3.26$, N.S.). Ce résultat semble ainsi confirmer l'incidence majeure des patrons de stabilité des séquences /əps/ et /əsp/ dans la différence globale des stabilités/transformations observées entre ces deux conditions de répétition ouverte.

⁷¹ Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.* La comparaison du nombre de transformations observées par Reisberg et ses collègues entre les deux conditions (cf. p. 635) montre une diminution moyenne de 38% de ces transformations, tandis que nos résultats indiquent une diminution moyenne de 26% de l'Expérience 1 vers l'Expérience 2.1 et de 38% de l'Expérience 2.2 vers l'Expérience 2.1.

Discussion Générale

Ces dernières années, l'étude des systèmes cognitifs spécialisés dans l'émergence et le traitement des représentations d'action, notamment par l'utilisation des méthodes introspective et de chronométrie mentale, ont permis de montrer les liens étroits unissant la représentation mentale d'une action, sa préparation intentionnelle, enfin, son exécution. Malheureusement, si un nombre important d'études comportementales, inscrites dans le domaine de la cognition motrice, ont permis l'émergence de découvertes capitales sur les processus de perception et de simulation mentale du mouvement biologique⁷², bien peu finalement se sont attachées à décrire les relations possibles entre systèmes de perception et de production de la parole, d'une part, et processus d'imagerie auditivo-verbale, d'autre part⁷³.

Cette première étude avait pour objectif de tester, lors d'une procédure expérimentale de répétition ouverte ou interne, l'intervention de contraintes de production spécifiques de la parole dans l'Effet de Transformation Verbale. Les résultats des expériences utilisant une condition de répétition ouverte démontrent clairement l'existence d'un biais d'asymétrie des transformations, cohérent avec nos hypothèses sur l'existence de contraintes dynamiques de phasages articulatoires. La persistance de cet effet dans l'Expérience 2.1, utilisant une procédure de répétition mentale, suggère que ces contraintes purement motrices participent à la construction des représentations mentales phonologiques. De fait, il existe une remarquable convergence de résultats entre les résultats des trois expériences : Les principales asymétries observées dans les transformations verbales sont les mêmes dans les conditions de répétition à voix haute et celle de répétition mentale, ce, conformément à nos prédictions basées sur le degré de cohérence entre gestes articulatoires des séquences répétées.

Pris ensemble, ces résultats démontrent, selon nous, la capacité des représentations motrices de la parole à influencer les processus d'imagerie auditivo-verbale nécessaires à l'émergence de nouvelles représentations, processus constitutifs de la "parole interne" et souvent considérés comme de nature purement phonologique ou lexicale, quand ils ne sont pas tout simplement définis comme une projection abstraite et elliptique du langage parlé⁷⁴.

⁷² Pour une revue des études comportementales menées sur les représentations d'actions, voir : Jeannerod, M. (1994). *op. cit.* ; Berthoz, A. (1996). *op. cit.* ; Jeannerod, M. (2002). *op. cit.* Plus récemment, l'utilisation des nouvelles techniques d'imagerie, sur l'homme comme sur l'animal, ont permis de démontrer les liens d'analogie, par l'observation d'un réseau neural partiellement commun, entre les activités cérébrales mises en jeu lors de la seule représentation mentale consciente d'une action motrice, sa perception et le contrôle exécutif de celle-ci. Ces études seront présentées et discutées dans le quatrième chapitre de ce texte.

⁷³ Voir par exemple, Landauer, T.K. (1962). Rate of implicit speech. *Perceptual and Motor Skills*, 15: 646 ; MacKay, D.G. (1982). The problems of flexibility, fluency, and speed-accuracy trade-off in skilled behavior. *Psychological Review*, 89: 483-527 ; Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.* ; Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). *op. cit.* ; Postma, A. & Noordanus, C. (1996). Production and detection of speech errors in silent, mouthed, noise-masked, and normal auditory feedback speech. *Language and Speech*, 39(4): 375-392. Les études citées suggèrent la participation des processus de planification articulatoire durant la production mentale de stimuli verbaux, par l'analyse chronométrique des temps de production ou par l'observation d'erreurs de production ou de transformations verbales.

⁷⁴ Il est généralement convenu de distinguer la "parole interne" de la "parole intérieure" - encore appelée "endophasie", du grec *endon*, dedans et *phasis*, parole - bien que toutes deux se caractérisent par une production silencieuse sans mouvement phonatoire ni articulatoire. La parole interne fait implicitement référence, le plus souvent dans les domaines de la psychologie expérimentale, de la psycholinguistique ou plus récemment des neurosciences, aux processus d'imagerie nécessaires à la construction des représentations acoustico-verbales. La seconde désigne avant tout dans une tradition linguistique prise au sens large une conception du langage axée sur la pensée, soit une forme de communication

Implication des Systèmes de Perception et de Production de la Parole dans l'Effet de Transformation Verbale

Comme décrit en Introduction, l'Effet de Transformation Verbale a principalement été étudié sous un angle purement perceptif, lors de l'écoute répétée d'un stimulus auditif langagier, et relié à l'organisation des représentations mnésiques lexicales ou phonologiques. L'utilisation d'une procédure expérimentale de répétition, ouverte ou interne, a permis de démontrer l'incidence de contraintes motrices articulatoires dans les processus de transformations⁷⁵. De manière à tester le degré d'engagement et de complémentarité des systèmes de production et de perception de la parole dans l'émergence de nouvelles représentations, il apparaît dès lors nécessaire de considérer la pertinence des résultats obtenus dans cette étude face aux mécanismes précédemment désignés comme responsables des transformations verbales.

Un certain nombre des transformations rapportées par les participants dans notre étude correspondent à des mécanismes transformationnels précédemment observés, tels que des changements de type segmentaux⁷⁶ (par exemple, une déviation phonétique relative à la substitution d'un phonème par un autre phonétiquement proche – telle que la transformation de /səp/ vers /səb/ ou de /əps/ vers /əbs/ - ou encore la suppression d'un des segments de la séquence répétée – telle que la transformation de /əps/ vers /əp/) ou des transformations de nature lexicales⁷⁷ (telle que la transformation de /spə/ vers /saspə/ ou de /pəs/ vers /pys/). Cependant, les mécanismes à la base de l'émergence de nouvelles représentations verbales dans les deux procédures expérimentales, perceptive et productive, ne peuvent être considérés comme complètement équivalents. Lackner⁷⁸ fut le premier à observer un nombre beaucoup plus faible (en fait, presque inexistant) de transformations lors d'une procédure de répétition ouverte de logatomes monosyllabiques que lors de la perception par les sujets de leur propre production. De manière similaire, MacKay et ses collègues⁷⁹ ont montré un nombre plus élevé de transformations lors de l'écoute de stimuli langagiers par des sujets que lors de leur production ouverte. Les résultats de ces deux études suggèrent ainsi une plus forte stabilité des représentations perceptives lors d'une condition de production ouverte.

Pour expliquer cet effet de stabilité, Lackner a suggéré l'existence de décharges corollaires, ou copies d'efférences, lors de la production de séquences verbales par le sujet. La décharge motrice produite par les centres nerveux et envoyée vers les muscles responsables des mouvements articulatoires et phonatoires s'accompagnerait d'une décharge parallèle informant les systèmes perceptifs de la production de ces mouvements. De manière générale, ce mécanisme permettrait de distinguer une information due aux mouvements propres de l'individu, d'une information due à une modification du monde extérieur⁸⁰. Lorsque la copie de la décharge motrice et l'information

intrapersonnelle, se développant d'une parole égocentrique, chez le jeune enfant, vers une activité discursive intériorisée chez l'adulte. Cependant, la distinction entre ces deux formes d'activités mentales tient plus, selon nous, aux conceptions qu'en ont les différents domaines scientifiques attachés à leur étude qu'à une séparation claire des processus qui les soutiennent. Pour une description des travaux menés sur la parole intérieure, voir Jakobson R. & Waugh, L. (1980). *op. cit.* ; Bergounioux, G. (2001). La parole intérieure. *Langue Française*, 132.

⁷⁵ A notre connaissance, seules cinq études ont également utilisé ce type de procédure expérimentale : Warren, M.R. & Gregory, R.L. (1958). *op. cit.* ; Lackner, J.R. (1974). Speech production: Evidence for corollary-discharge stabilization of perceptual mechanisms. *Perceptual and Motor Skills*, 39: 899-902 ; Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.* ; Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). *op. cit.*

⁷⁶ Warren, M.R. (1961). *op. cit.* ; Warren, M.R. & Meyers, D.M. (1987). *op. cit.*

⁷⁷ Warren, M.R. (1961). *op. cit.* ; Natsoulas, T. (1965). *op. cit.* ; Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). *op. cit.* ; Pitt, M. & Shoaf, L. (2001). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

⁷⁸ Lackner, J.R. (1974). *op. cit.*

⁷⁹ MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.*

⁸⁰ Le concept de copie d'efférences a été introduit, à la suite d'expérimentations animales chez le poisson et l'insecte, par Roger Sperry et Eric von Holst. Sperry, R.W. (1950). Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 43: 482-489 ; von Holst, E. (1954). Relations between the central nervous system and the peripheral organs. *British Journal of Animal Behavior*, 2: 89-94. Un grand nombre de travaux ont depuis repris et étendu ce concept de copie d'efférence ; Par exemple dans le domaine de la vision

perceptive coïncident, cette dernière est reconnue comme auto-produite et par conséquent n'est pas prise en compte par le système nerveux comme une modification du monde extérieur. Cette distinction de traitement des informations externes et auto-générées permettrait pour Lackner d'expliquer les degrés de stabilité différents des représentations verbales.

Pour MacKay et ses collègues, les transformations verbales pouvant apparaître lors de la production répétée d'un mot ne seraient en fait qu'un épiphénomène transitoire, lié au seul traitement du feedback acoustique. Dans leur modèle localisationniste de production et de perception du langage, les mécanismes compétitifs d'amorçage et d'activation des unités lexicales et sous-lexicales et celui de satiété, responsable de l'émergence d'une nouvelle représentation, n'apparaîtraient que partiellement lors de la répétition prolongée d'un mot (et non lors d'une production unique) et expliquerait ainsi le faible nombre de transformations lors de cette condition par comparaison à la condition de perception.

Bien que nous partagions dans une certaine mesure les hypothèses émises par Lackner sur l'existence de décharges corollaires lors de la production de parole et celles sur un couplage fonctionnel partiel entre les deux systèmes de production et de perception du langage, tel que décrit dans le modèle de MacKay et ses collègues, nous réfutons en revanche une explication de l'Effet de Transformation Verbale basée sur le seul traitement du signal acoustique (explication rejetant toute implication de mécanismes moteurs de la parole dans l'émergence des transformations).

Pour expliquer l'absence ou le nombre moindre de transformations observées par Lackner et MacKay et ses collègues, il est dans un premier temps important de constater que la majorité des stimuli utilisés par ces auteurs impliquent, dans notre cadre théorique, une configuration stable des articulateurs (i.e., /p^hi/-/p^hε/, /t^hi/-/t^hε/, /k^hi/-/k^hε/, /bi/-/bε/, /di/-/dε/, /gi/-/gε/ pour le premier, et "tray", "glow", "clash", "gray", "blow", "crash" pour les seconds). Ceci expliquerait la relative absence de transformations de ces séquences lors d'une procédure de répétition, la cohérence articulatoire de ces séquences entraînant une stabilité forte de celles-ci lors de la condition de répétition externe. Ce résultat apparaît donc en accord avec la stabilité observée de la séquence /psə/ dans notre étude (séquence présentant un fort degré de cohérence entre gestes articulatoires) et, de manière plus générale, avec les résultats des études liés aux relations de phasage entre gestes articulatoires⁸¹. Un autre résultat intéressant, non souligné par MacKay *et al.*, est celui d'un nombre identique des formes rapportés dans les deux conditions malgré le nombre plus important de transformations dans la condition d'écoute perceptive. Ces résultats suggèrent donc une dynamique d'apparition des transformations verbales différentes dans les deux conditions mais non un contenu différent de celles-ci⁸².

L'Effet de Transformation Verbale pourrait ainsi dépendre du degré de cohérence multimodale entre les actions articulatoires/phonatoires du sujet et le signal acoustique perçu : Les mécanismes de comparaison des signaux proprioceptifs et perceptifs nécessaires aux processus d'intégration multisensorielle seraient dès lors à la base de l'émergence des transformations verbales⁸³. Lors de

portant sur l'invariance perceptive due à des mécanismes de suppression saccadique, celui de la planification motrice des mouvements dirigés de la main ou encore dans le domaine de la conscience et de l'agentivité par la description de modèles internes liés à la représentation de soi et d'autrui ; Voir, Wolpert, D.M., Ghahramani, Z. & Jordan, M.I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 268: 1880-1882 ; Berthoz, A. (1996). *op. cit.* ; Abry, C. (1997). *De la Parole Articulatoire à la Parole Narrative*. Thèse non publiée de Doctorat d'Etat. Université Stendhal, Grenoble III ; Desmurget, M., Péliçon, D., Rossetti, Y. & Prablanc, C. (1998). From eye to hand: Planning goal-directed movements. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22(6): 761-788 ; Blakemore, S.J., Wolpert, D.M. & Frith, C.D. (1998). Central cancellation of self produced tickle sensation. *Nature Neurosciences*, 1: 635-640 ; Georgieff, N. (2000). *op. cit.* ; Jeannerod, M. (2002). *op. cit.* ; Jeannerod, M. (2003). The mechanism of self-recognition in humans. *Behavioural Brain Research*, 142: 1-15. Blakemore, S.-J. & Frith C.D. (2003). Self-awareness and action. *Current Opinion in Neurobiology*, 13: 219-224.

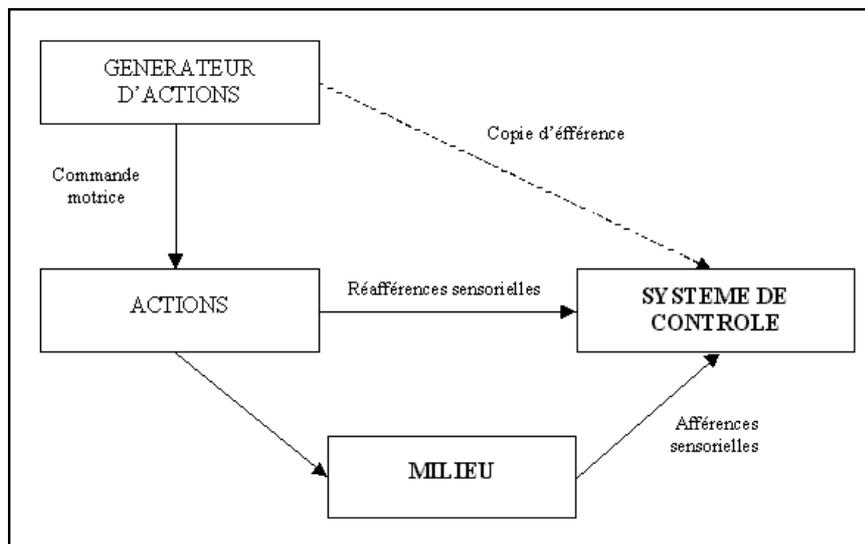
⁸¹ Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1990). *op. cit.* ; Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1991). *op. cit.* ; Gleason, P., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1996). *op. cit.* ; de Jong, K.J. (2001). *op. cit.* ; de Jong, K.J., Nagao, K. & Lim, B.M. (2002). *op. cit.*

⁸² MacKay *et al.* n'ayant pas précisé les formes rapportées, nous ne pouvons malheureusement pas conclure définitivement sur ce point. Pour une démonstration de l'efficacité de cette mesure dans l'étude de la stabilité des transformations verbales, voir Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

⁸³ Comme indiqué précédemment, l'élaboration progressive de représentations internes des unités de parole s'appuie sur la nature multimodale du système perceptif, la vision pouvant servir de relais aux mécanismes perceptifs (pour une revue, cf. Schwartz, J.-L., Abry, C., Boë, L.-J. & Cathiard, M.A. (2002). *op. cit.*). Dans le cadre de ces processus d'intégration

l'écoute attentive d'un même stimulus verbal répété en boucle, l'absence de mécanismes moteurs en relation avec la séquence entendue pourrait impliquer une plus faible cohérence multimodale entre les *possibles* réafférences sensorielles et décharges corollaires endogènes issues des actions du sujet (liées par exemple à une procédure d'immobilisation active des articulateurs) et les afférences sensorielles exogènes liées au flux sonore perçu (cf. Figure 9). Cette faible cohérence entre actions exécutées et actions perçues impliquerait ainsi une plus grande sollicitation des mécanismes attentionnels, permettant l'ouverture des canaux sensoriels auditifs à de nouvelles informations. Des interprétations alternatives du stimulus entendu prendraient alors périodiquement le contrôle sur les processus de jugement perceptif⁸⁴.

Figure 9 : Relations entre production et perception d'une action. Le contrôle de l'action dépend des signaux endogènes préalables à l'exécution de l'action (copies d'efférences), permettant d'anticiper le déroulement de l'action et les réafférences sensorielles motrices correspondantes, et des afférences sensorielles exogènes issues du milieu.



Le nombre moindre de transformations dans une condition de répétition interne par rapport à une condition de répétition externe, observé dans notre étude et celle de Reisberg et ses collègues, pourrait s'expliquer par l'absence de feedback auditif dans le cas d'une production interne ou silencieuse des sujets, impliquant une plus forte stabilité des représentations mnésiques des séquences répétées. Cependant, une explication de l'Effet de Transformation Verbale basée sur le seul traitement du signal acoustique ne peut en aucun cas rendre compte de la diminution progressive du nombre de transformations d'une condition de répétition silencieuse vers un condition de répétition mentale avec les articulateurs bloqués, observée dans l'expérience de Reisberg *et al.*, ni la remarquable convergence de résultats en termes d'attractivité des séquences dans notre étude. Ces résultats s'expliquent selon nous par une implication toujours moindre des aires sensori-motrices pendant la simulation mentale du mouvement par rapport au mouvement

multisensorielle, à la base selon nous de l'émergence des transformations verbales, il est donc à noter l'incidence possible des informations visuelles perçues par le sujet sur la stabilité des représentations. Afin de tester expérimentalement l'influence possible de la modalité visuelle sur l'émergence des transformations verbales, une expérience combinant les deux modalités, auditives et visuelles, est actuellement en cours de réalisation à l'ICP et consiste en la comparaison des patrons de stabilité et d'attractivité pouvant être observés lors de la perception prolongée des séquences /psə/ et /səp/ selon une présentation purement auditive, selon une présentation audio-visuelle impliquant la présentation conjointe et synchrone de stimuli audio et vidéo congruents et enfin selon la présentation conjointe de stimuli audio et vidéo non-congruents.

⁸⁴ Pour une description de la dynamique des transformations verbales, voir Ditzinger, T., Tuller, B., Haken, H. & Kelso, J.A.S. (1997). *op. cit.* ; Pöppel, E. (1997). *op. cit.* ; Pöppel, E. & Wittmann, R. (1999). *op. cit.*

exécuté⁸⁵ et, dans le cas critique de blocage des articulateurs, à une impossibilité de réaliser en même temps et avec les mêmes articulateurs une action imaginée différente d'une action réelle⁸⁶. Prises ensemble, ces données, liés selon nous à l'engagement des centres moteurs de contrôle et de production articulatoire, attestent donc de l'importance des représentations motrices dans l'émergence de nouvelles représentations et permettent de rejeter l'hypothèse des traitements acoustiques comme base unique des transformations verbales.

Contre-Hypothèses Lexicales et Phonologiques

Les résultats de cette étude démontrent un biais d'asymétrie des transformations verbales lié au degré de phasage entre gestes articulatoires des séquences répétées. Face aux différentes études ayant montré l'incidence de contraintes linguistiques de nature lexicale ou phonologique sur les transformations verbales, il apparaît nécessaire de tester l'influence de telles contraintes dans notre étude par l'analyse des résultats observés.

Comme précédemment souligné, les transformations verbales peuvent varier en fonction de différentes contraintes linguistiques telles que le statut lexical, la densité de voisinage et la fréquence lexicale du mot répété. Ainsi, des études ont montré une stabilité perceptive plus faible pour des pseudo-mots que pour des mots, et pour des pseudo-mots présentant une structure phonologique illégale dans le lexique du sujet par rapport à des pseudo-mots présentant une structure phonologique attestée⁸⁷. Etant donné qu'aucune des séquences utilisées dans cette étude n'apparaît en Français et que leurs structures sont toutes phonotactiquement attestées dans cette langue, le statut lexical de ces stimuli (soit ici des logatomes monosyllabiques) ne peut rendre compte des différences de stabilité et d'attraction observées. Un autre facteur linguistique pouvant intervenir sur les transformations est celui de la densité de voisinage de la séquence répétée (correspondant à l'étendue des entrées lexicales "phonologiquement" proches du stimulus original). Il a été montré qu'un nombre plus important de voisins lexicaux entraînait l'apparition de transformations lexicales plus nombreuses et variées⁸⁸. Cependant, cet effet de densité de voisinage lexical ne peut expliquer nos résultats. En effet, la faible stabilité des séquences /əps/ et /əsp/ observée dans les expériences ne peut être reliée aux valeurs de densité de voisinage correspondants, ces séquences présentant un nombre plus faible de voisins lexicaux que les autres séquences. Une autre interprétation concurrente de nos résultats pourrait provenir de la fréquence lexicale des stimuli utilisés. En effet, les séquences présentant une faible fréquence lexicale devraient être désavantagées, en terme de stabilité, par comparaison avec celles présentant une fréquence lexicale plus importante⁸⁹. Pour les séquences du Groupe 1, cet effet n'est pas en accord avec la plus grande attractivité de la séquence /psə/ par rapport à la séquence /səp/, malgré une fréquence lexicale plus importante de celle-ci. En revanche, dans le Groupe 2, la tendance systématique d'une plus grande stabilité et attractivité de la séquence /pəs/ par rapport à la séquence /spə/, bien qu'aucune différence significative n'apparaisse, pourrait être due à la fréquence lexicale plus importante pour /pəs/ que pour /spə/. Ce dernier résultat impliquerait donc un effet potentiel de la fréquence lexicale de ces séquences favorisant la syllabe /pəs/ lors des deux conditions expérimentales de répétition ouverte et interne.

Une autre interprétation concurrente de nos résultats pourrait être celle de contraintes portant sur la structure syllabique des séquences utilisées, structure pouvant entraîner l'existence de

⁸⁵ Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C., Segebarth, C., Morand, S., Gemignani, A., Decorps, M. & Jeannerod, M. (1996). *op. cit.* ; Porro, C.A., Francescato, M.P., Cettolo, V., Diamond, M.E., Baraldi, P., Suiani, C., Bazzocchi, M. & di Prampero, P.E. (1996). *op. cit.* ; Ehrsson, H.E., Geyer, S. & Naito, E. (2003). *op. cit.* Pour une revue, voir Jeannerod, M. & Frack, V. (1999). *op. cit.* ; Jeannerod, M. (2001). *op. cit.*

⁸⁶ Binet, A. (1886). *op. cit. in* Jeannerod, M. (2002). *op. cit.* ; Stricker, S. (1885). *op. cit. in* Sirigu, A. & Duhamel, J.R. (2001). *op. cit.*

⁸⁷ Natsoulas, T. (1965). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

⁸⁸ Yin, C. & MacKay, D.G. (1992). *op. cit.*

⁸⁹ MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.*

transformations préférentielles. Les données typologiques issues de la comparaison des langues du monde montrent une fréquence faible des syllabes de type VCC et CCV et une fréquence élevée des syllabes de type CVC⁹⁰ (voir la Table 9 pour un aperçu des fréquences des structures syllabiques extraites d'un échantillon représentatif de 14 langues géographiquement et génétiquement dispersées de la base de données ULSID). Nos résultats apparaissent en faveur de l'évitement des syllabes à début vocalique - les syllabes CVC et CCV ne se transforment pas en syllabe VCC. Cependant, le nombre important de transformations de /səp/ vers /psə/ n'est pas en accord avec la stabilité des syllabes CVC observée dans les langues du monde. Ce résultat permet donc de rejeter cette interprétation alternative de nos résultats basée sur la structure syllabique des séquences.

Table 9 : Fréquence en pourcentage des structures syllabiques de la base de données ULSID (UCLA – Lexical and Syllabic Inventory Database). D'après Vallée *et al.* (2000).

Type	Pourcentage	Type	Pourcentage
CV	.545	CCVC	.013
CVC	.362	CVCC	.006
V	.044	CCV	.005
VC	.025	VCC	.000

Ainsi, aucun de ces différents facteurs linguistiques ne peut expliquer réellement les patrons de transformations observés dans notre étude. Cependant, nos résultats apparaissent compatibles avec certains processus de resyllabification décrits dans les théories phonologiques de la syllabe et apparaissent pertinents face aux données psycholinguistiques sur la segmentation syllabique⁹¹.

Dans les deux groupes, les hiérarchies observées des séquences, en termes d'attractivité, respectent le principe de sonorité des constituants de la syllabe (*Sonority Sequencing Principle*) défini par Clements⁹². Dans son système, les segments sont classés en fonction de différents traits distinctifs - [\pm syllabique], [\pm ouvert], [\pm sonore] – de telle sorte que les voyelles présentent le plus haut degré de sonorité, suivies par les glides, les liquides, les nasales, les fricatives et finalement les occlusives. Initialement désigné pour rendre compte de la syllabification préférentielle dans les langues du monde de la syllabe CV, ce principe de sonorité postule une configuration de sonorité croissante en début de syllabe et décroissante en fin de syllabe. Ces règles de sonorité, en relation à d'autres approches communément proposées pour générer une syllabification préférentielle des consonnes en attaque et vers une syllabe ouverte⁹³, permettent de prédire une hiérarchie des séquences de type "/psə/ > /səp/ > /əps/", pour le Groupe 1, et de type, "/pəs/ > /spə/⁹⁴ > /əps/",

⁹⁰ Maddieson, I. (1984). *op. cit.* ; Vallée, N., Boë, L.J., Maddieson, I. & Rousset, I. (2000). *op. cit.*

⁹¹ Treiman, R. & Danis, C. (1988). Syllabification of intervocalic consonants. *Journal of Memory and Language*, 27: 87-104 ; Goslin, J. & Frauenfelder, U.H. (2000). *op. cit.* ; Content, A., Kearns, K.R. & Frauenfelder, U.H. (2001). Boundaries versus onsets in syllabic segmentation. *Journal of Memory and Language*, 45: 177-199 ; Meynadier, Y. (2001). *op. cit.* ; Dumay, N., Frauenfelder, U.H. & Content, A. (2002). The role of the syllable in lexical segmentation in French: Word-spotting data. *Brain and Language*, 81: 144-161.

⁹² Clements, G.N. (1990). The role of the sonority cycle in core syllabification. In: M.E. Beckman & J. Kingston (Eds), *Papers in Laboratory Phonology I: Between the grammar and the physics of speech*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 283-333.

⁹³ Par exemple, le principe d'attaque obligatoire (*Obligatory Onset Principle*) et celui d'ouverture maximale de la syllabe (*Principle of Maximum Open Syllabicity*), stipulant que la formation de l'attaque syllabique prévaut à la constitution de la coda. Malmberg, B. (1963). *Structural Linguistics and Human Communication. An Introduction into the Mechanism of Language and the Methodology of Linguistics*. New York: Academic Press ; Pulgram, E. (1970). *Syllable, Word, Nexus, Cursus*. The Hague: Mouton ; Hooper, J.B. (1972). The syllable in phonological theory. *Language*, 48: 525-540. Pour une revue, Goslin, J. & Frauenfelder, U.H. (2000). *op. cit.* ; Meynadier, Y. (2001). *op. cit.*

⁹⁴ Certaines études portant sur la syllabification de la structure /sp/, et de manière plus générale sur les groupes consonantiques composés de la fricative [s] suivie d'une occlusive (e.g., /sp/, /st/, /sk/), montrent un comportement syllabique singulier et ambigu dans bien des cas. Ainsi en Français, ces groupes peuvent apparaître à la fois en attaque et en coda de la syllabe. De plus, [s] est la seule fricative pouvant apparaître en attaque devant une occlusive dans un certain

pour le Groupe 2, hiérarchies en grande partie compatibles avec les patrons de stabilité et d'attractivité observés.

Cette étude pourrait selon nous apporter une contribution intéressante au débat sur la segmentation syllabique dans le domaine de la psycholinguistique. Ainsi, le pourcentage élevé de structures monosyllabiques rapportées, relativement aux processus de segmentation intersyllabique inhérents à la procédure de répétition utilisée, est conforme à l'idée de la syllabe comme unité fondamentale dans le traitement perceptif des séquences segmentales. De manière plus spécifique, certaines de nos données apparaissent pertinentes face aux résultats obtenus lors de tâches de segmentation syllabique. Ainsi, un nombre important de transformations non-envisagées présentent une structure syllabique incluant la même consonne en début d'attaque et en coda (soit les transformations de /psə/ ou /səp/ vers /psəp/, ou de /pəs/ vers /spəs/). Ce résultat pourrait dans une certaine mesure être relié aux données sur le phénomène d'ambisyllabité lors de la segmentation syllabique inverse de mots présentés auditivement, montrant une proportion non-négligeable de réponses incluant une même consonne intervocalique à la fois dans la première et dans la seconde syllabe rapportée (par exemple, /lɛ.pal/ pour /palɛ/). Une autre donnée intéressante est celle de la stabilité/attractivité forte de la séquence /psə/. Une étude sur la segmentation syllabique chez l'enfant a en effet montré la décomposition du mot capsule /capsyl/ en syllabes /ca/ et /psyl/, un résultat ne pouvant être expliqué par des contraintes linguistiques de nature lexicales ou phonologiques⁹⁵. De manière plus générale, les mécanismes dynamiques articulatoires en parole (coarticulation, phasages) pourraient apporter certaines explications aux données issues des expériences psycholinguistiques de segmentation perceptive. Enfin, un dernier résultat important est celui de la convergence des patrons d'attractivité observés entre la condition de répétition interne et celles de répétition ouverte, indiquant le maintien possible de processus spécifiques de syllabification/segmentation lors de tâches d'imagerie auditivo-verbale.

Cependant, une explication basée uniquement sur les théories et données phonologiques de syllabification ne peut rendre compte de la totalité des résultats de cette étude. En effet, les règles de syllabification présentées précédemment ne peuvent prédire complètement les hiérarchies d'attractivité et de stabilité observées, ni expliquer la tendance des séquences du Groupe 2 à basculer vers les séquences du Groupe 1, notamment vers la séquence /psə/ prédite comme la plus phasée. De plus, la combinaison des contraintes lexicales, des contraintes liées à la structure des séquences et des règles phonologiques de syllabification devrait favoriser la séquence /səp/ par rapport à la séquence /psə/ - la première présentant une fréquence lexicale plus importante et une structure syllabique CVC adaptée en terme de sonorité et de fréquence élevée dans les langues du monde. Ainsi, les prédictions basées sur la cohérence des gestes articulatoires des séquences, bien que reliées dans une certaine mesure aux principes phonologiques de syllabification, semblent fournir la meilleure explication des résultats obtenus, attestant ainsi de l'existence de contraintes purement motrices dans l'émergence des transformations verbales.

En résumé, nos résultats démontrent clairement l'existence d'un biais d'asymétrie dans le paradigme des transformations verbales. Le fait que les transformations préférentielles observées - en particulier le succès de la séquence monostable "tout phasé" /psə/ comparée à la séquence bistable /səp/ - ne puissent s'expliquer par des contraintes linguistiques universelles ou propres au Français est à nos yeux décisif pour une interprétation qui repose principalement sur l'influence de contraintes de contrôle de phasages articulatoires, avec un régime de contrôle moteur préférentiellement en phase. La conservation des patrons d'attractivité des séquences, d'une condition de répétition externe vers une condition de répétition mentale, tend dès lors à démontrer que des contraintes purement motrices peuvent participer à la construction des représentations mentales phonologiques.

nombre de langues, malgré un degré défini de sonorité supérieur à celui des occlusives. Voir Meynadier, Y. (2001). *op. cit.*

⁹⁵ Floccia, C. & Goslin, J. (2003). Où sont les frontières syllabiques en français? Le cas des clusters intervocaliques: Perspective développementale. *Journées d'Etudes Linguistiques du CIRLEP, Université de Reims.*

Résumé

L'objectif de cette étude est de montrer l'existence de contraintes purement motrices, liées à l'appareil périphérique articulatoire, dans l'émergence et l'analyse des représentations mentales phonologiques, substrats de la parole intérieure. Dans ce but, nous avons testé la sensibilité de l'Effet de Transformation Verbale, un phénomène d'illusion auditive adapté à l'étude des représentations et de la conscience phonologique, à des contraintes de production de la parole. Plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés aux variations de stabilité perceptive pouvant survenir lors de la répétition, ouverte ou interne, de séquences monosyllabiques et dépendantes de mécanismes dynamiques articulatoires. Les données expérimentales démontrent clairement l'existence d'un biais d'asymétrie des transformations observées, biais relevant de contraintes purement motrices, actionnelles, liées à la cohérence entre gestes articulatoires des séquences répétées. La conservation des patrons d'attractivité de ces séquences, d'une condition de répétition à voix haute vers une condition de répétition mentale, souligne la perméabilité des représentations mentales phonologiques à des contraintes purement motrices et atteste des liens unissant la représentation mentale d'une action et son exécution.

Mots clés: Effet de Transformation Verbale, Imagerie Auditive, Représentations Motrices, Phasages Articulatoires.

Abstract

Perceptual changes are experienced while repeating a speech form in a rapid and continuous way, an illusion known as the Verbal Transformation Effect. While verbal transformations are mostly considered to reflect the perceptual organization and interpretation of speech, the present study was designed to test whether this effect is sensitive to speech production constraints. To this aim, we examined whether variations in the articulatory cohesion of repeated nonsense words, specifically phase relationships between consonant gestures, can lead to perceptual asymmetries in verbal transformations. In a first experiment, French subjects repeatedly uttered nonsense syllables and were asked to stop as soon as they heard a possible syllable transformation. In agreement with our in-phase stability predictions, syllable transformation frequencies were highly associated with the phasing degree between intrasyllabic articulatory gestures. In a second experiment involving a covert repetition mode, we obtained evidence that this articulatory phasing effect persists without external speech movements. These experiments clearly demonstrate the existence of an asymmetric bias in the Verbal Transformation Effect, linked to the existence of articulatory phasing constraints. The persistence of this articulatory effect from an overt to a covert repetition procedure provides evidence that phasing stability constraints originating from the action system may participate in the temporary representation of phonological forms.

Keywords: Verbal Transformation Effect; Auditory Imagery; Articulatory Phasing; Speech Enactment.

- Chapitre III -

Un Corrélat Perceptif de l'Effet "LC"

Cognition depends upon the kinds of experience that come from having a body with various sensorimotor capacities [...] these individual sensorimotor capacities are themselves embedded in a more encompassing biological, psychological, and cultural context.

F.J. Varela⁹³

Introduction

Cette seconde étude, réalisée en collaboration avec Nathalie Vallée et Isabelle Rousset de l'équipe "Typologies et Langues du Monde" de l'Institut de la Communication Parlée, s'inscrit, bien que de manière indirecte, dans le cadre des recherches portant sur l'examen des interactions possibles entre les grandes tendances des systèmes phonologiques des langues du monde et les contraintes de production et de perception de la parole.

L'objectif de l'expérience présentée ci-dessous, utilisant le paradigme expérimental des transformations verbales lors d'une procédure de perception, consistait à tester la validité perceptive d'une tendance organisationnelle spécifique du langage, l'effet "LC", indiquant une alternance consonantique préférentielle de type Labiale-(Voyelle)-Coronale plutôt que Coronale-(Voyelle)-Labiale et dont les fondements seraient liés à des contraintes biomécaniques articulatoires. L'existence d'une asymétrie des transformations rapportées en faveur de la structure Labiale-Coronale attesterait ainsi de la validité perceptive de l'effet LC durant une tâche de transformation verbale et soulignerait de fait une interaction entre systèmes de production et de perception de la parole lors de la construction et l'émergence des représentations phonologiques.

Vers une Naturalité des Inventaires Phonologiques

Au-delà de la complexité et de la diversité des langues du monde, la démarche taxinomique en linguistique s'efforce de regrouper les langues en différents types, par l'observation de ressemblances et différences d'organisation structurelle, notamment par l'examen de possibles dépendances et indépendances distributionnelles des unités phoniques inter- et intra-syllabique⁹⁷. La linguistique Saussurienne puis le programme de recherche mis en place par le Cercle Linguistique de Prague, par une conception d'un système phonologique dé-substantialisé, réalisé arbitrairement et conditionné par le système des oppositions à l'intérieur d'une langue donnée, vont écarter un temps du champ d'investigation linguistique la question de la "naturalité" des inventaires phonologiques, soit l'examen des interactions possibles entre les grandes tendances des systèmes phonologiques des langues du monde et les contraintes de production et de perception de la parole⁹⁸. Bien que l'étude des relations forme/substance, au travers de l'idée d'un système universel de traits distinctifs binaires définissables en termes de paramètres articulatoires et acoustiques, ait été partiellement réhabilitée par Jakobson, Fant et Halle⁹⁹ puis par Chomsky et Halle¹⁰⁰, il faudra attendre les travaux de Liljencrants et Lindblom¹⁰¹ pour le véritable acte de

⁹⁶ Varela, F.J., Thompson, E. & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind. Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge, MIT Press.

⁹⁷ Les études des propriétés générales des langues nécessaires à leur classification concernent également les aspects syntaxiques, lexicaux, discursifs... Faute de connaissances sur le sujet, ces domaines d'études ne seront pas discutés ici. Pour une revue, voir Hagège, C. (1982). *La Structure des Langues*. Paris, Presses Universitaires de France.

⁹⁸ Boë, L.-J. & Liénard, J.S. (1988). La communication parlée est-elle une science ? Eléments de discussion et de réflexion suivis de repères chronologiques. *Actes des XVIIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, Nancy, pp. 79-92 ; Boë, L.-J. (1997a). Sciences phonétiques et relations forme/substance : 1. Un siècle de ruptures, négociations et réorganisations. *Histoire Epistémologie Langage*, XIX, 1: 5-41 ; Boë, L.-J. (1997b). Sciences phonétiques et relations forme/substance : 2. Du poids de la substance sur la forme aux réarticulations scientifiques. *Histoire Epistémologie Langage*, XIX, 2: 5-25.

⁹⁹ Jakobson, R., Fant, C.G.M. & Halle, M. (1952). *Preliminaries to Speech Analysis*. Cambridge, MIT Press.

¹⁰⁰ Chomsky, N. & Halle, M. (1968). *op. cit.*

(re)naissance d'une linguistique orientée substance. Les auteurs proposent alors l'hypothèse d'une sélection des unités phoniques à partir de contraintes physiologiques, articulatoires et perceptives, hypothèse permettant dès lors d'expliquer l'émergence des structures phonologiques des systèmes langagiers à la lumière des principes généraux de perception et d'action¹⁰².

Dans ce cadre, les travaux récents portant sur l'examen et interprétation des régularités des systèmes sonores des langues du monde, menés notamment à l'Institut de la Communication Parlée par Louis-Jean Boë et Nathalie Vallée, ont montré qu'à l'évidence, les langues, quelles que soient les familles linguistiques¹⁰³, n'exploitent pas arbitrairement les possibilités du conduit vocal et celles des systèmes auditif et visuels pour organiser leurs structures phonologiques. Ainsi, la typologie des systèmes consonantiques montre que les langues n'utilisent qu'un inventaire relativement restreint de consonnes alors qu'elles disposent potentiellement d'un nombre considérable de possibilités. De plus, les systèmes de lieux d'articulation privilégiés pour chaque mode montrent que le choix des consonnes est vraisemblablement conditionné dans une large mesure par des contraintes morpho-physiologiques¹⁰⁴.

La Théorie Frame-then-Content

Une découverte importante de ces recherches est celle de la correspondance des gestes consonantiques les plus fréquents dans les lexiques des langues du monde avec ceux produits lors du babillage, quelle que soit la langue maternelle de l'enfant. Ces données empiriques apparaissent en totale contradiction avec les thèses structuralistes et générativistes pour lesquelles la période de babillage ne correspond qu'à un stade de maturation, dont les productions ne possèdent pas de régularités phonologiques, ni de rapport avec les productions langagières¹⁰⁵. A l'opposé, un certain nombre de linguistes vont dès lors chercher à montrer que les systèmes phonétiques émergent en tant qu'adaptations aux contraintes de production et de réception du langage. Selon ces approches, la plupart des mouvements biologiques possèdent des caractéristiques structurales communes, basées sur une organisation coordonnée des articulateurs. Dans ce cadre, une avancée théorique importante est celle de la théorie *Frame-then-Content* de Peter MacNeilage et Barbara Davis¹⁰⁶. Cette théorie prend fondation sur une structure de l'organisation de la parole, constituée d'un cadre oscillatoire mandibulaire porteur de la syllabe (*frame*) et d'un contenu segmental venant moduler ce cadre (*content*). Pour les auteurs, ces deux composantes seraient contrôlées par deux systèmes moteurs distincts, un système prémoteur mésial incluant cortex cingulaire antérieur et aire motrice supplémentaire, responsable des cyclicités endogènes auto-générées, et un système prémoteur latéral associé en premier lieu à une activité extrinsèque, responsable de l'apprentissage exogène des contenus du système phonologique¹⁰⁷. Se basant notamment sur les productions de l'enfant lors

¹⁰¹ Liljencrants, J. & Lindblom, B.E.F. (1972). Numerical simulation of vowel quality systems: The role of perceptual contrast. *Language*, 48: 839-862.

¹⁰² Voir à ce sujet, le fameux débat opposant Jean Piaget et Noam Chomsky, partisans des théories constructivistes et innéistes, sur le développement des capacités intellectuelles et notamment du langage. Piaget, J. & Chomsky, N. (1975). *Théorie du Langage, Théorie de l'Apprentissage*. Paris, Le Seuil. Voir également, Mehler, J. & Dupoux, E. (1990). *Naître Humain*. Odile Jacob, Paris ; Pinker, S. (1994). *L'Instinct du Langage*. Paris, Odile Jacob.

¹⁰³ Pour une description géographique et génétique des familles linguistiques, voir Cavalli-Sforza, L. (1996). *Gènes, Peuples et Langues*. Paris, Editions Odile Jacob.

¹⁰⁴ Boë, L.-J. (1998). Les tendances des structures phonologiques: Le poids de la forme sur la substance. Typologies, modélisation et ontogenèse. In: Escudier, P., Feng, G., Perrier, P. & Schwartz, J.-L. (1998). *La Parole, des Modèles cognitifs aux Machines Communicantes*. Ecole des Techniques Avancées Signal, Image, Parole ; Vallée, N., Boë, L.J., Maddieson, I. & Rousset, I. (2000). *op. cit.*

¹⁰⁵ Jakobson, R. (1969). *Langage Enfantin et Aphasie*. Paris, Editions de Minuit ; Jakobson R. & Waugh, L. (1980). *op. cit.* Jakobson a notamment invoqué la période possible de silence entre le babillage et la production des premiers mots pour arguer d'une distinction fonctionnelle entre ces deux activités.

¹⁰⁶ MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (1990). Acquisition of speech production: Frames, then content. In: Jeannerod, M. (Editor), *Attention and Performance, XIII. Motor Representation and Control*. Hillsdale, NJ: Erlbaum: pp. 453-475 ; MacNeilage, P.F. (1998). *op. cit.* ; Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (2004). The frame/content theory of speech evolution: From lip smacks to syllables. *Primatologie, to appear*.

¹⁰⁷ Pour une description neuroanatomique de ces deux systèmes, et plus particulièrement du système mésial, voir Habib, M. & Galaburda, A.M. (1994). Fondements neuroanatomiques et neurobiologiques du langage. In: Seron, X. &

de la période de babillage, les auteurs vont alors proposer l'idée d'un cadre syllabique universel fournissant le premier principe structural du langage. Cette hypothèse rejoint ici les travaux sur la nature des inventaires phonologiques des langues du monde, notamment par l'universalité des schémas de babillage, contraints par les aspects biomécaniques articulatoires, et la présence commune de structures syllabiques préférentielles lors du babillage, lors de l'apparition d'un langage primitif chez l'enfant et dans les langues du monde. L'explication causale des schémas "pré-linguistiques" du babillage, des premiers mots, et de l'inventaire phonologique des langues reposerait en partie sur des contraintes biomécaniques.

Du babillage aux tendances universelles syllabiques

MacNeilage et Davis ont montré que la principale source de variation dans les composantes articulatoires du babillage (7-12 mois) est l'oscillation verticale de la mandibule (*frame dominance*), la capacité des autres articulateurs à faire varier leurs positions, de manière autonome, de segment en segment, ou même de syllabe en syllabe, étant extrêmement limitée¹⁰⁸. Ce manque d'indépendance des contrôles articulatoires autres que mandibulaires durant la séquence de base oscillatoire du babillage est caractérisée par une production syllabique associant préférentiellement les consonnes bilabiales avec les voyelles centrales (*pure frames* – e.g., /ba/). La phase d'élévation de l'oscillation mandibulaire, produisant la fermeture du conduit vocal, serait associée à la production du geste consonantique tandis que la phase de dépression permettrait la réalisation de la voyelle centrale (la langue restant dans une position neutre tout le long du cycle biphasique oscillatoire). Deux autres types syllabiques préférentiels, associant les consonnes coronales avec les voyelles frontales (e.g., /di/) et les consonnes dorsales avec les voyelles arrières (e.g., /ku/), sont également mis en évidence lors du babillage. Lors du mouvement biphasique mandibulaire pour ces deux types de syllabe, la langue adopterait donc une position commune aux deux gestes consonantique et vocalique (respectivement antérieure pour /di/ ou postérieure pour /ku/). Cette dominance du mouvement mandibulaire est aussi illustrée par le maintien de la configuration des autres articulateurs lors de la répétition de syllabes (*reduplicated babbling*). Enfin, même dans le cas de la production successive de syllabes différentes (*variegated babbling*¹⁰⁹), la variabilité syllabique proviendrait surtout de la variation de la hauteur de la mandibule, et donc de la langue (composante verticale), et non pas d'une variation du lieu de constriction (composante horizontale). Pour les auteurs, cette hypothèse d'un cadre syllabique préférentiel fournissant une première assise structurale du langage est confirmée notamment par l'observation des erreurs de production d'ordre sériel chez l'adulte, erreurs conservant la structure de la syllabe. Ainsi, les inversions segmentales proviennent en majorité du déplacement d'un segment consonantique ou vocalique vers une position similaire dans la structure syllabique, la contrainte de position à l'intérieur de la syllabe respecte donc l'interaction Consonne-Voyelle¹¹⁰. Un second argument est celui du caractère universel de la séquence CV dans les langues du monde¹¹¹. Enfin, différentes études ont confirmé la prédominance des trois patrons CV préférentiels observés dans le babillage, aussi bien lors de la période d'acquisition précoce du lexique chez les jeunes enfants (12-18 mois) dans des environnements linguistiques variés (Anglais, Français, Suédois, Japonais, Brésilien-Portugais,

Jeannerod, M. (Editors), *Neuropsychologie Humaine*, Liège, Mardaga, pp. 320-335 ; MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2001). *op. cit.* ; Abry, C., Laboissière, R. & Schwartz, J.-L. (1998). A new puzzle for the evolution of speech? *Behavioral and Brain Sciences*, 21: 512-513 ; Abry, C., Stefanuto, M., Vilain, A. & Laboissière, R. (2002). What can the utterance "tan-tan" of Broca's patient Leborgne tell us about the hypothesis of an emergent "babble-syllable" downloaded by SMA? In: Durand, J., Lacks, B. (Eds.), *Phonology: From Phonetics to Cognition*. Oxford University Press, Oxford, pp. 226-243.

¹⁰⁸ Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (1995). The articulatory basis of babbling. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38: 1199-1211.

¹⁰⁹ Il est à noter que même lors de l'apparition dans le babillage de l'enfant de syllabes successives différentes, la production majoritaire est celle de la répétition de syllabes identiques.

¹¹⁰ Voir également les productions spontanées des patients aphasiques de type Broca, depuis le fameux patient originel Leborgne de Paul Broca jusqu'au patient "pibi" de Dominique Cardébat de l'unité INSERM U455 de l'Université de Toulouse III, suggérant que l'aire motrice supplémentaire, intacte dans cette pathologie du langage, serait un candidat probable pour la réalisation auto-générée d'un cadre syllabique CV.CV. Pour une revue, Abry, C., Stefanuto, M., Vilain, A. & Laboissière, R. (2002). *op. cit.*

¹¹¹ Jakobson, R. (1966). *op. cit.* ; Maddieson, I. (1984). *op. cit.*

Equatorien-Quichua) que par l'analyse des entrées lexicales portant sur 22 langues géographiquement et génétiquement dispersées (Anglais, Français, Allemand, Estonien, Hébreu, Japonais, Maori, Espagnol, Quichua, Swahili, Wa, Kannada, Sora, Thaï, Nyahkur, Ngizim, Afar, Kanouri, Navaho, Kwakw'al, Yup'ik, Finnois)¹¹².

L'Effet LC

Une seconde tendance structurale est également observable dans les inventaires lexicaux des langues du monde et lors de la production des premiers mots chez le jeune enfant. Ce patron syllabique préférentiel, appelé effet LC, se caractérise par une tendance dans l'organisation phonologique en début de mots à favoriser une alternance consonantique de type Labiale-Coronale par rapport à une alternance consonantique de type Coronale-Labiale, ce, aussi bien dans les structures phonologiques CVC que CV.CV (par exemple les structures /pat/ et /bada/ sont plus fréquentes, respectivement, que /tap/ et /daba/). Cette préférence structurale a été ainsi observée lors de la phase précoce d'acquisition lexicale pour des enfants de cinq langues différentes¹¹³, dans le lexique de 21 langues¹¹⁴ (voir ci-dessus, excepté pour le Japonais) et dans le corpus de mots issus d'un proto-langage défini sur la base d'une classification des familles linguistiques en fonction de considérations géographiques et génétiques¹¹⁵. Selon la théorie *Frame-then-Content*, l'effet LC est le premier stade systématique vers une différenciation intersyllabique lexicale chez l'enfant. La période d'interfaçage des épisodes vocaux de l'enfant avec les concepts lexicaux de son environnement linguistique entraînerait dans un premier temps un biais de production vers des mots impliquant une répétition de la structure CV Bilabiale-Centrale ("papa", "maman", "dady", "mummy"...), cette structure étant la plus "simple" du point de vue articulatoire (*pure frame*). L'augmentation de la complexité des productions lexicales serait liée à la nécessité des contrastes lexicaux impliquant un patron inter-syllabique discontinu¹¹⁶. Les variations intercycliques se feraient dès lors dans un ordre préférentiel et "naturel" impliquant dans un premier temps une réalisation articulatoire syllabique purement mandibulaire suivie de l'addition d'un mouvement lingual lors de la réalisation du cadre syllabique suivant¹¹⁷. La maturation des capacités perceptives et cognitives de l'enfant permettrait conjointement une augmentation de la reconnaissance et de l'apprentissage des unités sonores pertinentes et de leurs régularités/organisation au sein de son environnement linguistique¹¹⁸.

Dans ce cadre, la validité perceptive de l'Effet LC, jusqu'alors non démontrée, permettrait d'arguer en faveur d'une interaction entre les systèmes de production et de perception de la parole lors de la construction et l'émergence des représentations mentales phonologiques et, de manière indirecte, d'ancrer les régularités des systèmes phonologiques des langues du monde dans les principes généraux de perception et d'action.

¹¹² MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2000). *op. cit.*, Matyear, C.M. & Kinney, A. (2000). *op. cit.* ; Rousset, I. (2003). *op. cit.*

¹¹³ Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (2003). Universal intrasyllabic patterns in early acquisition. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, Barcelona, pp. 387-390.

¹¹⁴ MacNeilage, P.F., Davis, B.L., Matyear, C.M. & Kinney, A. (2000). *op. cit.* ; Rousset, I. (2003). *op. cit.*

¹¹⁵ Bengston, J.D. & Ruhlen, M. (1994). Global etymologies. In: Ruhlen, M. (Editor), *On the Origin of Language*. Stanford, Stanford University Press. Voir également, Cavalli-Sforza, L. (1996). *op. cit.*

¹¹⁶ Comme stipulé dans le principe phonologique de contour obligatoire (*Obligatory Contour Principle*) impliquant la réalisation d'une consonne et/ou une voyelle différente entre deux syllabes successives. Kenstowicz, M. (1994). *Phonology in Generative Grammar*. Blackwell, Oxford Press.

¹¹⁷ MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2000). *op. cit.* ; MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2003). Intersyllabic and word-level regularities in early acquisition. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, Barcelona, pp. 383-386.

¹¹⁸ Pour une revue, voir de Boysson-Bardies, B. (1996). *Comment la Parole Vient aux Enfants*. Paris, Odile Jacob.

Expérience de Transformation Verbale : Procédure de Perception

L'objectif de l'expérience présente était de tester la validité perceptive de l'effet LC lors d'une procédure expérimentale de transformation verbale, par l'examen du nombre et de la durée de stabilité perceptive des transformations rapportées. Cette expérience consistait en une écoute répétée de stimuli réversibles dissyllabiques de formes Labiale-Coronale et Coronale-Labiale : Une asymétrie des transformations en faveur de la structure Labiale-Coronale attesterait ainsi de la validité perceptive de l'effet LC durant la tâche de transformation verbale.

Méthode Expérimentale

Sujets

Vingt-quatre étudiants de l'Université Stendhal de Grenoble participèrent à l'expérience. Les sujets, tous francophones et ne présentant pas de troubles auditifs ou articulatoires manifestes¹¹⁹, se présentèrent individuellement au test sans avoir été au préalable renseignés sur l'expérience.

Matériel Phonétique

Trois paires de mots dissyllabiques de structure phonologique CV.CV ont été sélectionnées à partir de la base de données lexicales de la langue Française VoCoLex¹²⁰ (~105000 mots). Pour chaque paire de mots, le patron consonantique consistait en l'alternance des deux consonnes bilabiale [p] et coronale [t], tandis que la voyelle était fixe et choisie parmi l'une des trois voyelles antérieure ouverte [a], antérieure fermée non-arrondie [i] ou postérieure fermée arrondie [o].

Les trois paires de mots réversibles ainsi obtenues – soit, /pa.ta/-/ta.pa/, /pi.ti/-/ti.pi/, /po.to/-/to.po/ - présentent un même point d'isolation¹²¹ (4 phonèmes) et une faible fréquence lexicale d'usage (intervalle : 0-5). Les valeurs de fréquence lexicale et de densité de voisinage, calculées pour les six séquences correspondent respectivement au nombre d'entrées lexicales incorporant, quelle que soit sa position dans le mot, une structure syllabique identique à celle de la séquence et au nombre d'entrées lexicales pouvant être générées par le remplacement, l'addition ou la suppression d'un des phonèmes de la séquence¹²². Pour ces deux mesures, la somme (*sfu*) et

¹¹⁹ Un questionnaire fut mené en ce sens auprès des participants ; Ceux-ci déclarèrent ne pas être, ou avoir été, sujets à des troubles de perception et/ou de production de la parole.

¹²⁰ Dufour, S., Peereman, R., Pallier, C. & Radeau, M. (2002). *op. cit.*. La séquence /tipi/ n'est pas incluse dans la base de données VoCoLex. Cependant, le statut lexical de cette séquence est attesté par sa présence dans le Dictionnaire Universel du Français Parlé (© Hachette-Edicef / Aupelf-Uref). Il est à noter également le statut lexical ambigu de la séquence /pa.ta/ qui, bien que présente au sein de la base de données VoCoLex, n'est pas mentionnée dans les dictionnaires classiques de Langue Française. Cependant, conformément aux données montrant une stabilité plus faible pour des pseudo-mots que pour des mots, l'emploi de la séquence /pa.ta/ ne devrait pas favoriser une stabilité perceptive plus importante de cette séquence par comparaison avec la séquence associée /ta.pa/.

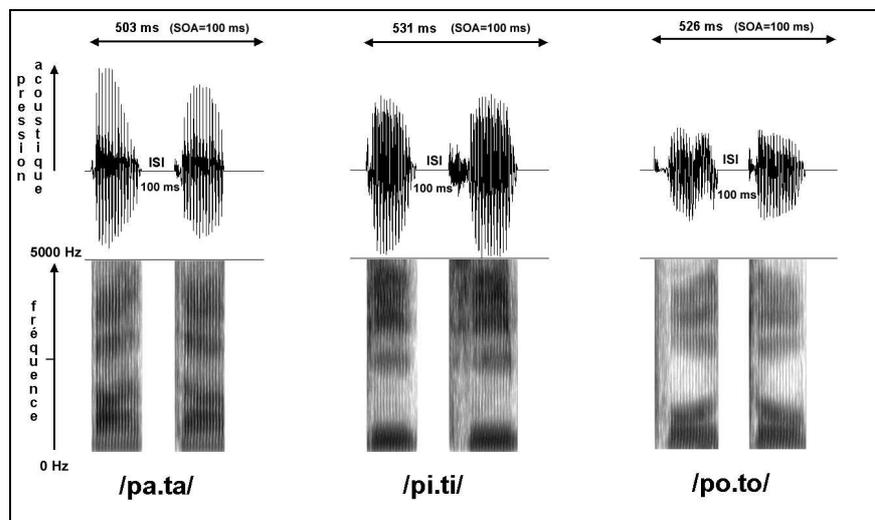
¹²¹ Le point d'unicité comme facteur lexical correspond à l'hypothèse "classique" d'un traitement de la parole optimalement adapté à une distribution séquentielle de l'information acoustique et, de manière plus spécifique, à une sélection des possibles candidats lexicaux à l'aide des premiers phonèmes perçus. Chaque nouveau phonème rentrant élimine ainsi les mots ne s'appariant plus avec l'information acoustique. Un mot est reconnu lorsqu'il est le seul candidat possible. Voir Dufour, S., Peereman, R., Pallier, C. & Radeau, M. (2002). *op. cit.*

¹²² Luce, P.A., Pisoni, D.B. & Goldinger, S.D. (1990). *op. cit.*

l'intervalle des fréquences d'usage¹²³ associées aux entrées lexicales sont indiquées (en nombre d'occurrences par million). La valeur de fréquence lexicale est de 19 pour /pa.ta/ (*sfu*: 4, intervalle: 0-3), de 10 pour /ta.pa/ (*sfu*: 5, intervalle: 0-3), de 7 pour /pi.ti/ (*sfu*: 0), de 11 pour /ti.pi/ (*sfu*: 12, intervalle: 0-6), de 6 pour /po.to/ (*sfu*: 9, intervalle: 0-5) et de 11 pour /to.po/ (*sfu*: 5, intervalle: 0-3). La valeur de densité de voisinage est de 71 pour /pa.ta/ (*sfu*: 233, intervalle: 0-62), de 55 pour /ta.pa/ (*sfu*: 172, intervalle: 0-62), de 22 pour /pi.ti/ (*sfu*: 705, intervalle: 0-96), de 29 pour /ti.pi/ (*sfu*: 312, intervalle: 0-69), de 39 pour /po.to/ (*sfu*: 152, intervalle: 0-29) et de 30 pour /to.po/ (*sfu*: 41, intervalle: 0-9).

Des analyses effectuées sur les structures dissyllabiques de forme générale /L_aV.C_oV/ et /C_oV.L_aV/ (L_a: Labiale, C_o: Coronale) montre une fréquence lexicale plus forte pour les structures Labiale-Coronale que pour les structures Coronale-Labiale. Ainsi, le nombre d'entrées lexicales incorporant, quelle que soit sa position dans le mot, l'une des deux structures est de 5808 pour la structure Labiale-Coronale et de 2193 pour la structure Coronale-Labiale (ratio = 1.99:1). Il est à noter que cette dominance des structures Labiale-Coronale dans le lexique français se retrouve également en début de mot. En effet, le nombre d'entrées lexicales incorporant à l'initiale du mot l'une des deux structures syllabiques est de 2570 pour la structure Labiale-Coronale et de 1751 pour la structure Coronale-Labiale (ratio = 1.47:1). Ces résultats permettent donc d'attester de la réalité de l'effet LC dans la langue française, bien que cette dominance de la structure phonologique Labiale-Coronale soit plus faible que celles trouvées dans des études portant sur la période d'acquisition du lexique chez les jeunes enfants ou sur l'analyse de corpus lexicaux des langues du monde¹²⁴.

Figure 10 : Organisation temporelle des séquences /pa.ta/, /pi.ti/ et /po.to/. Pour chacune des séquences, le signal acoustique est présenté conjointement avec le spectrogramme correspondant (représentations des temps en abscisse et fréquences acoustiques en ordonnée).



Un ensemble de séquences CV, /pa/, /ta/, /po/, /to/, /pi/, /ti/, fut enregistré dans une chambre sourde par un phonéticien expert de langue maternelle Française (Jean-Luc Schwartz) et transféré sous format numérique à une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz (codage sur 16 bits). Pour

¹²³ Les valeurs fréquentielles incorporées dans Vocolex sont extraites de la base de données lexicale du Français écrit, Frantext (Laboratoire "Analyse et Traitement de la Langue Française", Université de Nancy).

¹²⁴ Ainsi Barbara Davis et Peter MacNeilage ont trouvé un ratio des co-occurrences /L_aVC_o/ vs. /C_oVL_a/ de 2.55:1 dans un étude portant sur la production des premiers mots chez 10 enfant de langue anglaise, MacNeilage *et al.* un ratio de 2.23:1 dans une étude portant sur les entrées lexicales de 10 langues, Isabelle Rousset un ratio de 2.39:1 (structure /L_aV.C_oV/ vs. /C_oV.L_aV/) et de 1.44:1 (structure /L_aVC_o/ vs. /C_oVL_a/) dans une étude portant sur un échantillon de 14 langues géographiquement et génétiquement dispersées représentatif de la base de données ULSID (UCLA Lexical and Syllabic Inventory Database). Voir Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (1995). *op. cit.* ; MacNeilage, P.F., Davis, B.L., Matyear, C.M. & Kinney, A. (2000). *op. cit.* ; Rousset, I. (2003). *op. cit.*

chaque structure CV, une séquence unique fut sélectionnée, de manière à homogénéiser entre chaque paire de séquences les caractéristiques des signaux acoustiques (durée, pitch, intensité, formants vocaliques – notamment, une différence de la valeur du pitch inférieure à 2 Hz à l'intérieur du noyau vocalique et entre les deux noyaux vocaliques de chaque paire de séquences). Les trois paires de formes dissyllabiques CV.CV ont alors été créées en insérant dans un fichier unique les deux séquences CV appropriées¹²⁵. La durée moyenne des séquences était de 520 ms (min: 503 ms - max: 531 ms, l'intervalle inter-stimuli [ISI] entre deux séquences CV et l'intervalle séparant le début de deux paires bisyllabiques consécutives [SOA – Stimulus Onset Asynchrony] étaient de 100 ms – voir la Figure 10).

Procédure

Les stimuli furent présentés au travers d'un casque audio à un niveau sonore confortable. Les transformations rapportées furent enregistrées au moyen d'un microphone placé devant le sujet et directement transférées sous format numérique à une fréquence d'échantillonnage de 22.05 kHz (codage sur 16 bits).

La consigne consistait en l'écoute attentive d'une séquence, répétée en boucle, et de signaler tout changement perceptif pouvant survenir lors de cette répétition. Il était indiqué que ces transformations pouvaient être subtiles ou très importantes et correspondre aussi bien à des mots qu'à des pseudo-mots. Une phase d'essai liée à l'écoute répétée d'un pseudo-mot (/to.pa/) permettait de s'assurer de la compréhension de la procédure expérimentale par le sujet et de vérifier les niveaux d'écoute et d'enregistrement¹²⁶. Durant la période de test proprement dite, les 6 séquences étaient répétées chacune 300 fois, l'ordre de présentation étant contrebalancé entre les sujets¹²⁷. La durée totale de l'expérience était d'approximativement 30 minutes, des temps de repos étaient offerts après chaque écoute. Le nombre de transformations et la durée perceptive associée pour chacune des formes phonologiques perçues (lexicales ou non) ont été extraits des enregistrements pour chaque sujet et chaque séquence. La durée de stabilité perceptive correspond à la somme des périodes de temps liées à la perception d'une forme par le sujet.

Résultats

L'ensemble des analyses statistiques présentées ci-dessous concernent l'examen de possibles différences entre chaque paire de stimuli (*Effet Vocalique*, dépendant du type de voyelle, i.e. /pa.ta/-/ta.pa/ vs. /pi.ti/-/ti.pi/ vs. /po.to/-/to.po/), entre chaque forme dissyllabique possible (*Effet Consonantique*, dépendant de l'ordre des consonnes, i.e. /pV.tV/ vs. /tV.pV/) ou, enfin, liées à l'interaction de ces deux effets.

Analyse Globale

La Table 10 présente le nombre moyen de transformations et de formes uniques rapportées par les vingt-quatre sujets pour les six séquences.

Nombre de transformations. De manière à tester des différences possibles relatives au nombre de transformations perçues, nous avons procédé à une analyse à deux facteurs et à mesures répétées de la variance (ANOVA) du nombre de transformations, avec le type de voyelle et l'ordre des consonnes désignés comme variables indépendantes. Cette analyse montre un effet consonantique significatif [$F(1,23) = 4.61$, $MSe = 184.51$, $p < .05$], les stimuli de type /pV.tV/ représentant en moyenne 2.26 de transformations de plus que les stimuli de type /tV.pV/, un effet vocalique (marginale) non significatif [$F(2,46) = 3.11$, $MSe = 203.67$, p supérieur à .05, choisi comme

¹²⁵ Suite à l'expérience, l'analyse des formes initialement rapportées par les sujets ont permis d'estimer la bonne intelligibilité des séquences ainsi construites. En effet, seules 3 séquences sur les 144 formes (24*6) initialement rapportées ne correspondent pas à la séquence répétée.

¹²⁶ Cette procédure expérimentale est en tout point similaire à celle utilisée par Shoaf et Pitt (2002). *op. cit.*

¹²⁷ Les 12 ordres de présentation sélectionnés consistaient en l'alternance systématique des séquences de type /pV.tV./ et /tV.pV/, excluant la présentation successive de deux séquences incluant la même voyelle. Par exemple : /ta.pa/, /pi.ti/, /to.po/, /pa.ta/, /ti.pi/ et /po.to/.

seuil statistique critique] et une interaction entre les deux effets non significative [$F(2,46) = 0.60$, $MSe = 43.97$, N.S.].

Nombre de formes uniques. Une ANOVA à deux facteurs et à mesures répétées du nombre de formes uniques rapportées ne montre aucune différence significative liée à un effet consonantique [$F(1,23) = 0.01$, $MSe = 0.03$, N.S.], à un effet vocalique [$F(2,46) = 1.83$, $MSe = 10.02$, N.S.] ou à une interaction entre les deux effets [$F(2,46) = 0.40$, $MSe = 1.22$, N.S.].

Table 10 : Expérience de Transformation Verbale, procédure de perception. Moyennes du nombre de transformations et de formes uniques rapportées en fonction des séquences (ET : Ecart-type – N =24).

Stimulus	Transformations		Formes Uniques	
	M	ET	M	ET
/pa.ta/	26.58	16.11	3.83	2.35
/ta.pa/	22.67	14.06	4.21	1.93
/pi.ti/	24.04	12.26	4.33	1.97
/ti.pi/	23.87	13.21	4.29	2.14
/po.to/	29.17	16.45	5.04	3.62
/to.po/	26.46	12.60	4.79	2.78

Test d'un couplage par paire des transformations

Un niveau supplémentaire d'analyse statistique a été appliqué sur nos données afin de tester de possibles groupements perceptifs des transformations. De manière à obtenir une mesure plus précise de la stabilité perceptive des séquences que ne le permettait l'analyse globale du nombre de transformations et de formes uniques rapportées, toutes les transformations rapportées par les sujets durant la procédure d'écoute attentive ont alors été classées en fonction de leur adéquation au stimulus répété (e.g., nombre de réponses /pa.ta/ lors de l'écoute répétée du stimulus /pa.ta/), à la forme inverse associée au stimulus répété (e.g., nombre de réponses /ta.pa/ lors de l'écoute répétée du stimulus /pa.ta/) ou à une autre transformation (e.g., nombre de réponses différentes des séquences /pa.ta/ et /ta.pa/ lors de l'écoute répétée de la séquence /pa.ta/, par exemple /ba.ta/).

Ainsi, par transformation, nous entendons toute réponse rapportée par le sujet différente de la réponse précédente. En ce sens, la forme initialement rapportée par le sujet en tout début d'expérience (cf. Note 125, p. 55) n'a pas été prise en compte dans le calcul du nombre de transformations. Il en est de même dans le cas d'une même réponse rapportée deux fois consécutivement, la seconde réponse n'étant pas prise en compte dans l'analyse du nombre de transformations¹²⁸.

La Table 11 présente les fréquences et nombres moyens des transformations rapportées vers le stimulus répété, vers sa forme inverse associée ou vers une autre transformation. Ces fréquences correspondent respectivement à 36.5%, 34% et 29% du nombre total des transformations. Nous avons procédé à des ANOVA à deux facteurs et à mesures répétées de la variance (ANOVA) du nombre de transformations, ce, pour les trois groupements perceptifs (soit le nombre de transformations présentant une forme identique à la séquence répétée, une forme inverse associée ou ne correspondant pas à l'une de ces deux formes).

L'analyse statistique du nombre de transformations de forme identique à la séquence répétée montre un effet consonantique significatif [$F(1,23) = 9.82$, $MSe = 169.00$, $p < .01$], les stimuli de type /pV.tV/ représentant en moyenne 2.17 de transformations de plus que les stimuli de type /tV.pV/, un effet vocalique non significatif [$F(2,46) = 2.60$, $MSe = 39.17$, N.S.] et une interaction

¹²⁸ Pour une démonstration de la validité d'une telle mesure, voir Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

entre les deux effets non significative [$F(2,46) = 0.08$, $MSe = 1.90$, N.S.]. L'analyse statistique du nombre de transformations de forme inverse associée à la séquence répétée ne montre aucune différence significative liée à un effet consonantique [$F(1,23) = 0.73$, $MSe = 14.70$, N.S.], à un effet vocalique [$F(2,46) = 0.89$, $MSe = 15.26$, N.S.] ou à une interaction entre les deux effets [$F(2,46) = 0.65$, $MSe = 33.01$, N.S.]. Enfin, l'analyse statistique du nombre de transformations de forme différente de la séquence répétée et de sa forme inverse associée ne montre aucune différence significative liée à un effet consonantique [$F(1,23) = 1.32$, $MSe = 19.51$, N.S.], à un effet vocalique [$F(2,46) = 0.65$, $MSe = 33.01$, N.S.] ou à une interaction entre les deux effets [$F(2,46) = 1.04$, $MSe = 25.01$, N.S.].

Table 11 : Expérience de Transformation Verbale, procédure de perception. Fréquence et nombre moyen des transformations présentant une forme identique à la séquence répétée, à la forme inverse associée à la séquence répétée ou présentant une forme différente. Les transformations de type Labiale-Coronale sont mises en valeur (ET : Ecart-type - $N = 24$).

Stimulus	Type de Transformation								
	Forme identique à la séquence répétée			Forme inverse associée à la séquence répétée			Autres Transformations		
	%	M	ET	%	M	ET	%	M	ET
/pa.ta/	.37	9.96	8.34	.30	8.04	9.18	.32	8.58	8.02
/ta.pa/	.33	7.42	7.05	.37	8.42	7.19	.30	6.83	7.22
/pi.ti/	.41	9.79	6.57	.34	8.17	6.75	.25	6.08	5.57
/ti.pi/	.34	8.04	7.82	.37	8.83	7.54	.29	7.00	6.13
/po.to/	.39	11.46	7.52	.30	8.87	8.59	.30	8.83	10.49
/to.po/	.35	9.25	6.85	.37	9.75	6.20	.28	7.46	9.16

Ainsi, la distribution des transformations observées montre que la principale organisation perceptive des formes rapportées est celle d'un couplage par paire entre la séquence répétée et la séquence inverse associée, représentant en moyenne 71 % des transformations observées (intervalle: 0.69 - 0.73). De plus, l'analyse des transformations vers la séquence répétée explique en grande partie l'effet consonantique précédemment observé dans l'analyse globale du nombre de transformations. Cette différence de stabilité perceptive dépend ainsi dans une large mesure de la fréquence à laquelle les stimuli de forme /pV.tV/, par comparaison aux stimuli de forme /tV.pV/, sont perçus durant l'expérience. Ce résultat apparaît conforme aux données montrant que la stabilité perceptive des transformations serait dépendante d'un mécanisme de récupération (ou de rétablissement)¹²⁹. Cependant, ce mécanisme est ici plus important pour les stimuli de structure phonologique Labiale-Coronale que pour les stimuli de structure phonologique Coronale-Labiale. La primauté de ce mécanisme de récupération est aussi indirectement montrée par les analyses des transformations de forme inverse associée au stimulus répété ou de forme différente, analyses ne montrant aucune différence significative entre les stimuli.

La Table 12 présente la fréquence des transformations rapportées en fonction de leur structure phonologique. Ces données indiquent en particulier une fréquence importante des transformations de type Labiale-Coronale ou Coronale-Labiale, différentes de la séquence répétée et de sa forme réversible associée, représentant en moyenne 15% de l'ensemble des transformations rapportées. Pour ces transformations, on trouve une nette dominance des structures Labiale-Coronale (11%) par rapport aux structures Coronale-Labiale (4%). Les transformations de type CV.CV de structure différente sont extrêmement minoritaires, représentant moins de 1% de l'ensemble des

¹²⁹ Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.* ; Ditzinger, T., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1997). *op. cit.*

transformations. Enfin, il est à noter que 61% des transformations, différentes de la séquence répétée et de sa forme inverse associée, étaient de nature non lexicale.

Table 12 : Fréquence en pourcentage des principales structures syllabiques des transformations rapportées.

Type	Pourcentage	Type	Pourcentage
/pV.tV/	.38	CCV.CV	.02
/tV.pV/	.33	CV.CV	.01
/LaV.CoV/	.11	CV.CVC	.02
/CoV.LaV/	.04	V.CV	.04

Test d'une structure syllabique préférentielle des transformations

Afin d'évaluer la validité perceptive de l'effet LC, les transformations vers la séquence répétée ou vers la forme inverse associée ont alors été classées en fonction de leur structure phonologique de type Labiale-Coronale ou Coronale-Labiale (i.e., /pV.tV/ ou /tV.pV/). Une asymétrie des transformations en faveur de la structure Labiale-Coronale attesterait ainsi de la validité perceptive de l'effet LC durant la tâche de transformation verbale.

Pour chacune des séquences répétées, le nombre de transformations vers la forme /pV.tV/ est toujours plus important que celui des transformations vers la forme /tV.pV/ (38% vs. 33%, voir les colonnes "Forme identique à la séquence répétée" et "forme inverse associée à la séquence répétée" de la table 11). Un test *t* effectué sur le nombre de transformations rapportées montre une différence significative entre ces deux structures [$t(1,143) = 3.40, p < .001$], avec en moyenne 1.40 transformations de plus vers les stimuli de forme /pV.tV/ que vers les stimuli de forme /tV.pV/. Des comparaisons individuelles menées en fonction de l'effet vocalique, avec correction de Bonferroni, ne montrent pas de différences significatives pour [a] [$t(1,47) = 1.63, N.S.$], pour [i] [$t(1,47) = 2.42, N.S.$] et pour [o] [$t(1,47) = 2.16, N.S.$]. Pris ensemble, ces résultats attestent donc d'une asymétrie globale des transformations en faveur de la structure Labiale-Coronale.

Table 13 : Expérience de Transformation Verbale, procédure de perception. Fréquence et durée moyenne de stabilité perceptive des transformations présentant une forme identique à la séquence répétée, à la forme inverse associée à la séquence répétée ou présentant une forme différente. Les transformations de type Labiale-Coronale sont mises en valeur (ET : Ecart-type - N = 24).

Stimulus	Type de Transformation								
	Forme identique à la séquence répétée			Forme inverse associée à la séquence répétée			Autres Transformations		
	%	Durée	ET	%	Durée	ET	%	Durée	ET
/pa.ta/	.42	62.88	27.81	.26	39.95	31.23	.32	48.04	39.76
/ta.pa/	.29	43.39	28.74	.37	56.34	32.09	.34	50.64	43.71
/pi.ti/	.36	57.20	26.19	.36	56.65	35.04	.28	44.31	45.47
/ti.pi/	.32	50.87	33.89	.33	52.85	28.36	.34	54.11	46.80
/po.to/	.43	67.83	27.95	.29	46.37	31.41	.28	43.70	42.92
/to.po/	.29	46.41	26.85	.42	65.97	32.68	.29	45.52	43.04

Afin d'étudier davantage cette asymétrie perceptive, nous avons alors comparé la durée de stabilité perceptive des formes observées. La Table 13 présente les fréquences et durées de stabilité

perceptive moyennes des transformations rapportées vers la séquence répétée, vers sa forme inverse associée ou vers une autre transformation. Ces fréquences correspondent respectivement à 35%, 34% et 31% de la durée totale d'écoute des six séquences.

L'organisation perceptive des transformations en un couplage par paire entre la séquence répétée et la séquence inverse associée est de nouveau observée pour cette mesure, la stabilité perceptive de ces deux types de transformations représentant en moyenne 69% de la durée totale d'écoute des stimuli (intervalle: 0.66 - 0.72). De plus, la convergence des résultats du nombre et de la durée de stabilité perceptive des transformations identiques à la séquence répétée ou à la forme inverse associée est attestée par une corrélation positive forte entre les deux mesures (.60 et .66, respectivement)¹³⁰. Comme observé précédemment pour le nombre de transformations, pour chacune des séquences répétées, la durée de stabilité perceptive des transformations vers les séquences de type /pV.tV/ est toujours plus importante que celle des transformations vers les séquences de type /tV.pV/ (voir les colonnes "Forme identique à la séquence répétée" et "forme inverse associée à la séquence répétée" de la table 13). Un test *t* unilatéral effectué sur la différence de durée de stabilité entre ces deux types de transformation (i.e., /pV.tV/ - /tV.pV/) montre un effet global significatif [$t(1,143) = 3.73, p < .001$], avec une durée moyenne de stabilité perceptive supérieure de 13.24s. pour les transformations de type /pV.tV/. Cependant, les différences de durée de stabilité perceptive (/pV.tV/ - /tV.pV/) varient considérablement en fonction de l'effet vocalique. Cette différence est importante pour [a] (+17.94s.) et [o] (+20.51s.) et faible pour [i] (+1.26s.). Les résultats des comparaisons statistiques individuelles relatives à l'effet vocalique, avec correction de Bonferroni, montrent un effet significatif pour [a] [$t(1,47) = 2.90, p < .05$] et [o] [$t(1,47) = 3.39, p < .005$] mais aucun effet pour [i] [$t(1,47) = 0.21, N.S.$].

Discussion

L'examen du nombre et de la durée de stabilité perceptive des transformations rapportées montre que la principale organisation des transformations est celle d'un couplage par paire entre la séquence répétée et la séquence inverse associée, représentant en moyenne 71 % des transformations observées et 69% de la durée totale d'écoute des stimuli. Les différences de stabilité perceptive sont dues dans une large mesure aux différences de fréquence à laquelle les stimuli de forme /pV.tV/, par comparaison aux stimuli de forme /tV.pV/, sont perçus durant l'expérience. Ces résultats suggèrent donc l'existence d'un mécanisme de récupération des transformations plus important pour les séquences Labiale-Coronale que pour les séquences Coronale-Labiale. Enfin, ces analyses du nombre et de la durée de stabilité des transformations rapportées montrent également toutes deux une nette dominance des transformations de type Labiale-Coronale par rapport aux transformations de type Coronale-Labiale et attestent donc d'une asymétrie des transformations en faveur de la structure Labiale-Coronale.

¹³⁰ Ces indices de corrélation entre nombres de transformations et durées de stabilité perceptive ont été calculés pour l'ensemble des sujets par comparaison du nombre de formes rapportées correspondant à la séquence répétée (ou correspondant à la forme inverse associée à la séquence répétée) et de la durée totale de stabilité perceptive pour ces formes (soit, par exemple, la comparaison du nombre total de formes /pa.ta/ rapportées par chacun des sujets lors de l'écoute répétée de cette même séquence et de la durée globale de stabilité perceptive associée à cette forme). Ce résultat suggère donc que, pour l'ensemble des sujets, la durée globale de stabilité perceptive vers une forme est proportionnelle aux nombres de transformations reportées vers cette forme.

Discussion Générale

L'objectif de l'expérience présente était de tester la validité perceptive de l'effet LC par l'examen du nombre et de la durée de stabilité perceptive des transformations rapportées lors d'une procédure expérimentale de transformation verbale. Les résultats de cette expérience, consistant en une écoute répétée de stimuli réversibles dissyllabiques de formes Labiale-Coronale et Coronale-Labiale, démontrent une asymétrie des transformations en faveur de la structure Labiale-Coronale aussi bien pour le nombre de transformations rapportées que pour la durée de stabilité perceptive des deux formes. Ainsi, les données attestent de l'existence d'un corrélat perceptif de l'effet LC durant la tâche de transformation verbale.

Dynamique des Transformations Verbales

Un premier résultat important de cette étude concerne la dynamique des changements perceptifs observés. Nos données montrent en effet que l'organisation principale des transformations est toujours celle d'un couplage par paire entre les deux formes possibles de chaque stimulus réversible (soit les transformations présentant une forme identique ou une forme inverse associée à la séquence répétée – e.g., /pa.ta/ et /ta.pa/ lors de l'écoute répétée de la séquence /pa.ta/), ces séquences représentant en moyenne 71 % du nombre total de transformations. La force et la nature de ce mécanisme de couplage par paire sont également observés une fois prise en compte la durée de stabilité perceptive des transformations rapportées, représentant en moyenne pour les deux formes majoritaires 69% de la durée totale de l'expérience. La convergence de ces résultats est de plus attestée par une corrélation positive forte entre les deux mesures.

Ce mécanisme de couplage par paire est très proche de celui précédemment observé par Ditzinger, Tuller et Kelso¹³¹. Dans leur expérience, les auteurs ont en effet montré que la perception des sujets était dominée par deux formes majoritaires, dont l'une correspondait pour tous les sujets et durant toute l'expérience au stimulus répété. La forme et stabilité perceptive de l'autre transformation dominante variaient entre les sujets et durant l'écoute, une nouvelle forme pouvant émerger et devenir à son tour majoritairement perçue. Selon nous, ces différences de résultats entre les deux expériences pourraient être dues aux procédures expérimentales utilisées, notamment par l'emploi dans notre expérience de stimuli dissyllabiques réversibles. Cependant, les deux études convergent vers l'existence d'un mécanisme de couplage par paire des transformations perçues, impliquant toujours la forme répétée. Ce résultat apparaît également conforme aux données montrant que la stabilité perceptive des transformations serait dépendante d'un mécanisme de récupération (ou de rétablissement). Ainsi, Shoaf et Pitt¹³² ont démontré que les différences possibles de stabilité perceptive dépendaient dans une large mesure de la fréquence à laquelle le stimulus original était perçu durant l'expérience. Ce mécanisme de récupération, plus important pour les mots que pour les non-mots dans leur expérience, est ici plus important pour les stimuli de structure phonologique Labiale-Coronale que pour les stimuli de structure phonologique Coronale-Labiale. Du fait de l'emploi de stimuli dissyllabiques réversibles, nous ne pouvons cependant présupposer d'une nature spécifique de l'autre forme dominante dans ce mécanisme de couplage par paire des transformations.

¹³¹ Ditzinger, T., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1997). *op. cit.*

¹³² Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

Il est intéressant de noter que, dans notre expérience, ces alternances perceptives majoritaires entre le stimulus répété et sa forme associée sont en accord avec plusieurs théories phonologiques de la syllabe¹³³. Ainsi, cette tendance à l'émergence de transformations de structure phonologique CV.CV favorise les syllabes ouvertes, comme stipulé par le principe d'attaque obligatoire (*Obligatory Onset Principle*), celui d'ouverture maximale de la syllabe (*Principle of Maximum Open Syllabicity*) et, bien que de manière indirecte, par le principe de sonorité des constituants syllabiques (*Sonority Sequencing Principle*)¹³⁴. Cette préférence de la formation de l'attaque syllabique par rapport à la constitution de la coda est également observée pour les transformations différentes des deux formes majoritaires (voir la Table 12). Ainsi, les transformations de structure syllabique fermée (ici uniquement de type CV.CVC) sont marginales, ne représentant que 2% du nombre total de transformations rapportées. Enfin, ce mécanisme de couplage par paire respecte le principe de contour obligatoire (*Obligatory Contour Principle*)¹³⁵ selon lequel les langues tendent à favoriser un patron inter-syllabique discontinu, impliquant une consonne et/ou une voyelle différente entre deux syllabes successives.

Finally, face à la dynamique des transformations observées, une question importante est celle de la validité de la mesure de durée de stabilité perceptive. À notre connaissance seules deux études portant sur l'Effet de Transformation Verbale ont utilisé ce type de mesure¹³⁶. Face aux processus généraux de satiété et de changement de critère considérés comme à la base de l'émergence des transformations¹³⁷, l'analyse de la durée de stabilité perceptive pourrait cependant permettre une meilleure compréhension des mécanismes à la base de l'émergence de nouvelles représentations. Ainsi, certaines études portant sur les mécanismes temporels d'interprétation perceptive de stimuli visuels ou auditifs ambigus ont suggéré une sollicitation périodique des mécanismes attentionnels permettant l'ouverture des canaux sensoriels à de nouvelles informations. Dans le cas d'un stimulus ambigu, l'interprétation alternative de celui-ci prendrait alors le contrôle sur les processus de jugement perceptif¹³⁸. Cette hypothèse d'une sollicitation périodique spontanée des processus d'interprétation des représentations auditives apparaît en accord avec nos résultats montrant une durée moyenne de stabilité perceptive d'environ 6 secondes (intervalle : 5.72 – 6.25s.) quel que soit le stimulus répété et la transformation rapportée (i.e., vers la forme répétée, vers la forme associée ou vers une autre transformation). Ainsi, bien que l'existence dans notre expérience d'une corrélation forte entre le nombre et la durée de stabilité perceptive des transformations soit probablement due dans une large mesure à l'emploi de stimuli dissyllabiques réversibles¹³⁹, la durée de stabilité perceptive représente une mesure importante dans l'étude de la stabilité des représentations phonologiques et de la dynamique des transformations verbales.

Interprétations Lexicales des Transformations

L'analyse des transformations et de la durée de stabilité perceptive dans cette étude démontre l'existence d'un biais d'asymétrie en faveur des formes phonologiques de type Labiale-Coronale. Cette préférence perceptive est observée aussi bien par comparaison des deux formes dominantes /pV.tV/ vs. /tV.pV/ associées aux stimuli réversibles que par la comparaison des transformations différentes de celles-ci, montrant une fréquence bien supérieure pour les formes de structure

¹³³ Pour une revue, voir Goslin, J. & Frauenfelder, U.H. (2000). *op. cit.* ; Meynadier, Y. (2001). *op. cit.*

¹³⁴ Malmberg, B. (1963). *op. cit.* ; Pulgram, E. (1970). *op. cit.* ; Hooper, J.B. (1972). *op. cit.* ; Clements, G.N. (1990). *op. cit.*

¹³⁵ Kenstowicz, M. (1994). *op. cit.*

¹³⁶ Ditzinger, T., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1997). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

¹³⁷ Warren, M.R. & Meyers, D.M. (1987). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.* ; Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). *op. cit.*

¹³⁸ Pour une revue, voir Pöppel, E. (1997). *op. cit.* ; Pöppel, E. & Wittmann, R. (1999). *op. cit.*

¹³⁹ Dans leur expérience, Ditzinger, Tuller et Kelso n'ont en effet pas trouvé de corrélation entre ces deux mesures. Cependant, la procédure expérimentale utilisée par les auteurs consistait en un report systématique entre chaque intervalle inter-stimuli de la perception du sujet et en l'emploi d'un stimulus monosyllabique, i.e. /kɛ/, présentant une cohérence articulatoire et acoustique forte et un statut lexical avéré. Ce type de procédure pouvant expliquer une durée de stabilité perceptive importante pour le stimulus répété.

phonologique Labiale-Coronale par rapport aux transformations de structure Coronale-Labiale (ratio 2.75:1 – voir la Table 12).

Un aspect important de cette étude est qu'à l'exception de la fréquence lexicale et de la densité de voisinage des séquences, l'ensemble des paramètres susceptibles d'influencer les processus de transformations ont été homogénéisés entre les stimuli. Ainsi, les six séquences présentent toutes un statut lexical avéré en langue française, une fréquence d'usage très basse et un même point d'unicité. De plus, la durée et les caractéristiques des signaux acoustiques ont également été harmonisées entre les séquences. Une interprétation concurrente de nos résultats pourrait provenir de la fréquence lexicale des stimuli utilisés. En effet, les séquences présentant une faible fréquence lexicale devraient être désavantagés, en terme de stabilité, par comparaison avec celles présentant une fréquence lexicale plus importante¹⁴⁰. Cependant, malgré une fréquence lexicale plus importante pour la séquence /pa.ta/ par rapport à la séquence /ta.pa/ (ratio : 1.90:1), la somme des fréquences lexicales est la même pour les deux types de stimuli /pV.tV/ et /tV.pV/ (ratio : 1.00:1). Ces données permettent donc de rejeter l'hypothèse d'un biais d'asymétrie lié à la fréquence lexicale des stimuli. Un autre facteur linguistique pouvant intervenir sur les transformations est celui de la densité de voisinage de la séquence répétée (correspondant à l'étendue des entrées lexicales "phonologiquement" proches du stimulus original). Comme souligné précédemment, un grand nombre de voisins devrait augmenter le nombre de candidats lexicalement possible et donc l'apparition de transformations lexicales plus nombreuses et variées¹⁴¹. Étant donnée la valeur moyenne de densité de voisinage lexical pour les stimuli /pV.tV/ par rapport aux stimuli /tV.pV/ (ratio : 1.16:1), cet effet pourrait expliquer le plus grand nombre de transformations observées vers les stimuli de forme /pV.tV/. Cependant, la différence de stabilité perceptive dépend dans une large mesure de la fréquence à laquelle les stimuli de forme /pV.tV/, par comparaison aux stimuli de forme /tV.pV/, sont perçus durant l'expérience. Ce mécanisme de récupération apparaît dès lors clairement distinct d'un mécanisme compétitif tel que supposé pour l'effet de densité de voisinage. Ainsi, aucun de ces différents facteurs ne peut expliquer réellement les dissymétries de transformations observées dans cette étude.

Un Corrélat Perceptif de l'Effet LC

L'effet LC se caractérise par une tendance dans l'organisation phonologique et lexicale des langues à favoriser une alternance consonantique de type Labiale-Coronale par rapport à une alternance consonantique Coronale-Labiale dans les structures phonologiques CVC et CV.CV. Rappelons que cet effet, dont l'existence est discutée lors du babillage, est également présent lors de la production des premiers mots chez le jeune enfant entre douze et dix-huit mois. Selon la théorie *Frame-then-Content*, l'effet LC serait la conséquence de propriétés articulatoires de l'appareil de parole : La variation intersyllabique résulterait dans un premier temps d'une réalisation articulatoire syllabique purement mandibulaire, séquence considérée comme étant la plus "simple" du point de vue articulatoire (*pure frame*), suivi de l'addition d'un mouvement lingual lors de la réalisation du cadre syllabique suivant. Face à cette hypothèse, un résultat intéressant provient d'une étude actuellement en cours à l'Institut de la Communication Parlée¹⁴². Les premières analyses de données articulographiques issues de la production de bisyllabes réitérées de forme CV.CV montrent en effet, à débit rapide, la réalisation successive des deux gestes consonantiques d'occlusion labiale puis apico-dentale dans un même cycle d'oscillation mandibulaire (lors de l'abaissement de la mâchoire) durant la répétition des séquences /pa.ta/ et /ta.pa/, ces deux gestes apparaissant lors de deux cycles mandibulaires distincts à débit lent. Mise en relation avec les études portant sur les relations de phases entre gestes articulatoires, l'existence à débit rapide d'une bascule de la séquence /ta.pa/ vers la séquence /pa.ta/ suggère une stabilité articulatoire plus importante de la structure Labiale-Coronale par rapport à la structure Coronale-

¹⁴⁰ MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.*

¹⁴¹ Yin, C. & MacKay, D.G. (1992). *op. cit.*

¹⁴² Rochet-Capellan, A. (2004). *L'Économie Articulatoire des Mots du Français : Une Autre Explication de l'Effet LC ?* Mémoire de DEA de Sciences Cognitives, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Labiale. Ces premières données, issues d'un unique locuteur de langue française, viennent donc préciser l'explication articulatoire de l'effet LC donnée par MacNeilage et Davis.

Face à ces études, la validité perceptive de l'effet LC durant une tâche de transformation verbale suggère donc une interaction entre les systèmes de production et de perception de la parole lors de la construction et l'émergence des transformations. Ainsi, des contraintes de stabilité provenant du système moteur pourraient participer à la représentation mentale des formes phonologiques pendant l'écoute répétée de parole¹⁴³. Ce résultat apporte donc de nouveaux arguments en faveur des théories postulant une dépendance des processus de perception de la parole à l'organisation des représentations gestuelles articulatoires¹⁴⁴, et, de manière plus spécifique, argue en faveur d'une nature des représentations perceptives orientée vers le contrôle de l'action¹⁴⁵.

¹⁴³ Sur ce point, il est à noter une étude des transformations verbales menée sur des enfants présentant des troubles articulatoires lors de l'écoute attentive de pseudo-mots. Les résultats montrent, par rapport à un groupe contrôle, un nombre de transformations plus faible, suggérant aux auteurs l'hypothèse d'un degré de maturation moindre des liens entre systèmes de production et de perception de la parole chez ces enfants. Edmonson, J.R., Hutchinson, J.M. & Nerbonne, M.A. (1981). Verbal transformation patterns in children with articulation defects. *Journal of Auditory Research*, 21(2): 85-92.

¹⁴⁴ Liberman, A.M. & Mattingly, I.G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21: 1-36 ; Browman, C.P. & Goldstein, L. (1989). *op. cit.* ; MacNeilage, P.F. (1998). *op. cit.* ; Sock, R. (1998). *op. cit.* ; Schwartz, J.-L., Abry, C., Boë, L.-J. & Cathiard, M.A. (2002). *op. cit.*

¹⁴⁵ Schwartz, J.-L., Abry, C., Boë, L.-J. & Cathiard, M.A. (2002). *op. cit.*

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre des recherches portant sur l'examen des interactions possibles entre les grandes tendances des systèmes phonologiques des langues du monde et les contraintes de production et de perception de la parole. L'objectif de cette étude, utilisant le paradigme expérimental des transformations verbales lors d'une procédure de perception, consistait à tester l'impact perceptif d'une régularité organisationnelle spécifique du langage, l'effet "LC", indiquant une alternance consonantique préférentielle de type Labiale-(Voyelle)-Coronale plutôt que Coronale-(Voyelle)-Labiale et dont les fondements seraient liés à des contraintes biomécaniques articulatoires. L'existence d'une asymétrie des transformations rapportées en faveur de la structure Labiale-Coronale atteste de la validité perceptive de l'effet LC durant une tâche de transformation verbale et souligne de fait une interaction entre systèmes de production et de perception de la parole lors de la construction et l'émergence des représentations phonologiques.

Mots clés: Effet de Transformation Verbale, Effet LC, Systèmes de Perception et de Production de la Parole, Théorie Frame-then-Content, Typologies des langues du Monde.

Abstract

Since verbal transformations are mostly considered to reflect the sub-processes devoted to the perceptual organization and interpretation of speech, the present study was designed to further test this proposal by examining whether variations in the phonological structure of repeatedly presented words can lead to perceptual asymmetries in verbal transformations. For this aim, we contrasted reversible pairs of CV.CV disyllabic words, consisting in a combination of the /p/ labial and /t/ coronal consonants. The main organization of the observed transformations was always that of a pairwise coupling between the two possible forms of the reversible repeated stimuli. In addition, a perceptual preference for labial-coronal as compared to coronal-labial couple-based stimuli was observed, both in the number of transformations and in the perceptual stability duration. We interpret these findings in line with previous models of speech perception and production and statistical studies on universal organizational syllabic patterns (the so-called "LC" effect associated to the preferential tendency for Labial-Vowel-Coronal sequences over Coronal-Vowel-Labial ones in languages).

Keywords: Verbal Transformation Effect, LC Effect, Speech Perception and Production Systems, Frame-then-Content Theory, Universal Phonological Trends.

- Chapitre IV -

La Mémoire de Travail, Siège des Transformations Verbales

Une pensée complexe se déroule en une série de raisonnements abstraits. Cette pensée s'accompagne de la représentation d'images, au moins naissantes. Et ces images elles-mêmes ne sont pas représentées à la conscience sans que se dessinent, à l'état d'esquisse ou de tendance, les mouvements par lesquels ces images se joueraient elles-mêmes dans l'espace, imprimeraient au corps telles ou telles attitudes, dégageraient tout ce qu'elles contiennent implicitement de mouvement spatial. De cette pensée complexe qui se déroule, c'est là, à notre avis, ce que l'état cérébral indique à tout instant. Celui qui pourrait pénétrer à l'intérieur d'un cerveau, et apercevoir ce qui s'y fait, serait probablement renseigné sur ces mouvements esquissés ou préparés ; rien ne prouve qu'il serait renseigné sur autre chose.

H. Bergson¹⁴²

Clearly, there is a need for a closer link between research on the phonological loop and works on language perception and production. [...] Many levels of control of action are implicit and independent of working memory. It is, however, only within this broader picture that the role of working memory as an attentionally limited but crucial system for thought, planning and action can be fully understood.

A.D. Baddeley¹⁴³

Introduction

Ce chapitre a pour but la description d'une étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle devant permettre une interprétation précisée, par localisation anatomo-fonctionnelle, des mécanismes cérébraux et cognitifs mis en jeu lors de la recherche active de transformations. Cette étude a été menée en collaboration avec Christoph Segebarth, de l'unité INSERM de NeuroImagerie Fonctionnelle et Métabolique de l'Université Joseph Fourier et Monica Baciú du laboratoire CNRS de Psychologie et Neurocognition de l'Université Pierre Mendès-France, au sein de la plate-forme rhône-alpine d'IRM fonctionnelle et métabolique du Centre Hospitalier Universitaire de Grenoble.

Le paradigme de transformation verbale - tâche auditivo-verbale "à la Necker" avec prise de décision sur stimulus - tient de l'ambiguïté maximale de ce stimulus, rendue possible par le processus de répétition. En regard des dissymétries observées dans les études comportementales précédentes, cette procédure n'impliquerait pas une simple détection de traces de jointure entre syllabes itérées mais bien un changement de l'état perceptif du sujet par le contrôle actif attentionnel de mécanismes articulo-moteurs. Face à la question des processus cognitifs et cérébraux impliqués dans l'analyse et l'émergence des transformations, Reisberg et ses collègues¹⁴⁸ ont suggéré le lien possible entre l'Effet de Transformation Verbale et la Boucle Phonologique – la composante verbale du modèle de mémoire de travail de Baddeley et Hitch¹⁴⁹. Pour les auteurs, le contraste observé dans leur étude entre imagerie pure et imagerie enactée converge en effet avec la dissociation fonctionnelle entre les deux composantes de ce système mnésique : L'unité de stockage phonologique (inner ear) et le processus de répétition subvocale (inner voice). Le processus de récapitulation subvocale serait ainsi, selon les auteurs, à la base des mécanismes d'enactment - nécessaires à l'ambiguïté du stimulus et, de là, à l'émergence de nouvelles représentations - l'unité de stockage phonologique permettant la rétention temporaire de la représentation verbale en cours. L'association des deux composantes établirait ainsi une plate-forme adaptée aux transformations verbales.

Des premiers travaux portant sur les capacités mnésiques jusqu'à la découverte récente du rôle de la mémoire de travail verbale dans l'acquisition de formes phonologiques nouvelles et l'apprentissage du langage, un siècle de recherches scientifiques voit s'opposer les psychologues sur la nature unitaire ou duale de la mémoire, ses différents aspects modulaires, les implications réelles de la mémoire à court terme dans les tâches cognitives d'apprentissage, de compréhension et de raisonnement. Nous présenterons dans cette introduction une brève revue chronologique des recherches sur la mémoire auditive à court terme précédant la création du modèle de mémoire de travail de Baddeley & Hitch¹⁵⁰, une description des études comportementales sur la Boucle

¹⁴⁶ Bergson, H. (1896). *Matière et mémoire. Essai sur la relation du corps à l'esprit*. Paris, Presse Universitaires de France, 7^{ème} Edition.

¹⁴⁷ Baddeley, A.D. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature reviews Neuroscience*, 4: 829-839.

¹⁴⁸ Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.* ; Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). *op. cit.*

¹⁴⁹ Baddeley, A.D. & Hitch, G.J. (1974). Working memory. In: Bower, G. A. (Editor), *Recent advances in learning and motivation*. New York, Academic Press, Vol. 8, pp. 47-90 ; Baddeley, A.D. (1986). *op. cit.*

¹⁵⁰ Pour une revue des travaux précédant la spécification du modèle de mémoire de travail par Baddeley et Hitch, voir Baddeley, A.D. (1986). *op. cit.* ; Baddeley, A.D. (1990). *La Mémoire Humaine. Théorie et Pratique*. Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble ; Baddeley, A.D. (2003) *op. cit.*

Phonologique et, enfin, les hypothèses neuroanatomiques formulées dans le cadre de l'engagement de ce système mnésique dans l'analyse et l'émergence des transformations verbales.

Vers une Nature Duale de la Mémoire

Les premières mesures de la capacité mnésique

Joseph Jacobs, maître d'école londonien, fut le premier à tenter de mesurer la capacité de la mémoire à court terme auditive¹⁵¹. Pour ce faire, il mit au point la technique de mesure dite de l'empan mnésique. Cette technique, l'une des plus utilisées avec l'épreuve de rappel libre, consiste en la présentation d'une liste d'items (chiffres, lettres...) puis à la répétition de ses éléments dans l'ordre de présentation normale ou inversé. La taille de la liste pour laquelle on obtient du sujet une répétition correcte dans la moitié des essais est définie comme étant l'empan mnésique de ce sujet. Dans un article célèbre, Georges Armitage Miller systématisa les recherches antérieures sur la capacité de la mémoire à court terme en indiquant que celle-ci était déterminée plus par le nombre de groupes d'informations que par le nombre d'unités simples¹⁵². Cette capacité, tout en variant légèrement selon la nature de l'information (chiffres, lettres, mots, sons...), se limitait à 7 (± 2) groupes. Il baptisa ces groupes des *chunks*, les définissant comme une partie intégrée d'information.

L'oubli en mémoire à court terme : Déclin de la trace mnésique et interférence

En 1949, Donald Hebb proposa une première distinction entre mémoire à court-terme et mémoire à long terme basée sur l'hypothèse d'une activité électrique transitoire liée à la rétention temporaire d'information et à un phénomène de maturation/croissance neuronale permettant le développement d'une mémoire à long-terme¹⁵³. Une découverte capitale concernant cette existence possible de deux systèmes mnésiques distincts fut celle de l'observation de l'oubli extrêmement rapide de petites quantités d'informations, dès lors que des tâches distractives occupaient les sujets entre les phases d'apprentissage et de rappel ou lorsque ceux-ci ne pouvaient pas répéter le matériel à mémoriser¹⁵⁴. Les chercheurs interprétèrent ces résultats en terme d'estompage ou de déclin de la trace mnésique (*trace decay*). Cette théorie suppose que l'oubli à court-terme résulte d'un affaiblissement des traces mnésiques au cours du temps tandis que l'oubli en mémoire à long-terme serait lié à un phénomène d'interférence entre représentations, suggérant ainsi une dissociation entre deux systèmes de mémoires distincts¹⁵⁵.

Cette dissociation entre mécanismes de rétention temporaire et à long-terme fut à nouveau mise en évidence par les travaux de Postman et Philips et Glanzer et Cunitz¹⁵⁶. En utilisant une tâche de rappel libre de mots sans rapport les uns avec les autres, ils montrèrent que, lorsque le rappel est immédiat, les derniers items présentés ont tendance à être très bien rappelés. Cet effet est désigné par le terme d'effet de récence. Le rappel des premiers items est aussi favorisé, ce que l'on nomme l'effet de primauté, tandis que les items centraux montrent un plus faible taux de rappel. Cependant, après un court intervalle de temps, occupé à une tâche distractive quelconque, l'effet de récence disparaît alors que l'effet de primauté n'est pas affecté. Cette technique fut explorée en

¹⁵¹ Jacobs, J. (1887). Experiments on 'prehension'. *Mind*, 12: 75-79.

¹⁵² Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63: 81-96.

¹⁵³ Hebb, D.O. (1949). *The Organization of Behavior*. New York, Wiley.

¹⁵⁴ Brown, J. (1958). Some tests of the decay theory of immediate memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 10: 12-21 ; Peterson, L.R. & Peterson M.J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58: 193-198.

¹⁵⁵ Un certain nombre de chercheurs vont cependant réfuter cette idée en arguant de l'importance du phénomène d'interférence lors des tâches de mémoire à court-terme, e.g. Melton, A.W. (1963). Implications of short-term memory for a general theory of memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 2: 1-21.

¹⁵⁶ Postman, L. & Philips, L.W. (1965). Short-term temporal changes in free recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 17: 132-138 ; Glanzer, M. & Cunitz, A.R. (1966). Two storage mechanisms in free recall. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, 5: 351-360.

détail par Glanzer¹⁵⁷ qui montra que l'effet de récence n'était pas affecté par un certain nombre de variables comme la familiarité des mots, la vitesse de présentation contrairement à l'effet de primauté. Une interprétation possible de ces résultats est que les items montrant un effet de récence sont conservés dans une unité de stockage à court terme, de capacité limitée mais offrant un temps d'acquisition et de récupération relativement rapide, tandis que les items présentant un effet de primauté sont mémorisés dans une unité de stockage à long terme, qui, bien que disposant d'une grande capacité, tend à être plus lente pour enregistrer et récupérer de nouvelles informations.

Conrad, dans une expérience basée sur la mesure de l'empan mnésique, démontra que le taux de rappel d'une suite d'items se détériorait lorsque celle-ci était suivie d'un item parlé non pertinent¹⁵⁸. Cet effet du suffixe auditif fut aussi exploré par Crowder et Morton¹⁵⁹ qui montrèrent qu'un bruit non langagier ne dégradait pas la performance de rappel tandis qu'un suffixe langagier, ce quelle que soit sa signification, avait un effet perturbateur. Dans une autre expérience, Conrad & Hull¹⁶⁰ observèrent que lorsque des sujets tentaient de rappeler des suites de lettres présentées visuellement, les erreurs de rappels étaient acoustiquement proches de l'item cible. Par exemple, "P" pouvait être rappelé plus facilement comme "V" (acoustiquement plus proche) que comme "R" (visuellement plus proche). Ils supposèrent que ces effets d'erreur de rappel indiquaient un stockage basé sur un codage de type acoustique ou phonologique. Cet effet de similarité phonologique, entraînant une mauvaise performance de rappel immédiat (notamment en ce qui concerne l'ordre des items), fut aussi démontré par Baddeley¹⁶¹ qui utilisa des listes de mots présentant une similarité/dissimilarité phonologique ou sémantique. Lors d'une tâche d'empan classique, via une modalité de présentation auditive, la performance de rappel est étroitement liée à la similarité phonologique entre items et non à la similarité sémantique, en revanche lors d'une tâche d'apprentissage à long terme, le pattern des résultats s'inverse, la ressemblance sémantique devenant le facteur dominant dans la baisse de performance du rappel. Ces résultats semblent donc indiquer que le stockage à court terme utilise un codage phonologique de l'information tandis que le stockage à long terme utilise un codage sémantique de l'information.

Le modèle modal d'Atkinson & Shiffrin

A la fin des années 60, étant donné le nombre de preuves convergentes en faveur d'une séparation entre mémoire à court terme et mémoire à long terme, Atkinson et Shiffrin proposèrent un modèle à deux composantes, appelé modèle modal¹⁶². Ce modèle postule que l'information externe est d'abord traitée par un ensemble de processus sensoriels. L'information traitée est alors envoyée à un registre à court terme de capacité limitée, qui, à son tour, la transmet à un registre à long terme. L'un des points les plus importants du modèle est que l'information est obligée de transiter par le registre à court terme, qui, outre le stockage temporaire de celle-ci, est censé effectuer également un certain nombre d'opérations (encodage, stratégies de récupération...). Ainsi, le registre à court terme est-il essentiel à tout nouvel apprentissage et à la récupération d'informations stockées à long terme. Atkinson et Shiffrin, en travaillant sur l'effet de répétition verbale, montrèrent que plus un item était répété, plus il avait de chance qu'il soit retenu à long terme. Ils inclurent ce phénomène de répétition dans le registre à court terme comme l'un des processus de contrôle de l'information.

De nombreuses expériences s'opposèrent cependant au modèle d'Atkinson et Shiffrin. Parmi celles-ci, on peut citer notamment l'étude neuropsychologique de Shallice et Warrington effectuée

¹⁵⁷ Glanzer, M. (1972). Storage mechanisms in free recall. In: Bower, G. A. (Editor), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. New York, Academic Press, Vol. 5.

¹⁵⁸ Conrad, R. (1964). Acoustic confusion in immediate memory. *British Journal of Psychology*, 55: 75-84.

¹⁵⁹ Crowder R.G.. & Morton, J. (1969). Precategorical acoustical storage (PAS). *Perception & Psychophysics*, 50: 291-323.

¹⁶⁰ Conrad, R. & Hull, A.J. (1964). Information, acoustic confusion and memory span. *British Journal of Psychology*, 55: 429-432.

¹⁶¹ Baddeley, A.D. (1966). Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic and formal similarity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18: 362-365.

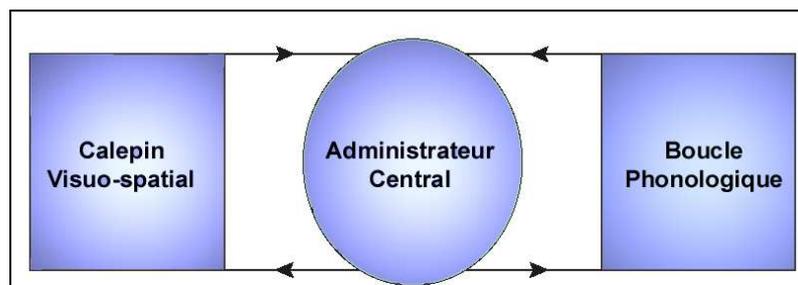
¹⁶² Atkinson R.C. & Shiffrin R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In: Spence, K.W. (Editor), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. New York, Academic Press, Vol. 2, pp. 89-115.

sur le patient K.F, dont l'empan en mémoire à court terme était très bas mais dont l'apprentissage à long terme restait normal¹⁶³. L'hypothèse du modèle selon laquelle tout apprentissage à long terme nécessitait l'utilisation du registre à court terme aurait dû entraîner chez ce patient une capacité d'apprentissage à long terme défectueuse. Peu après, Craik et Lockhart publièrent un article concernant les niveaux de traitements de l'information et suggérant que la durée d'une trace mnésique soit fonction de la profondeur de son traitement¹⁶⁴. Selon les auteurs, le rôle principal du système de mémoire à court terme est le traitement de l'information courante tandis que le stockage de l'information à long terme provient du traitement par le système de mémoire à long terme et non du transfert de l'information d'un registre à l'autre. Un aspect important de cette théorie est donc de distinguer deux types de répétition : une répétition de maintenance dans laquelle l'information est répétée sans être toutefois traitée en profondeur et une répétition d'élaboration par laquelle le traitement s'effectue en profondeur.

Le modèle multi-composantes de mémoire de travail de Baddeley & Hitch

Dans les années 70, l'une des questions les plus importante concernant la mémoire à court terme était celle de savoir si elle pouvait être considérée comme une mémoire de travail générale et jouer un rôle important dans les activités cognitives telles que l'apprentissage, la compréhension et le raisonnement. Baddeley et Hitch utilisèrent dans une série d'expériences la technique dite de double tâche, consistant à accomplir une tâche mnésique censée absorber la majeure capacité de la mémoire de travail tout en effectuant parallèlement des tâches d'apprentissage, de raisonnement, de compréhension¹⁶⁵. En utilisant l'empan mnésique comme tâche concurrente à l'accomplissement de tâches d'apprentissage ou de reconnaissance de liste de mots, de raisonnement, de compréhension de textes, les auteurs montrèrent, qu'à l'exception de la récupération d'informations en mémoire à long terme, toutes les autres tâches mettaient en évidence une diminution des performances dont le degré était fonction de la charge simultanée de chiffres à rappeler. Cependant, cette baisse de performance était loin d'être spectaculaire, en particulier si l'on considère la charge simultanée de six chiffres censée être proche de la valeur d'empan des sujets. En utilisant le rappel libre de mots non-reliés en concurrence avec la tâche d'empan, ils constatèrent de plus que l'effet de récence n'était pas affecté.

Figure 11 : Le modèle multi-composantes de mémoire de travail de Baddeley & Hitch (1974).



L'interprétation de ces résultats entraînent Baddeley et Hitch à abandonner l'hypothèse de l'unicité du système de stockage à court terme. Ils proposèrent alors un modèle de mémoire de travail dans lequel un système de contrôle attentionnel nommé processeur ou Administrateur Central (*central executive*), impliqué dans la sélection des stratégies cognitives, supervise et coordonne deux systèmes esclaves auxiliaires : le Calepin ou Ardoise Visuo-Spatiale (*visuospatial sketchpad*), responsable de la manipulation des images visuelles, et la Boucle Articulatoire ou Boucle Phonologique (*articulatory/phonological loop*) considérée comme responsable de la

¹⁶³ Shallice, T. & Warrington, E.K. (1970). Independent functioning of verbal memory stores: A neuropsychological study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 22: 261-273.

¹⁶⁴ Craik, F.I.M. & Lockhart, R.S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11: 671-684.

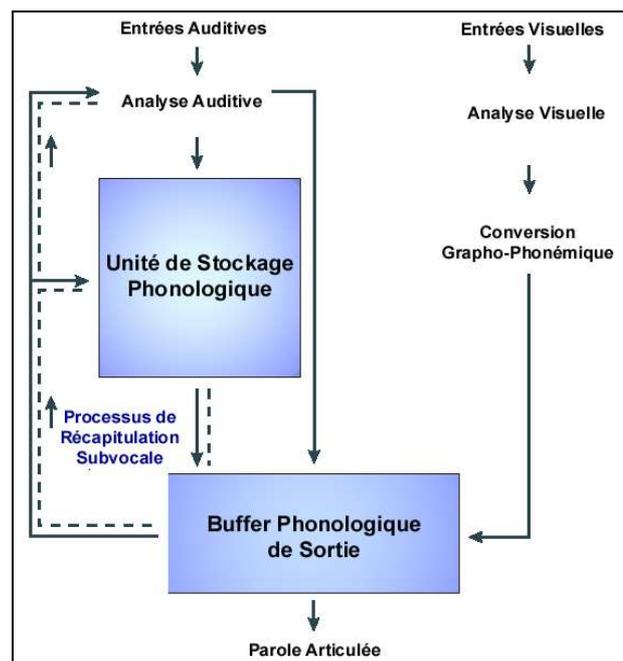
¹⁶⁵ Baddeley, A.D. & Hitch, G.J. (1974). *op. cit.*

manipulation des informations langagières. Ce modèle, schématisé dans la Figure 11, représente néanmoins une simple caractérisation des composantes clés de la mémoire à court terme, plus qu'une spécification détaillée des processus et mécanismes inhérents à celle-ci¹⁶⁶.

La Boucle Phonologique

La Boucle Phonologique fut ultérieurement décomposée en 2 sous-unités (voir la Figure 12): Une unité de stockage phonologique (*phonological short-term store* ou *inner ear*) et un processus de contrôle articulaire, appelé aussi processus de récapitulation subvocale (*articulatory subvocal rehearsal process* ou *inner voice*). L'unité de stockage phonologique est destinée à retenir les représentations phonologiques des informations langagières. Ces traces mnésiques étant supposées s'effacer, le processus de contrôle articulaire a pour but de rafraîchir ces traces par un processus d'auto-répétition subvocale. Dans sa formulation originale, la Boucle Phonologique permettait de maintenir une fraction d'information verbale dans un code articulaire. Il fut estimé que la boucle pouvait ainsi retenir une quantité d'information équivalente à celle pouvant être articulée durant 1.5 à 2 secondes¹⁶⁷. Enfin, le processus de contrôle articulaire est aussi impliqué dans la conversion des entrées visuelles orthographiques en un code phonologique et chargé de les transmettre à l'unité de stockage phonologique.

Figure 12 : Le modèle de Boucle Phonologique. D'après Baddeley (2003).



Les effets expérimentaux

Nous présenterons dans cette sous-partie un résumé des cinq principaux phénomènes expérimentaux associés au modèle de Boucle Phonologique de Baddeley : l'effet d'écoute inattentive, l'effet de similarité phonologique, l'effet de longueur de mot, l'effet de suppression articulaire et l'effet de lexicalité.

¹⁶⁶ Pour une revue détaillée de ce modèle, voir Baddeley, A.D. (1986). *op. cit.* ; Baddeley, A.D. (1990). *op. cit.* ; Baddeley, A. D. (1992). Working Memory. *Science*, 255: 556-559 ; Baddeley, A.D. (1998). Working memory. *Life Sciences*, 321: 167-173 ; Baddeley, A.D. (2001). Is working memory still working. *American Psychologist*, 56: 849-864 ; Baddeley, A.D. (2003) *op. cit.*

¹⁶⁷ Baddeley, A.D., Thomson, N. & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14: 575-589.

L'effet d'écoute inattentive (*irrelevant speech*) se caractérise par une détérioration des performances dans des tâches d'empan mnésique ou de rappel libre immédiat lorsque les sujets sont confrontés durant les phases d'apprentissage ou de rappel à un flux sonore langagier¹⁶⁸, ceci se produisant même lorsque les items à mémoriser sont présentés visuellement. Cet effet s'expliquerait par l'accès automatique de matériel langagier non pertinent dans l'unité de stockage phonologique, et interférant de ce fait avec les représentations phonologiques des items à mémoriser. Cependant, d'autres études indiquent que cet effet apparaît aussi bien lors de l'écoute de bruit non-langagier (*variable tones*) que lors de l'écoute de musique instrumentale ou vocale, bien qu'il soit moins marqué dans ces cas¹⁶⁹. De plus, les performances de rappel semblent n'être pas affectées de la similarité phonologique entre items à mémoriser et le matériel langagier à ignorer¹⁷⁰. La nature phonologique des interférences provoquées par cet effet d'écoute inattentive est donc partiellement remise en cause par ces données, une interprétation précise de ce phénomène restant à ce jour équivoque¹⁷¹.

Nous avons déjà mentionné l'effet de similarité phonologique (*phonological similarity*) entraînant une dégradation des performances dans des tâches d'empan mnésique ou de rappel libre immédiat pour des items présentés de manière visuelle ou auditive¹⁷². Cet effet est supposé, dans le cadre du modèle de Baddeley, être fonction du degré de similarité entre les représentations phonologiques contenues dans l'unité de stockage phonologique : Plus le nombre de traits phonologiques distinctifs entre représentations mnésiques est petit et plus la probabilité d'interférence entre elles devient grande¹⁷³.

La valeur de l'empan mnésique est profondément liée à la durée de prononciation des items à mémoriser, quel que soit le type de présentation (i.e., auditive ou visuelle). Ce phénomène est connu sous le nom d'effet de longueur de mot (*word length effect*) et est traditionnellement associé au processus de contrôle articulatoire¹⁷⁴. Les différences de performance liées à l'utilisation de mots de même nombre de syllabes mais de durée de prononciation différente suggèrent que l'effet de longueur de mot est plus fonction de la durée précise de prononciation que du nombre de syllabes pour les items à mémoriser. Une interprétation simple de cet effet est la mise en œuvre en temps réel de programmes moteurs du langage (*subvocal articulation*) dans le processus de contrôle articulatoire. Ainsi, plus la durée de prononciation d'un mot est faible et plus le processus d'auto-répétition est rapide, permettant un meilleur rafraîchissement de la trace mnésique¹⁷⁵. Il semble toutefois que cet effet n'est pas simplement dû à l'activité articulatoire subvocale durant la présentation des items à mémoriser mais dépend aussi de la phase de rappel de ces items. Utilisant

¹⁶⁸ Colle, H.A. & Welsh, A. (1976). Acoustic masking in primary memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 15: 17-32 ; Salamé, P. & Baddeley, A.D. (1982). Disruption of short-term memory by unattended speech: Implications for the structure of working memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 21: 150-164.

¹⁶⁹ Jones, D. (1993). Objects, streams and threads of auditory attention. In: Baddeley, A.D. & Weiskrantz, L. (Editors), *Attention, Selection, Awareness and Control*. Oxford, Oxford University Press, pp. 87-104 ; Salamé, P. & Baddeley, A.D. (1989). Effects of background music on phonological short-term memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A: 107-122.

¹⁷⁰ Jones, D.M. & Macken, W.J (1995). Phonological similarity in the irrelevant speech effect: Within- or between- stream similarity? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 21: 103-115.

¹⁷¹ Baddeley, A.D. (2003) *op. cit.* Ainsi, certains auteurs ont proposé une explication de cet effet basée sur une perturbation de l'ordre sériel des items à mémoriser. Jones, D. (1993). *op. cit.*

¹⁷² Conrad, R. & Hull, A.J. (1964). *op. cit.* ; Baddeley, A.D. (1966). *op. cit.*

¹⁷³ Concernant la nature phonologique des représentations, Baddeley souligne le fait que "pratiquement tous les termes utilisés dans ce contexte, y compris acoustique, phonémique et phonologique sont utilisés pour marquer une position théorique particulière sur ce problème. Cependant, l'utilisation présente du terme phonologique est censée être relativement neutre par rapport au problème de savoir quel est le niveau exact de codage du langage dans la boucle". Baddeley, A.D. (1990). *op. cit.*

¹⁷⁴ Baddeley, A.D., Thomson, N. & Buchanan, M. (1975). *op. cit.*

¹⁷⁵ Une étude a également observé indirectement l'effet de longueur de mots en comparant l'empan de chiffres d'enfants gallois et d'enfants anglais. Les auteurs ont alors expliqué l'empan systématiquement plus faible pour les premiers que pour les seconds (lors de la présentation de chiffres de mêmes longueurs syllabiques) par le temps de prononciation des voyelles plus longue en gallois. Une étude ultérieure a d'ailleurs permis d'étendre cette relation entre empan de chiffres et durée de prononciation pour quatre langues différentes. Ellis, N.C. & Hennesly, R.A. (1980). A bilingual word-length effect: Implications for intelligence testing and the relative ease of mental calculation in Welsh and English. *British Journal of Psychology*, 71: 43-52 ; Naveh-Benjamin, M. & Ayres, T.J. (1986). Digit span, reading rate, and linguistic relativity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38: 739-751.

des listes de mots dont la première et seconde moitié contenaient des mots de durée de prononciation différente, des auteurs ont en effet montré que le taux de rappel de chaque item de la liste était fortement influencé par la durée totale de prononciation des items précédents durant la phase de rappel, plus que par sa durée de prononciation propre¹⁷⁶.

Les performances dans les tâches d'empan mnésique ou de rappel libre immédiat sont significativement diminuées lorsque l'on demande aux sujets, pendant la phase de présentation des items à mémoriser, de répéter une séquence hors de propos (e.g., "bla bla bla", "the the the") à haute voix ou en silence¹⁷⁷. Cette technique expérimentale, dite de suppression articulatoire (*articulatory suppression*), est présumée empêcher le fonctionnement normal du processus de contrôle articulatoire, soit pour rafraîchir des éléments se trouvant déjà dans l'unité de stockage phonologique, soit pour convertir des éléments visuels en code phonologique. Il est à noter que Baddeley, par la comparaison expérimentale avec d'autres épreuves sollicitant le système attentionnel, rejette l'interprétation considérant les effets de la suppression articulatoire comme dus à des efforts attentionnels de la part des sujets¹⁷⁸. La suppression articulatoire, éliminant le processus de répétition subvocale, a des répercussions prévisibles sur les autres phénomènes expérimentaux décrits précédemment. Ainsi, les effets d'écoute inattentive et de similarité phonologique disparaissent lorsque le matériel à mémoriser est présenté visuellement, la suppression articulatoire empêchant la conversion en code phonologique des items visuels. Cependant, ces effets demeurent avec une présentation auditive, le matériel à mémoriser accédant directement à l'unité de stockage phonologique¹⁷⁹. Dépendant directement du processus de contrôle articulatoire, l'effet longueur de mot disparaît aussi bien pour des items présentés visuellement qu'auditivement¹⁸⁰. Il est cependant intéressant de distinguer ici l'utilisation de la suppression articulatoire pendant la phase d'apprentissage et pendant la phase de rappel pour une présentation auditive (pour une présentation visuelle, la phase d'apprentissage, permettant la conversion des items en code phonologique, est ici déterminante). Les premières études concernant une présentation auditive des items à mémoriser montrèrent en effet que la suppression articulatoire, effectuée durant la phase d'apprentissage, ne supprimait pas l'effet longueur de mot. Il fut démontré ultérieurement que les sujets utilisaient la phase de rappel pour répéter rapidement les items à mémoriser ; l'effet longueur de mot disparaissant lorsque la suppression articulatoire était prolongée durant la phase de rappel¹⁸¹.

Un autre phénomène expérimental est l'effet de lexicalité (*lexicality effect*). Un certain nombre d'études ont en effet montré que les performances dans des tâches de mémoire immédiate sont supérieures lorsque les sujets sont confrontés à des listes de mots plutôt que des listes de non-mots. Un effet similaire est celui dit d'effet de ressemblance lexicale (*wordlikeness effect*) : le rappel de non-mot présentant une structure phonologique familière est meilleur que celui de non-mot ne présentant pas cette caractéristique. Ces études suggèrent que l'effet de lexicalité est plus le fait de la structure phonologique familière du mot que de sa signification¹⁸².

L'apport de la neuropsychologie

Le fractionnement de la boucle en deux sous-composantes fut à l'origine motivé par des expériences sur des sujets adultes "normaux" montrant des résultats différents pour des items

¹⁷⁶ Cowan, N., Day, L., Saults, J.S., Keller, T.A., Johnson, T. & Flores, L. (1992). The role of verbal output time in the effects of word length on immediate memory. *Journal of Memory and Language*, 31: 1-17.

¹⁷⁷ Murray, D.J. (1968). Articulation and acoustic confusability in short-term memory. *Journal of Experimental Psychology*, 78: 679-684.

¹⁷⁸ Baddeley, A.D. (1990) *op. cit.* Une interprétation auditive de l'effet de suppression articulatoire a également été proposée en des termes similaires à l'effet d'écoute inattentive. Cependant, l'existence de cet effet lors d'une procédure d'articulation silencieuse apparaît difficilement réconciliable avec cette hypothèse. Voir, Gupta, P. & MacWhinney, B. (1995). Is the articulatory loop articulatory or auditory? Reexamining the effects of concurrent articulation on immediate serial recall. *Journal of Memory and Language*, 34: 63-88.

¹⁷⁹ Baddeley, A.D., Lewis, V.J. & Vallar, G. (1984). Exploring the articulatory loop. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 36: 233-252.

¹⁸⁰ Baddeley, A.D., Thomson, N. & Buchanan, M. (1975). *op. cit.*

¹⁸¹ Baddeley, A.D., Lewis, V.J. & Vallar, G. (1984). *op. cit.*

¹⁸² Gathercole S.E. (1997). Models of verbal short-term memory. In: Conway, M.A. (Editor), *Cognitive Models of Memory*. Psychology Press, pp. 13-45.

verbaux à mémoriser de manière auditive ou visuelle. Une validation ultérieure de cette dissociation provient de la capacité du modèle à offrir une explication aux problèmes de mémoire rencontrés chez des patients cérébro-lésés souffrant d'un déficit de la mémoire à court terme¹⁸³. A ce titre, une étude déterminante fut celle d'une patiente italienne, P.V., par Vallar et Baddeley. A la suite d'un traumatisme crânien, des lésions de l'hémisphère gauche entraînèrent chez cette patiente une détérioration spécifique de la mémoire auditive à court terme. Présentant un empan mnésique de 2 ou 3 items, sa production langagière, sa capacité articulatoire, son langage écrit et sa mémoire à long terme restaient tout à fait normaux. Des expériences montrèrent que la mémoire immédiate de P.V. n'était pas sujette à l'effet longueur de mot, ni à l'effet de suppression articulatoire. De plus, elle était affectée par l'effet de similarité phonologique en présentation auditive mais non en présentation visuelle. L'empan mnésique réduit de P.V. suggéra à Vallar et Baddeley l'interprétation d'une altération partielle de l'unité de stockage phonologique. La non-sensibilité aux effets de longueur de mot, de suppression articulatoire ou de similarité phonologique pour des items visuels fut interprétée comme le résultat d'un choix stratégique de la patiente à ne pas utiliser le processus de contrôle articulatoire du fait de sa dépendance à une unité de stockage déficitaire.

Nous avons mentionné précédemment la mise en œuvre de programmes moteurs du langage dans le processus de répétition subvocale. Cependant, la nature exacte de ce processus reste incertaine. Les études sur des patients souffrant de troubles de l'activité motrice du langage ont permis néanmoins de tester les niveaux impliqués dans la planification motrice langagière liée au processus d'auto-répétition¹⁸⁴. L'anarthrie, parfois appelée désintégration phonétique, se caractérise par une incapacité complète à contrôler les muscles articulatoires¹⁸⁵. Baddeley et Wilson étudièrent un patient, G.B., qui devint anarthrique à l'âge de 19 ans suite à un traumatisme crânien¹⁸⁶. Les résultats à des tâches de mémoire immédiate et de jugements phonologiques montrèrent un fonctionnement de la Boucle Phonologique, en particulier du processus de répétition, tout à fait normal. La conclusion des auteurs est que le fonctionnement de ce processus de répétition ne dépend pas des muscles périphériques du langage. Plus surprenants encore furent les résultats d'une étude menée par Bishop et Robson¹⁸⁷ sur des sujets anarthriques de naissances (*congenitally speechless*) suite à des lésions cérébrales et n'ayant jamais pu produire de langage. Les sujets présentèrent en effet des empan mnésiques tout à fait normaux et des effets de similarité phonologique et de longueur de mot évidents. Les auteurs suggèrent que le processus de répétition implique l'activation d'une représentation phonologique abstraite qui peut être construite uniquement sur la base de perception langagière : une sorte d'"écho phonologique"¹⁸⁸. Baddeley conclut de ces études "[qu'il] semble alors que le langage intérieur ne dépende pas du langage extérieur pour son développement comme pour son fonctionnement. Cela conduit à penser que le terme de Boucle Phonologique est peut-être préférable à celui de Boucle Articulatoire puisque cette dernière semble impliquer une intervention directe du langage"¹⁸⁹. Il semble cependant que

¹⁸³ Shallice, T. & Warrington, E.K. (1970). *op. cit.* ; Vallar, G. & Baddeley, A.D. (1984). Fractionation of working memory: Neuropsychological evidence for a phonological short-term store. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23: 151-161.

¹⁸⁴ Pour une description détaillée de ces études, voir Gathercole, S.E. (1994). Neuropsychology and working memory: A review. *Neuropsychologia*, 8: 494-505.

¹⁸⁵ L'anarthrie se caractérise par des troubles du contrôle musculaire dans les mécanismes de la parole résultant de dysfonctionnement du système nerveux central et/ou périphérique. Kent, D.R., Kent, F.J., Weismer, G. & Duffy, J.R. (2000). What dysarthria can tell us about the neural control of speech. *Journal of Phonetics*, 28: 273-302.

¹⁸⁶ Baddeley, A.D. & Wilson, B. (1985). Phonological coding and short-term memory in patients without speech. *Journal of Memory and Language*, 24: 490-502.

¹⁸⁷ Bishop, D.V.M. & Robson, J. (1989). Unimpaired short-term memory and rhyme judgment in congenitally speechless individuals: Implications for the notion of "articulatory coding". *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A: 123-140.

¹⁸⁸ Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1993). *Working Memory and Language*. Hove, Lawrence Erlbaum.

¹⁸⁹ Baddeley, A.D. (1990). *op. cit.* Il est également à noter une étude sur deux patients anarthriques présentant une perturbation dissociée de la composante de récapitulation subvocale. Le premier, souffrant de lésions bilatérales du pons, résultant en un syndrome de type locked-in, ne montrait pas d'effet de longueur de mot mais un effet de similarité phonologique en présentation visuelle et auditive. Le second, présentant une lésion corticale située dans le gyrus précentral ventral, montrait à la fois un effet de longueur et de similarité phonologique en présentation auditive mais aucun effet en présentation visuelle. Pour les auteurs, cette dissociation suggère que l'encodage phonologique et la répétition subvocale sont deux fonctions articulatoires distinctes liées à la mémoire de travail. Cubelli, R. & Nichelli, P.

des commandes articulatoires de haut niveau soient impliquées dans le processus de répétition. Waters et ses collègues¹⁹⁰ ont étudié les capacités de la mémoire auditive à court terme de sujets présentant une détérioration acquise du langage parlé nommée apraxie articulatoire (*apraxia of speech / articulatory apraxia*). Ce trouble laisse plus ou moins intact le contrôle des muscles articulatoires mais entraîne de sévères déficits dans la planification de haut niveau des gestes moteurs langagiers. Les résultats des tests indiquèrent que la mémoire immédiate de ces sujets n'était pas sujette à l'effet de longueur de mot. Pour certains auteurs, ces derniers résultats peuvent être reliés aux précédents si l'on suppose d'une part que le processus de répétition consiste en un ensemble de commandes articulatoires abstraites de haut niveau – le fonctionnement normal de la boucle des sujets anarthriques provenant de la capacité intacte de planification motrice langagière bien qu'ils soient incapables de contrôler les muscles périphériques du langage – et d'autre part que cette capacité de planification articulatoire abstraite soit innée – d'où le fonctionnement normal des sujets anarthriques de naissance¹⁹¹.

Ecologie de la Boucle Phonologique

La question concernant le rôle de la mémoire de travail dans les activités cognitives telles que l'apprentissage, la compréhension et le raisonnement fut à l'origine du développement du modèle de Baddeley et Hitch. Cependant, les études neuropsychologiques sur des sujets présentant des déficits marqués de la mémoire à court terme tout en conservant des capacités cognitives normales montrèrent à quel point le rôle majeur de la Boucle Phonologique dans ce domaine était loin d'être une évidence. Des études récentes liées au développement de la capacité mnésique à court terme durant l'enfance suggèrent cependant le rôle fondamental de la Boucle Phonologique dans l'apprentissage de formes phonologiques nouvelles, aussi bien pour la langue maternelle que pour l'apprentissage ultérieur d'une langue étrangère¹⁹².

Durant l'enfance, on constate une grande disparité des capacités de la mémoire à court terme, et ce pour des enfants de même âge. Cette disparité est également présente concernant le degré d'acquisition de vocabulaire de la langue maternelle. La synthèse de différentes expériences relatives à l'empan de nombres, l'habilité de répétition de non-mots¹⁹³ et le degré d'acquisition du vocabulaire chez des enfants de 3 à 8 ans a permis de constater une corrélation significative entre degré d'acquisition du vocabulaire et résultats aux tâches mnésiques, avec une corrélation plus forte pour la tâche de répétition de non-mots¹⁹⁴. Une autre étude a montré que le rappel immédiat de pseudo-mots était meilleur pour des items présentant une structure phonologiquement correcte par rapport à la langue maternelle de l'enfant¹⁹⁵. Ce résultat, similaire à l'effet de ressemblance lexicale, indique donc l'apport des connaissances implicites de la langue sur les performances de rappel pour ces items. Cependant, les données montrent également une plus forte corrélation entre degré d'acquisition du vocabulaire et performance de rappel pour des items présentant une structure phonologique non-familiale. Un autre résultat important est celui de Gathercole et Baddeley qui, suite à des mesures de répétition de non-mots, ont testé chez des enfants de 5 ans les

(1992). Inner speech in anarthria: Neuropsychological evidence of differential effects of cerebral lesions on subvocal articulation. *Journal of Clinical & Experimental Neuropsychology*, 14: 499-517.

¹⁹⁰ Waters, G.S, Rochon, E. & Caplan, D. (1992). The role of high-level planning in rehearsal: Evidence from patients with apraxia of speech. *Journal of Memory and Language*, 31: 54-73.

¹⁹¹ Gathercole, S.E. (1994). *op. cit.*

¹⁹² Pour une revue, voir Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1993). *op. cit.* ; Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105:158-173 ; Comblain, A. (1999). Mémoire de travail et langage. In: Rondal, J.A. & Séron, X. (Editors), *Troubles du Langage : Bases Théoriques, Diagnostic et Rééducation*, Mardaga, pp. 312-347. Le rôle de la Boucle Phonologique dans l'acquisition de formes phonologiques nouvelles a été suggéré initialement par une étude sur la patiente P.V. indiquant des performances faibles lors de l'apprentissage de vocabulaire d'une langue étrangère. Baddeley, A.D., Papagno, C. & Vallar, G. (1988). When long-term learning depends on short-term storage. *Journal of Memory and Language*, 27: 586-595.

¹⁹³ La tâche de répétition de non-mots fournit une mesure de la précision avec laquelle un sujet peut répéter plusieurs fois un mot sans signification sémantique. Cette tâche, plus indépendante du lexique, apparaît être un bon prédicteur du degré d'acquisition du vocabulaire chez l'enfant et refléter de manière indirecte les capacités de mémoire de travail verbale.

¹⁹⁴ Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C. (1998). *op. cit.*

¹⁹⁵ Gathercole, S.E. (1995). Is nonword repetition a test of phonological memory or long-term knowledge? It all depends on the nonwords. *Memory & Cognition*, 23: 83-94.

capacités d'apprentissage de mots familiers ou non familiers mais présentant les mêmes structures phonologiques. Les résultats furent clairs : Les enfants présentant un faible score à la tâche de répétition avaient plus de difficultés à apprendre les mots non-familiers que les autres mais les différences de scores s'effaçaient pour les mots familiers¹⁹⁶.

Les liens entre Boucle Phonologique et apprentissage phonologique à long terme ne peuvent donc pas s'expliquer de manière unidirectionnelle¹⁹⁷. Il est évident que les capacités de mémoire à court-terme et les connaissances phonologiques et lexicales forment une relation interactive. Ainsi, le rôle de la Boucle Phonologique permettrait l'apprentissage de formes phonologiques nouvelles et, sinon la création, du moins le renforcement des structures phonologiques sous-jacentes en mémoire à long-terme tandis que cette dernière servirait de support à la rétention temporaire de matériel dans la boucle. Pour Baddeley, Gathercole et Papagno, "*la fonction de la Boucle Phonologique est de permettre la conservation temporaire de formes phonologiques nouvelles jusqu'à ce que des représentations plus durables soient construites en mémoire. La contribution de ce système dans la rétention de matériel verbal familier au travers des tâches conventionnelles d'empan mnésique est simplement, nous l'affirmons, un produit accidentel de la fonction primaire de la Boucle Phonologique, laquelle est de servir l'apprentissage du langage*"¹⁹⁸.

La Boucle Phonologique, Siège des Transformations Verbales ?

Comme indiqué précédemment, Reisberg et ses collègues ont suggéré le lien possible entre l'Effet de Transformation Verbale et la Boucle Phonologique. Pour les auteurs, le contraste observé dans leur étude entre imagerie pure et imagerie enactée converge en effet avec la dissociation fonctionnelle entre les deux composantes de ce système mnésique¹⁹⁹. Le processus de récapitulation subvocale serait ainsi à la base des mécanismes d'enactment - nécessaires à l'ambiguïsation du stimulus et, de là, à l'émergence de nouvelles représentations - l'unité de stockage phonologique permettant la rétention temporaire de la représentation verbale en cours. L'association des deux composantes établirait ainsi une plate-forme adaptée aux transformations verbales.

Table 14 : Tableau récapitulatif des perturbations de l'Effet de Transformation Verbale, lors des paradigmes expérimentaux de perception et de production, liées aux différents effets associés à la Boucle Phonologique (✓ : Effet perturbateur ; ✗ : Effet non testable ; ? : Effet non testé).

Effet	Ecoute inattentive	Longueur de mot	Suppression articulaire	Similarité phonologique	Lexicalité
Procédure de perception	✗	✓	✓	✓	✓
Procédure de Production	✓	?	✓	?	?

Cette hypothèse de l'engagement de la Boucle Phonologique dans l'analyse et l'émergence des transformations verbales est aussi suggérée par l'incidence des effets expérimentaux associés à ce

¹⁹⁶ Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1990). The role of phonological memory in vocabulary acquisition: A study of young children learning new names. *British Journal of Psychology*, 81: 439-454.

¹⁹⁷ Il est à noter que la question de la nature unitaire ou duale de la mémoire verbale est de nouveau remise en question, notamment par certaines études de neuroanatomie fonctionnelle suggérant que la mémoire de travail ne représenterait qu'un état actif de la mémoire à long-terme. Ruchkin, D.S., Grafman, J., Cameron, K. & Berndt, R.S. (2004). Working memory retention systems: A state of activated long-term memory. *Behavioral and Brain Sciences*, to appear ; Chein, J.M., Ravizza, S.M. & Fiez, J.A. (2003). Using neuroimaging to evaluate models of working memory and their implication for language processing. *Journal of Neurolinguistics*, 16: 315-339.

¹⁹⁸ Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C. (1998). *op. cit.*

¹⁹⁹ Baddeley lui-même considère son modèle comme le siège possible des images mentales auditivo-verbales : Baddeley, A.D. & Logie, R. (1992). Auditory imagery and working memory. In: Reisberg, D. (Editor), *Auditory Imagery*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, pp. 179-197.

modèle de mémoire de travail sur la stabilité/instabilité des représentations verbales (voir la Table 14). Ces perturbations apparaissent de plus conformes à la dissociation fonctionnelle de ce modèle en deux composantes distinctes. En effet, certaines peuvent être expliquées en termes de compétition/interférence entre candidats possibles, entraînant un nombre de transformations plus important, et donc être reliées à l'unité de stockage phonologique (effet d'écoute inattentive, effet de similarité phonologique, effet de lexicalité), tandis que d'autres correspondent plus à une altération du processus de contrôle articulatoire, limitant l'apparition de nouvelles transformations (effet de longueur de mot, effet de suppression articulatoire).

Ainsi, la stabilité des transformations (relative au nombre de transformations rapportées) est, lors d'une procédure de perception, fonction de la longueur syllabique²⁰⁰, de la densité de voisinage²⁰¹ et de la nature lexicale de l'item répété²⁰² (mot *vs.* pseudomot, pseudomot phonologiquement légal *vs.* illégal). Il a également été établi qu'une tâche concurrente de production silencieuse ou chuchotée entraînait une baisse des transformations²⁰³. De plus, lors d'une procédure de production interne, Smith, Wilson & Reisberg ont montré que des tâches conjointes de suppression articulatoire silencieuse et d'écoute distractive, censées bloquer respectivement le processus de répétition et l'unité de stockage phonologique, empêchaient toutes deux de déceler une éventuelle transformation²⁰⁴. Un dernier argument expérimental en faveur de cette hypothèse d'implication de la Boucle Phonologique est que la diminution progressive du nombre de transformations selon différents degrés d'enactment observée par Reisberg et ses collègues ainsi que dans notre première étude apparaît analogue à celle observée par Murray lors d'une tâche d'empan de chiffres²⁰⁵. Ce dernier montra en effet que les résultats de rappel étaient fonction du mode de répétition/maintenance des stimuli par les sujets, les taux de rappel étant plus élevés lors d'une répétition à haute voix que lors d'une répétition chuchotée ou encore silencieuse.

Hypothèses Neuro-Anatomiques

Les hypothèses neuro-anatomiques préalables à cette étude des transformations verbales ont été formulées dans le cadre de l'hypothèse d'implication de la Boucle Phonologique, nous rappellerons donc brièvement la neuro-anatomie fonctionnelle de ce système.

Un réseau neural de la Boucle Phonologique récemment mis en évidence par imagerie cérébrale est le Causal Network Model de Bullmore et collègues²⁰⁶. Il est modélisé par un chemin (*path diagram*) comprenant, pour l'hémisphère gauche, un ensemble circulaire d'effets causaux unidirectionnels. Du cortex dorsolatéral préfrontal (DLPFC, BA 9/46) vers l'aire motrice supplémentaire (SMA - BA 6m), puis vers le gyrus frontal inférieur (IFG, approximativement l'aire de Broca BA 44, pars opercularis), et vers le gyrus supramarginal (BA 40), avec retour vers le DLPFC. Il faut ajouter que plusieurs études font apparaître le cortex insulaire antérieur gauche qui est au voisinage de l'aire de Broca (opercule rolandique), l'implication possible des cortex moteur et pré-moteur (gyrus précentral, BA 4, gyrus moyen frontal BA 6) et du cortex somatosensoriel (gyrus postcentral, BA 1,2,3), le gyrus cingulaire antérieur (BA 32), une composante auditive (gyrus supérieur temporal, BA 22/42)²⁰⁷ et, enfin, le cervelet.

²⁰⁰ Warren, M.R. (1961). *op. cit.* ; Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

²⁰¹ Yin, C. & MacKay, D.G. (1992). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.*

²⁰² Natsoulas, T. (1965). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

²⁰³ MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.*

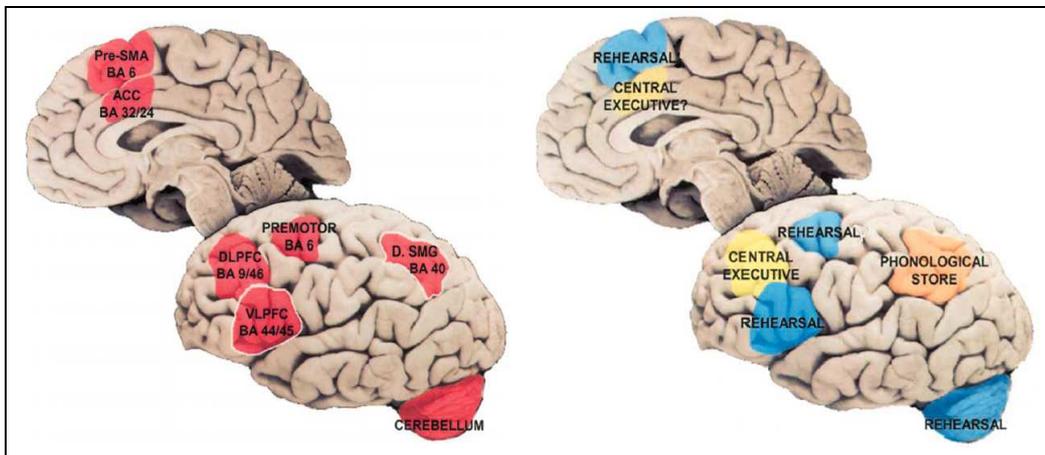
²⁰⁴ Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). *op. cit.*

²⁰⁵ Murray, D. (1967). The role of speech responses in short-term memory. *Canadian Journal of Psychology*, 21: 263-276.

²⁰⁶ Bullmore, E., Horwitz, B., Honey, G. & Sharma, T. (1999). A causal network model for the articulatory loop. *NeuroImage*'99: Poster 1010 ; Voir aussi : Honey, G.D., Fu, C.H.Y., Kim, J., Brammer, M.J., Croudace, T.J., Suckling, J., Pich, E.M., Williams, S.C.R. & Bullmore, E. (2002). Effects of verbal working memory load on corticocortical connectivity modeled by path analysis of functional magnetic resonance imaging data. *NeuroImage*, 17: 573-582.

²⁰⁷ Paulesu, E., Frith, C.D. & Frackowiak, R.S.J. (1993). The neural correlates of the verbal components of working memory. *Nature*, 362: 342-344 ; Cohen, J.D., Perlstein, W.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Noll, D.C., Jonides, J. & Smith, E.E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386: 604-608 ; Smith, E.E., Jonides, J., Marshuetz, C. & Koeppel, R.A. (1998). Components of verbal working memory: Evidence from

Figure 13 : Tentative de mapping des composantes de la Boucle Phonologique et de l'Administrateur Central. Le réseau neural associé aux tâches de mémoire de travail verbale inclut notamment les régions du cortex dorsolatéral préfrontal (DLPFC), du cortex frontal ventrolatéral (VLPFC), du cortex prémoteur, de l'aire motrice supplémentaire (SMA), du cortex cingulaire antérieure (ACC) et du cervelet. Repris de Chein, Ravizza & Fiez (2003).



La plupart des études suggèrent une dissociation entre les processus soutenant la répétition verbale (*rehearsal process*) et d'autres mécanismes impliqués dans la rétention et la manipulation des informations en mémoire de travail (*active storage - executive processes*). L'hypothèse la plus couramment admise attribue au gyrus frontal inférieur un rôle crucial dans le processus de répétition et établit la correspondance entre le gyrus supramarginal et l'unité de stockage phonologique. Une expérience menée par Cohen et collègues²⁰⁸ a permis de préciser cette dissociation. Dans cette étude, les auteurs font varier à la fois la difficulté de la tâche et la vitesse de présentation des items (*n-back task*). Les résultats indiquent que le degré d'activation des aires relatives aux processus sensoriels et moteurs est fonction de la vitesse de présentation mais non de la charge mnésique de la tâche (activité transitoire), tandis que les régions directement liées à la Boucle Phonologique présentent soit une activation uniquement relative à la charge mnésique (activité maintenue et fonction de la charge mnésique - cortex préfrontal dorsolatéral et gyrus supramarginal), soit une activation découlant de l'interaction charge mnésique/vitesse de présentation (activité transitoire mais fonction de la charge mnésique - l'aire de Broca). Ces résultats suggèrent ainsi une dissociation entre les processus soutenant la répétition verbale et d'autres mécanismes impliqués dans la rétention et la manipulation des informations en mémoire de travail. Les auteurs soulignent cependant la complexité des liens dans les régions préfrontales entre les processus de maintenance (liée au processus de répétition) et de contrôle actif de l'information (lié à l'administrateur central²⁰⁹).

neuroimaging. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 95: 876-882 ; Fujimaki, N., Nielsen, M., Hayakawa, T., Kato, M. & Miyauchi, S. (1999). Neural activity dependent on phonological demands in a verbal working memory task. *NeuroImage '99*: Poster 919 ; Henson, R.N.A., Burgess, N. & Frith, C.D. (2000). Recoding, storage, rehearsal and grouping in verbal short-term memory: An fmri study. *Neuropsychologia*, 38: 426-440.

²⁰⁸ Cohen, J.D., Perlstein, W.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Noll, D.C., Jonides, J. & Smith, E.E. (1997). *op. cit.* Voir également : Smith, E.E., Jonides, J., Marshuetz, C. & Koeppel, R.A. (1998). *op. cit.* ; Jonides, J., Schumacher, E.H., Smith, E.E., Koeppel, R.A., Awh, E., Reuter-Lorentz, P.A., Marshuetz, C. & Willis, C.R. (1998). The role of parietal cortex in verbal working memory. *Journal of Neuroscience*, 18: 5026-5034 ; Honey, G.D., Bullmore, E. & Sharma, T. (2000). Prolonged reaction time to a verbal working memory task predicts increased power of posterior parietal cortical activation. *NeuroImage*, 12: 495-503.

²⁰⁹ Le corrélat neuroanatomique de l'administrateur central est considéré comme dépendant des régions du cortex dorsolatéral préfrontal et du cortex cingulaire antérieure. Ces deux régions seraient toutes deux impliquées dans les processus exécutifs de contrôle attentionnel de l'information. Cependant une dissociation fonctionnelle a été suggérée entre ces deux régions, la première étant liée à l'allocation des ressources attentionnelles, la seconde étant impliquée dans les processus d'inhibition de réponses préprogrammées, de compétition entre différentes réponses possibles ou dans le monitoring des performances du sujet. Smith, E.E. & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283: 1657-1661 ; Barch, D.M., Braver, T.S., Sabb, F.W. & Noll, D.C. (2000). Anterior cingulate

Cette distinction entre activité transitoire des régions relatives aux processus sensoriels d'encodage de l'information verbale et activité maintenue des régions impliquées dans la rétention et la manipulation des informations verbales est aussi confirmée par des études portant sur la dynamique temporelle des activations neurales lors de tâches métalinguistiques nécessitant l'engagement du système de mémoire de travail verbale (détection de phonèmes, catégorisation/association sémantique)²¹⁰. Les résultats montrent en effet un gradient des pics de réponses hémodynamiques événementielles entre les régions associées aux processus d'encodage de l'information phonologique (gyrus supérieur temporal) et celles associées aux processus de rétention et d'analyse de l'information verbale (gyrus supramarginal et acortex préfrontal inférieur, respectivement). Le délai observé des pics d'action hémodynamiques dans ces deux dernières régions semble ainsi indiquer une possible ségrégation temporelle des mécanismes d'encodage, de rétention et d'analyse de l'information verbale mis en œuvre lors de tâches de mémoire de travail.

Face à cette implication supposée de la mémoire de travail dans l'Effet de Transformation Verbale, l'identification anatomo-fonctionnelle des mécanismes cérébraux relatifs à cette tâche – soit, les processus de répétition subvocale, d'analyse syllabique, de stockage temporaire de l'information linguistique et de prise de décision – pourrait permettre une compréhension affinée des composantes de ce système. En regard des données d'imagerie cérébrale présentées ci-dessus, l'interprétation en termes de neuro-anatomie de la procédure de transformations verbales est selon nous la suivante :

- *De la vocalisation à la subvocalisation : un simple continuum*

A partir du moment où le sujet ne peut compter que sur sa propre production du mot à transformer, on assiste dans l'ensemble à une diminution progressive des résultats de transformation²¹¹ : depuis la condition où il s'écoute avec *feedback* externe, où le mouvement externe (et donc interne) est entier, jusqu'à la condition où le sujet s'imagine répétant, condition où le mouvement est censé être purement interne. Entre ces deux extrêmes, les conditions où le mouvement est partiellement externalisé : chuchotement, puis articulation silencieuse (*mouthng*). Ces résultats correspondent selon nous à une implication toujours moindre des aires sensori-motrices pendant la simulation mentale du mouvement par rapport au mouvement exécuté²¹².

- *L'analyse de l'action dans l'aire de Broca*

Il faut pour dépister la transformation, analyser la séquence entendue répétitivement pour trouver l'éventuel mot caché derrière celui qui est entendu : Cette activité serait réalisée selon nous par la région postérieure dorsale du gyrus frontal inférieur (soit l'aire de Broca, BA 44, *pars opercularis*), ce, en accord avec les études montrant la spécialisation de cette région dans le traitement phonologique et le suivi attentionnel en parole. Rappelons que cette aire ne peut être réduite à une aire de production motrice du langage : Ainsi les tâches de répétition automatique de syllabes, mots ou phrases n'impliquent pas l'activation de Broca²¹³. En revanche, le gyrus frontal

and the monitoring of response conflict: Evidence from an fMRI study of verb generation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(2): 298-309 ; Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T. & Shibasaki, H. (2003). The neural basis of individual differences in working memory capacity: An fMRI study. *NeuroImage*, 18: 789-797.

²¹⁰ Thierry, G., Boulanouar, K., Kherif, F., Ranjeva, J.-P. & Démonet, J.-F. (1999). Temporal sorting of neural components underlying phonological processing. *Neuroreport*, 10: 2599-2603 ; Thierry, G., Ibarrola, D., Démonet, J.-F. & Cardebat, D. (1999). Demand on verbal working memory delays haemodynamic response in the inferior prefrontal cortex. *Human Brain Mapping*, 19: 37-46.

²¹¹ Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.*

²¹² Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C., Segebarth, C., Morand, S., Gemignani, A., Decors, M. & Jeannerod, M. (1996). *op. cit.* ; Porro, C.A., Francescato, M.P., Cettolo, V., Diamond, M.E., Baraldi, P., Suiani, C., Bazzocchi, M. & di Prampero, P.E. (1996). *op. cit.* Pour une revue, voir Jeannerod, M. & Frack, V. (1999). *op. cit.* ; Jeannerod, M. (2001). *op. cit.*

²¹³ Larsen, B., Skinhoj, E. & Lassen, N.A. (1978). Variations in regional cortical blood flow in the normal human brain. *Neuroreport*, 10: 7765-769 ; Murphy, K., Corfield, D.R., Guz, A., Fink, G.R., Harrison, J., Wise, R.J.S. & Adams, L. (1997). Cerebral areas associated with motor control of speech in humans. *JAP*, 83:1438-1447 ; Wise, R.J., Greene, J., Buchel, C. & Scott, S.K. (1999). Brain regions involved in articulation. *Lancet*, 353: 1057-1061 ; Bookheimer, S.Y., Zeffiro, T.A., Blaxton, T., Gaillard, W.D. & Theodore, W.H. (2000). Activation of language cortex with automatic speech tasks. *Neurology*, 55:1151-1157 ; Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Meyer, J., Dogil, G., Haider, H. & Grodd, W. (2000). Articulatory/phonetic sequencing at the level of the anterior perisylvian cortex: A functional magnetic

inférieur gauche, dans sa partie operculaire, est sollicité lors de l'écoute attentive de liste de mots différents, lors de processus de conversion grapho-phonémique en lecture silencieuse de mots ou de non-mots, enfin, dans des tâches nécessitant "la scission de l'atome" qu'est la syllabe, notamment dans des tâches de rimes, de comptage, de détection de phonèmes²¹⁴.

- *La transformation verbale et sa dépendance au phasage articulatoire : ou l'insula, l'oubliée de la mémoire de travail*

En termes de neuro-anatomie fonctionnelle, notre hypothèse est que le système qui automatise les coordinations articulatoires correspond à l'extrémité antérieure de l'insula gauche. Le rôle de cette région a notamment été démontré par Dronkers²¹⁵ dans une étude comparative de patients apraxiques souffrant de troubles de la programmation/coordination des gestes articulatoires (*apraxia of speech*) et d'un groupe contrôle. Les données ont permis d'établir la présence systématique d'une lésion focale du gyrus précentral gauche de l'insula chez les sujets apraxiques et l'absence d'une telle lésion chez les sujets contrôles. Ces résultats coïncident avec ceux de Wise *et al.*, qui ont également montré l'activation de la partie antérieure gauche de l'insula dans une tâche de répétition de mots²¹⁶. Enfin, l'absence d'activation de cette région dans des tâches de production de séquences articulatoires "simples" comparée à des séquences plus complexes renforcent notre hypothèse du rôle de l'insula antérieure gauche dans l'émergence des phasages articulatoires lors de la tâche de transformation verbale²¹⁷.

resonance imaging (fmri) study. *Brain and Language*, 75: 259-276 ; Wildgruber, D., Ackermann, H. & Grodd, W. (2001). Differential contributions of motor cortex, basal ganglia, and cerebellum to speech motor control: Effects of syllable repetition rate evaluated by fmri. *NeuroImage*, 13: 101-109 ; Nota, Y., Honda, K., Shimada, Y. & Fujimoto, I. (2002). Brain regions involved in motor control of speech. *NeuroImage* 2002: Poster 10140.

²¹⁴ Démonet, J.-F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J.L., Wise, R., Rascol, A. & Frackowiak, R.S.J. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115: 1753-1768 ; Paulesu, E., Frith, C.D. & Frackowiak, R.S.J. (1993). *op. cit.* ; Démonet, J.-F., Price, C., Wise, R. & Frackowiak, R.S.J. (1994). A pet study of cognitive strategies in normal subjects during language tasks: Influence on phonetic ambiguity and sequence processing on phoneme monitoring. *Brain*, 117(pt4): 671-682 ; Démonet, J.-F., Fiez, J.A., Paulesu, E., Petersen, S.E. & Zatorre, R.J. (1996). PET studies of phonological processing. A critical reply to Poeppel. *Brain and Language*, 55: 352-379 ; Price, C., Moore, C.J., Humphreys, G.W. & Wise, R.J.S. (1997). Segregating semantic from phonological processes during reading. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 9: 727-733 ; Fiez, J., Balota, D.A., Raichle, M.E. & Petersen, S.E. (1999). Effects of lexicality, frequency, and spelling to sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron*, 24: 205-218 ; Thierry, G., Boulanouar, K., Kherif, F., Ranjeva, J.-P. & Démonet, J.-F. (1999). *op. cit.* Pour une revue, Poldrack, R.A., Wagner, A.D., Prull, M.W., Desmond, J.E., Glover, G.H. & Gabrieli, J.D.E (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage*, 10: 15-35.

²¹⁵ Dronkers, N.F. (1996). A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature*, 384: 159-161.

²¹⁶ Wise, R.J., Greene, J., Buchel, C. & Scott, S.K. (1999). *op.cit.*

²¹⁷ Murphy, K., Corfield, D.R., Guz, A., Fink, G.R., Harrison, J., Wise, R.J.S. & Adams, L. (1997). *op. cit.* ; Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Meyer, J., Dogil, G., Haider, H. & Grodd, W. (2000). *op. cit.* Voir également Dronkers, N.F. & Baldo J.V. (2001). Neural basis of speech production In: *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*. Elsevier, pp. 1875-14879 ; Ackermann, H. & Riecker, A. (2004). The contribution of the insula to motor aspects of speech production: a review and a hypothesis. *Brain and Language*, 89(2): 320-328..

Neuroanatomie Fonctionnelle des Transformations Verbales

Cette section a pour objectif la description de l'étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle menée sur l'Effet de Transformation Verbale lors d'une procédure de répétition interne et devant permettre une interprétation précisée des processus cognitifs et cérébraux impliqués dans l'analyse et l'émergence des représentations mentales phonologiques.

Méthode Expérimentale

Sujets

Dix sujets volontaires sains droitiers²¹⁸ participèrent à l'expérience (moyenne d'âge : 24 ± 7 ans – 3 femmes et 7 hommes). Les sujets étaient tous des locuteurs natifs du français. Aucun ne présentait de troubles articulatoires ou auditifs, ni d'anomalie anatomique évidente (suite à l'examen des images anatomiques) ou de passé médical concernant d'éventuels troubles neurologiques ou psychiatriques. Tous les sujets ont donné au préalable leur consentement éclairé. Cette étude a reçu un avis favorable du Comité Consultatif de Protection des Personnes pour la Recherche Biomédicale (CCPPRB) de Grenoble (Centre Hospitalier Universitaire - Grenoble II).

Matériel Phonétique

Deux paires de logatomes monosyllabiques /psə/-/əps/ et /spə/-/pəs/ – obtenues par combinaison de la voyelle neutre [ə], de la labiale [p] et de la coronale [s] – ont été sélectionnées. Dans le but de tester une éventuelle influence lexicale (i.e., mot vs. non-mot) durant la procédure de transformation verbale²¹⁹, une paire de prénoms dissyllabiques - /louis-jean/-/jean-louis/, /lwi.ʒã/-/ʒã.lwi/ - fut également utilisée.

Procédure

De manière à évaluer les activations cérébrales spécifiquement associées aux transformations verbales, deux conditions furent contrastées dans un paradigme de type "bloc" :

- Une condition de base (*baseline*) impliquant la répétition mentale de chacune des séquences.
- Une condition de transformation verbale (*VT*) impliquant la répétition mentale des mêmes séquences avec recherche active de transformations.

La condition de transformation verbale impliquait, pour chacune des paires de stimuli, la répétition initiale d'une des deux séquences (e.g. /spə/) d'une même paire de stimuli jusqu'à l'émergence perceptive de la séquence associée (/pəs/), elle-même alors répétée jusqu'à la détection de la première séquence, et ainsi de suite. Cette procédure, bien que quelque peu

²¹⁸ Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9: 97-114.

²¹⁹ Natsoulas, T. (1965). *op. cit.* ; MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). *op. cit.* ; Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). *op. cit.*

restrictive face au paradigme classique de transformation verbale dans lequel aucune information n'est donnée quant aux transformations envisagées, avait pour but de délimiter l'activité cognitive des sujets et ainsi permettre une meilleure réalisation de la tâche. En regard des patterns de transformations et du mécanisme de couplage par paire des transformations observés dans les études comportementales précédentes (cf. Chapitres II & III), nous considérons que les processus cognitifs impliqués dans l'analyse et l'émergence des représentations mentales phonologiques sont ici préservés.

Dans le cadre de cette procédure de recherche de transformation successive entre deux séquences, les deux paires de logatomes monosyllabiques ont été choisies en fonction des asymétries de transformations observées dans la première étude comportementale, ce, de manière à pouvoir corrélérer les activations cérébrales observées en fonction du degré de stabilité/attractivité de ces séquences. Ainsi, du fait des hiérarchies /psə/ > /əps/ et /pəs/ = /spə/ précédemment observées en termes d'attractivité, la paire /psə-/əps/ devrait entraîner une stabilité importante vers la séquence /psə/ (et donc un nombre de transformations moindre) tandis que la paire /spə-/pəs/ devrait correspondre à un degré de stabilité plus faible, dû à une alternance perceptive plus favorable entre les deux séquences. Enfin, la paire /lwi.ʒã-/ʒã.lwi/ devrait également entraîner un nombre de transformation partagé entre les deux séquences du fait d'un découpage syllabique relativement automatisé.

Le choix présent de la condition de base, soit la "simple" répétition des stimuli, correspond à l'hypothèse d'une procédure commune de répétition interne²²⁰ (*rehearsal process*) dans les deux conditions. Ce cadre expérimental repose sur une logique additive (ou soustractive) supposant une correspondance quasi terme à terme entre les composants cognitifs engagés dans les deux conditions et leurs éventuels corrélats cérébraux. Cette hypothèse d'addition hiérarchique des composants cognitifs - dans le cas présent, de la condition de base vers la condition de transformation verbale - repose sur deux présupposés : les deux tâches se distinguent entre elles par la présence ou l'absence de "modules" spécifiques et mesurables en terme d'activité cérébrale, et ce, de manière indépendante les uns des autres²²¹. La condition de base doit ainsi permettre d'éliminer les processus incontrôlés généralement associés à une condition de repos²²² (*rest*

²²⁰ La plupart des études IRMf des processus langagiers, du fait des problèmes méthodologiques inhérents à cette technique (soit l'existence d'artefacts lors de la production de mouvements externes), utilisent une procédure de production interne. Cependant, l'utilisation d'une telle approche méthodologique ne permet généralement pas de vérifier/mesurer les performances des sujets, et peut impliquer d'autre part des différences d'activations par rapport à l'utilisation d'une procédure de production ouverte. Voir par exemple : Yetkin, F.Z., Hammeke, T.A., Swanson, S.J., Morris, G.L., Mueller, W.M., McAuliffe, T.L. & Houghton, V.M. (1995). A comparison of functional mr activation patterns during silent and audible language tasks. *AJNR*, 16: 1087-1092 ; Barch, D.M. Sabb, F.W., Carter, C.S., Braver, T.S., Noll, D.C. & Cohen, J.D. (1999). Overt verbal responding during fMRI scanning: Empirical investigations of problems and potential solutions. *NeuroImage*, 10: 642-657 ; Wildgruber, D., Ackermann, H. & Grodd, W. (2001). *op. cit.*. L'avènement des techniques d'imagerie, et notamment l'utilisation de paradigmes de type événementiel, ont cependant permis la mise au point de protocoles impliquant une production ouverte lors de tâches langagières. Huang, J., Carr, T.H. & Cao, Y. (2001). Comparing cortical activations for silent and overt speech using event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, 15: 39-53 ; Dogil, G., Ackermann, H., Grodd, W., Haider, H. Kamp, H., Mayer, J., Riecker, A. & Wildgruber, D. (2002). The speaking brain: A tutorial introduction to fMRI experiments in the production of speech, prosody and syntax. *Journal of Neurolinguistics*, 15: 59-90.

²²¹ Cette conception interprétative est partiellement dérivée de deux postulats théoriques spécifiques des études en neuropsychologie cognitive : les postulats de modularité et de transparence. Ces postulats impliquent l'existence de différents systèmes de traitement de l'information, spécifiques et autonomes, constitutifs de la cognition humaine et décomposables en sous-systèmes fonctionnels. Voir, Seron, X. (1993). *La Neuropsychologie Cognitive*. Paris, Presses Universitaires de France ; Seron, X. & Jeannerod, M. (1994). *Manuel de Neuropsychologie Humaine*. Liège, Mardaga ; Eustache, F. & Faure, S. (1996). *Manuel de neuropsychologie*. Paris, Dunod ; Pessenti M. (2002). L'imagerie cérébrale fonctionnelle et la neuropsychologie. In: Houde, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (Editors), *Cerveau et Psychologie*, Paris, PUF, pp. 343-370. Voir également, Petersen, S.E., Fox, P.T., Posner, M.I., Mintun, M. & Raichle, M.E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331: 585-588 ; Posner, M.I. & Raichle, M.E. (1994). *Images of Mind*. Scientific American Library, New-York.

²²² Ainsi, une méta-analyse utilisant les données d'études TEP a montré l'activation d'un réseau neural associé à la mémoire de travail lors d'une condition de repos. Mazoyer, B., Zago, L., Mellet, E., Bricogne, S., Etard, O., Houde, O., Crivello, F., Joliot, M., Petit, L. & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Cortical networks for working memory and executive functions sustain the conscious resting state in man. *Brain Research Bulletin*, 54(3): 287-298. Pour une étude des différences possibles d'activations cérébrales inhérentes au choix de la tâche de référence, voir Newman, S.D., Twieg,

condition) où le sujet est censé n'effectuer aucune opération mentale et de dégager les composants spécifiquement associés à la tâche de transformation verbale²²³.

Etant donnée l'absence de contrôle durant l'expérience, les sujets furent soumis à un entraînement intensif préalable. Cet entraînement consistait en l'exécution des deux conditions de répétition et de recherche alternée de transformation à un débit de deux syllabes par seconde, d'abord lors d'une procédure de production ouverte puis lors d'une procédure de production purement interne, sans mouvement de l'appareil périphérique articulatoire. Lors de la procédure de production à haute voix, la vitesse de répétition de deux syllabes par seconde fut contrôlée, ne montrant pas de différences importantes à la fois entre les sujets et entre les conditions. De manière à tester la réalisation effective de la condition de transformation, il était demandé aux sujet de reporter manuellement toute transformation perçue en appuyant sur un bouton poussoir : cette procédure de contrôle a permis de valider l'émergence alternée de transformation pour les trois paires de séquences et pour tous les sujets. Enfin, suite à cet entraînement, l'ensemble des sujets déclarèrent avoir perçu alternativement les deux formes possibles de chaque paire de stimuli et constatèrent de plus une charge attentionnelle et cognitive plus importante dans la condition de recherche de transformation que dans celle consistant en une répétition simple des séquences. Il est enfin à noter que nous ne pouvons *a priori* exclure la possibilité d'émergence accidentelle de transformations verbales lors de la simple répétition des stimuli. Cependant, l'existence de transformations lors de la condition de base entraînerait dès lors une baisse significative des résultats/activations obtenus par contraste entre les deux conditions et n'affecterait donc en rien les conclusions de cette étude.

Du fait de l'emploi des mêmes paramètres expérimentaux (utilisation des mêmes séquences verbales, type et durée de présentation identique des stimuli...) et de l'existence d'une procédure de répétition interne dans les deux conditions et à débit semblable, la soustraction des données métaboliques entre la condition de base et la condition de transformation verbale devait permettre la mise en évidence d'un réseau neural commun relatif aux processus spécifiquement associés aux transformations verbales : soit les processus d'analyse syllabique en ligne (ou parsing syllabique), de stockage temporaire de l'information verbale (ou but de l'action phonologique) et de prise de décision lors de l'émergence d'une nouvelle représentation.

Paradigme Expérimental

La présentation des stimuli fut générée au moyen du logiciel Pyscope v1.1²²⁴ (Carnegie Mellon Department of Psychology) sur un ordinateur Power Macintosh 9600. Les stimuli étaient transmis aux sujets au moyen d'un dispositif de projection composé d'un vidéo-projecteur, d'un écran situé en dehors de l'appareil et d'un miroir centré par rapport à l'axe visuel des sujets. De manière à minimiser les artefacts liés aux mouvements, la tête des sujets était calée à l'intérieur d'une cage de protection (*foam rubbing pad*). Enfin, les sujets portaient des isolants acoustiques dans le but d'atténuer le bruit inhérent à l'appareil²²⁵.

La passation de l'expérience consistait en deux scans fonctionnels et un scan anatomique intercalé entre eux. Chaque session d'acquisition continue des données comprenait neuf périodes successives, consistant en l'alternance de la condition de base et de la condition de transformation

D.B. & Carpenter, P.A. (2001). Baseline conditions and subtractive logic in neuroimaging. *Human Brain Mapping*, 14: 228-235.

²²³ Il est à noter cependant que cette conception additive et hiérarchisée des traitements cognitifs, bien qu'elle soit à la base de la plupart des études d'imagerie fonctionnelle, reste critiquable du fait de l'hypothèse d'une organisation sérielle et cérébralement circonscrite de ces derniers. Certaines études ont ainsi démontré l'existence possible d'effets d'interaction entre composants cognitifs, résultats contradictoire avec l'hypothèse d'une organisation cognitive hiérarchique, démontrant de fait une dynamique non-linéaire des activations cérébrales. Pour une revue, Démonet, J.-F. (2000). Imageries fonctionnelles cérébrales : Vers une physiologie de la cognition humaine. In *Actes des XXIIIèmes Journées d'Etudes sur la Parole*, Aussois, 39-48 ; Démonet, J.-F. & Thierry, G. (2001). Language and Brain: What is up ? What is coming up? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 23: 49-73.

²²⁴ Cohen, J.D., MacWhinney, B., Flatt, M.R. & Provost, J. (1993). PsyScope: A new graphic interactive environment for designing psychology experiments. *Behav. Res. Methods Instruments Comput.*, 25(2): 257-271.

²²⁵ Mazard, A., Mazoyer, B., Etard, O., Tzourio-Mazoyer, N., Kosslyn, S.M., & Mellet, E. (2002). Impact of fmri acoustic noise on the functional anatomy of visual mental imagery. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(2): 172-186.

verbale d'une durée de 50s chacune (voir la Figure 14). Pour chaque condition (voir la Figure 14), des instructions, indiquant la condition et le stimulus devant être répété, étaient affichées (3000 ms). Celles-ci étaient précédées et suivies par l'affichage d'un écran d'alerte (matérialisé par une croix – 1000 ms). Un écran blanc était ensuite affiché durant la tâche proprement dite (45s).

Figure 14 : Déroulement temporel de l'acquisition des données d'une série fonctionnelle (run ou session) constituée de 9 périodes successives (conditions VT et baseline). Chaque condition représente 14 volumes fonctionnels (TR=3.5s), la durée totale de la série fonctionnelle est de 15 minutes.

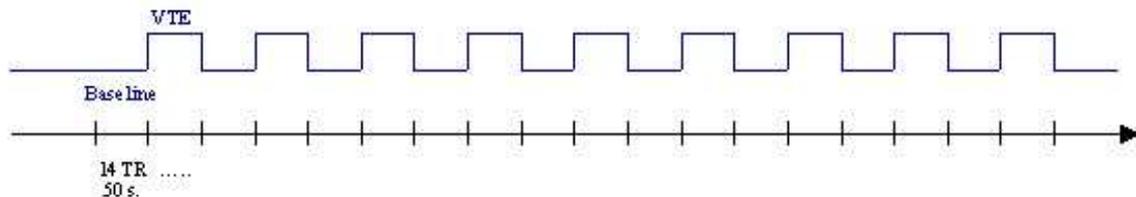
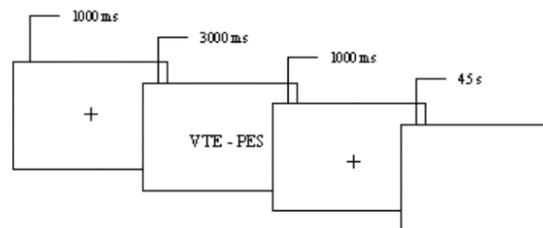


Figure 15 : Représentation temporelle schématique d'une condition de transformation verbale, incluant les événements suivants : (i) écran d'alerte, (ii) instructions, (iii) écran d'alerte, (iv) tâche.



Afin d'éviter un éventuel effet d'ordre, les stimuli furent présentés de manière quasi aléatoire à l'intérieur d'un même scan fonctionnel, entre les scans et entre les sujets (la présentation successive d'un même stimulus pour les deux conditions étant exclue).

Acquisition des Données

Les acquisitions d'IRM anatomique et d'IRM fonctionnelle ont été réalisées sur un imageur 1,5 Tesla (Philips NT, Best, The Netherlands). La technique d'acquisition des images fonctionnelles est de type EPI-BOLD²²⁶, basée sur les variations de concentration en désoxy-hémoglobine en rapport avec l'activité neuronale (effet BOLD pour *Blood Oxygen Level Dependent*) et sur une technique d'acquisition dite d'*echo-planar* (EPI – *echo planar imaging*) basée sur la commutation rapide de gradients de champ magnétique. Suite à une séquence de repérage initial, l'acquisition des volumes fonctionnels était faite selon une orientation parallèle au plan bi-commissural CA-CP (commissures antérieure et postérieure), référence horizontale du système stéréotaxique de Talairach et Tournoux²²⁷. Chaque volume comportait 25 coupes axiales contiguës de 6 mm d'épaisseur pondérées en T2*. Les paramètres des séquences EPI-BOLD étaient les suivants : TE = 45 ms, angle d'impulsion = 90°, TR = 3500 ms, champ de vue = 256*256 mm², matrice d'acquisition = 64*64 pixels, matrice de reconstruction = 64*64 pixels, taille des voxels = 4*4*6 mm³.

L'acquisition d'images anatomiques nécessaire au recalage des images fonctionnelles et à la normalisation spatiale des données sur un modèle de référence s'est déroulée entre le premier et le second scan fonctionnel. La première acquisition anatomique en haute résolution permettait d'obtenir 150 coupes de 1 mm d'épaisseur pondérée en T1 (champ de vue = 256*256 mm², matrice

²²⁶ Mazoyer, B. (2002). L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. In: Houde, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2002). *op. cit.*, pp. 231-256 ; Mazoyer, B. (2002). L'imagerie cérébrale : IRM et TEP. *Pour la Science*, 302: 42-49.

²²⁷ Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *A Co-Planar Stereo-Taxic Atlas of Human Brain*. Stuttgart, Thieme.

d'acquisition = 256*256 pixels, matrice de reconstruction = 256*256 pixels, taille des voxels = 1*1*1 mm³).

Pré-traitement des données

L'ensemble des pré-traitements et analyses statistiques des données IRMf fut effectué au moyen du logiciel SPM-99 (*Statistical Parametric Mapping*²²⁸ - Wellcome Department of Cognitive Neurology, Institute of Neurology, University College of London, UK) sous environnement MATLAB v. 6.1 (Maths Works Inc., Sherbon, USA). La Figure 16 représente la chronologie des pré-traitements des images fonctionnelles et anatomiques.

- Conversion des fichiers images

Préalablement aux pré-traitements des données, une procédure de conversion des fichiers images issus du scanner vers des fichiers au format ANALYZE (format traité par SPM) a été réalisée.

- Modification de la position d'origine

Une procédure d'attribution d'une position d'origine commune des images a ensuite été réalisée pour chacun des sujets (nous avons choisi ici la commissure antérieure²²⁹ comme repère principal devant permettre au logiciel SPM de situer les images fonctionnelles par rapport au volume anatomique).

- Correction du mouvement

De manière à corriger les artefacts possibles liés aux mouvements de tête des sujets, une procédure de correction du mouvement fut appliquée aux images fonctionnelles. Le premier volume fonctionnel acquis de la seconde session (le plus proche temporellement de la série anatomique) est utilisé comme référence au recalage des autres volumes fonctionnels.

Suite au calcul de la matrice de transformation (ou matrice de recalage) pour chacun des sujets (correspondant pour chaque image à la transformation géométrique affine du déplacement rigide de cette image par rapport à l'image de référence), les paramètres de transformations furent appliqués selon une méthode d'interpolation (*sinc interpolation*). L'amplitude des mouvements de chaque sujet est alors appréciée visuellement, l'absence de couronne de voxels activés à la périphérie du cerveau suite aux tests statistiques, synonyme d'une amplitude des mouvements trop importante pour être corrigée, a permis de valider la procédure de recalage pour chacun des sujets.

- Normalisation spatiale

Compte tenu de la variabilité anatomique inter-individuelle²³⁰, cette procédure a pour objectif de plonger l'ensemble des images anatomiques et fonctionnelles dans un même espace (*template*) et ainsi permettre le calcul des coordonnées des régions activées dans un repère commun et la comparaison de ces activations entre les sujets (analyse de groupe).

Une première sous-procédure permet l'estimation des paramètres de normalisation nécessaires pour établir la correspondance spatiale entre le volume anatomique du sujet et le template "T1" disponible dans le logiciel SPM²³¹. Une fois déterminés les paramètres optimum des

²²⁸ Pour une initiation au logiciel SPM : Dauchot, K., Anton, J.-L. & Pelegini-Issac, M. (2001). *SPM'99 : Guide Pratique pour Utilisateur Novice* (<http://irmfmrs.free.fr/Cours/GuideSPM.html>) ; Veltman, D. & Hutton, C. (2001). *SPM'99 Manual* (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/course/manual/>) ; Frackowiak, R.S.J. Frackowiak, R.S.J., Friston, K.J., Frith, C.D., Dolan, R.J. & Mazziotta, J.C. (1997). *Human Brain Function*, Academic Press. Voir également le site SPM (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) ainsi que la mailing-list répertoriant les questions posées par les utilisateurs et réponses de chercheurs compétents (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/help>), le site du *Cognition and Brain Sciences Unit* de Cambridge et les pages écrites par Matthew Brett (http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/Imaging/spm_theory.htm). Nous remercions chaleureusement Carole Peyrin du laboratoire de Psychologie et Neurocognition de Grenoble pour ses explications sur l'utilisation du logiciel SPM.

²²⁹ Les structures cérébrales proches de ce point d'ancrage présentant une variabilité moindre que celles situées à la périphérie du cerveau. Tzourio-Mazoyer, N. & Crivello, F. (2002). L'anatomie corticale probabiliste. In: Houde, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (Editors), *Cerveau et Psychologie*, Paris, PUF, pp. 159-178.

²³⁰ Tzourio-Mazoyer, N. & Crivello, F. (2002). *op. cit.*

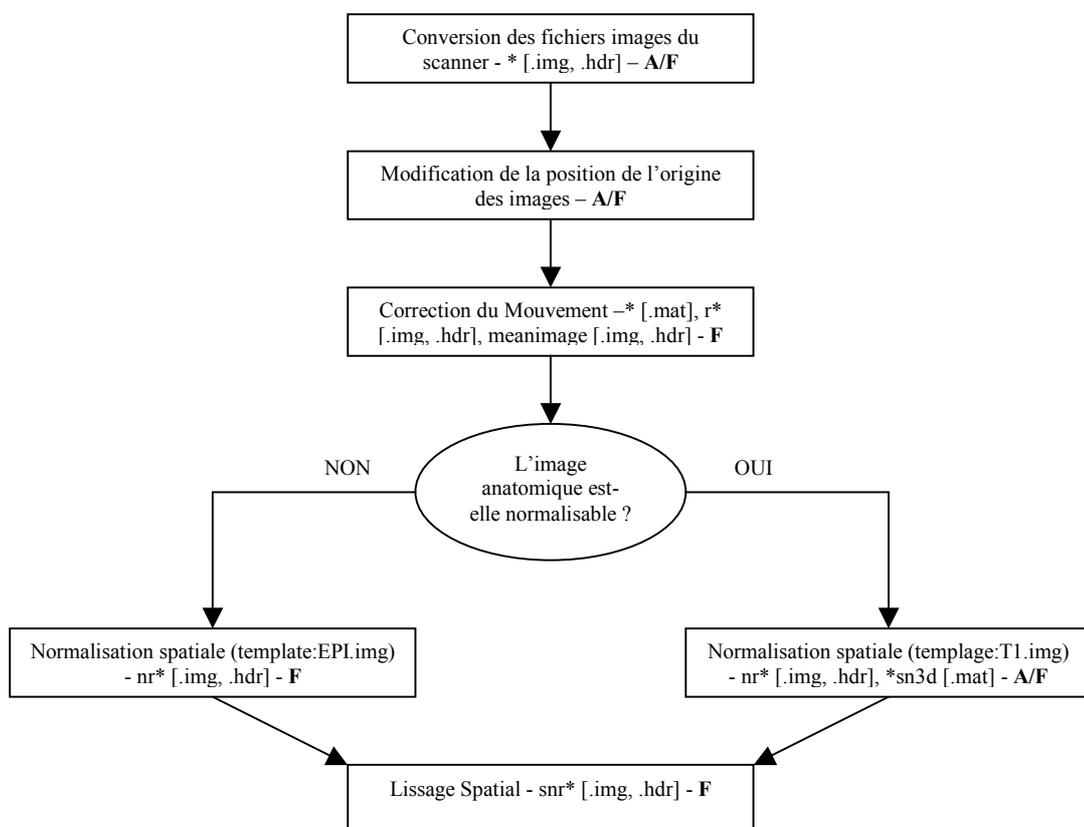
²³¹ Le template T1 correspond à un cerveau moyen de référence issu de la base de données du Montreal National Institute (MNI) et placé dans l'espace stéréotaxique : Evans, A.C., Kamber, M., Collins, D.L. & MacDonald, D. (1994). An MRI-

transformations affines (correction des variations de taille et de position), les possibles différences résiduelles entre les deux images sont corrigées en utilisant une fonction de normalisation non-linéaire²³² (*nonlinear basis functions*). La matrice de transformation ainsi obtenue est alors appliquée au volume anatomique et aux volumes fonctionnels par une méthode d'interpolation bilinéaire²³³.

- Lissage spatial

Les images fonctionnelles sont finalement lissées par un filtre gaussien passe-bas de fréquence de coupure égale à deux fois la taille des voxels initiaux ($8*8*12 \text{ mm}^3$), de manière à améliorer le rapport signal sur bruit et à réduire les variabilités inter-individuelles.

Figure 16 : Chaîne de pré-traitements des images – Le(s) type(s) et nom(s) des fichiers créés suite à chaque opération sont indiqués ainsi que le type d'image sur lequel se base le traitement (A : Image anatomique – F : Image fonctionnelle).



Modèle statistique et inférences : Analyse multi-sujets à "effets fixes"

Cette première analyse est dite "à effets fixes" (*fixed effects* ou *FFX*) : les activations cérébrales individuelles des différents sujets ne sont pas ici supposées être des réalisations aléatoires de

based probabilistic atlas of neuroanatomy. In: Shorvon, S., Fish, D., Andermann, F., Bydder, G.M. & Stefan, H. (Editors), *Magnetic Resonance Scanning and Epilepsy*, NATO, ASI Series, Life Sciences, 264: 263-274.

²³² Friston, K.J., Ashburner, J., Frith, C.D., Poline, J.-B., Heater, J.D. & Frackowiak, R.S.J. (1995a). Spatial registration and normalization of images. *Human Brain Mapping*, 2: 165-189 ; Ashburner, J. & Friston, K.J. (1997). Spatial transformation of images. In: Frackowiak, R.S.J., Friston, K.J., Frith, C.D., Dolan, R.J. & Mazziotta, J.C. (Editors), *Human Brain Function*, Academic Press, pp. 43-58.

²³³ Suite à la perte accidentelle des données anatomiques d'un sujet, le calcul de la matrice des transformations a été réalisé de manière à établir la correspondance entre le volume fonctionnel moyen du sujet et le template "EPI", correspondant à une image de référence pondérée en T2*.

l'activation théorique moyenne d'une population de sujets. Les résultats ne sont donc pas en théorie extrapolables à une autre population que celle étudiée. En d'autres termes, cette analyse tient uniquement compte de la variance moyenne intra-sujets des activations observées sans véritablement considérer les différences d'activations possibles entre sujets.

L'analyse statistique des données comprend les étapes suivantes : la spécification d'un modèle associé au protocole expérimental et associant à chaque condition une forme théorique mathématique des variations du signal IRMf relatif à cette condition, l'optimisation de ces formes théoriques de manière à minimiser les erreurs résiduelles, la définition et l'estimation de contrastes permettant d'étudier l'influence des différentes conditions sur les variations du signal IRMf. Les premiers volumes fonctionnels de chaque série n'ont pas été pris en compte dans cette analyse statistique²³⁴ : La période de stabilisation du signal IRM au début de l'acquisition d'une série fonctionnelle correspondant à un niveau de signal plus élevé et donc à des images artefactées.

- Spécification du modèle

Cette étape a pour objectif la spécification d'un modèle permettant de décrire les réponses hémodynamiques, dans chaque voxel du cerveau et au cours du temps, induites par l'activation neuronale engendrée par les différentes conditions expérimentales.

Les analyses statistiques sont appliquées de manière indépendante à chaque voxel (analyse univariée). Le signal IRMf est décrit comme un vecteur temps comprenant q mesures ou échantillons temporels pour chacun des voxels. On suppose de plus que la réponse hémodynamique est linéaire (*General Linear Model*)²³⁵. Ainsi, le signal Y d'un voxel est modélisé par une somme de vecteurs représentant la valeur moyenne du signal, l'erreur résiduelle et la contribution de chacune des conditions au signal total mesuré (représentée par une forme théorique, elle-même modélisée par une fonction temporelle appelée régresseur, et un coefficient multiplicatif de régression associé). Spécifier un modèle correspond donc à définir les régresseurs pour toutes les conditions du paradigme expérimental de manière à minimiser la variance de l'erreur résiduelle.

Les paramètres de spécification du modèle directement liés au paradigme expérimental concernent le temps de répétition, le nombre de dynamiques (volumes fonctionnels) par série, le nombre de séries, le nombre de sujets, le nombre de conditions, l'ordonnement des conditions pour chaque série. Enfin, la fonction de régression utilisée pour toutes les conditions est de type "box-car" (fonction en créneau relatif au paradigme de type "bloc") convoluée avec une fonction de type "hrf" (pour *hemodynamic response function*) permettant de prendre en compte le délai de la réponse hémodynamique en début de condition. La définition de ces paramètres permet la création de la *design matrix*, représentant l'ensemble des régresseurs de toutes les séries.

- Estimation des paramètres du modèle

Cette étape consiste à ajuster les données, par des fonctions de normalisation et de lissage temporel, et à déterminer, pour chaque voxel, la valeur optimale des coefficients multiplicatifs associés à chaque régresseur de manière à minimiser la variance de l'erreur résiduelle par une méthode de régression linéaire dite des "moindres carrés ordinaires".

Dans un premier temps, la valeur moyenne du signal acquis dans chaque voxel (calculée sur l'ensemble des sujets et sessions) est normalisée (*Grand Mean Scaling*). On effectue ensuite un filtrage des basses fréquences *a priori* non-relées au paradigme expérimental (variations lentes d'origine physiologique qui s'étendent au-delà du temps maximum entre deux conditions identiques - ici 512 s.). Enfin, un lissage temporel des données est réalisé.

- Définition et estimation des contrastes

L'objectif de cette dernière étape est de comparer les variations du signal induites par les différentes conditions expérimentales. Suite à la définition/estimation du contraste global [VT – baseline], un test unilatéral de Student (contraste t) est appliqué à chaque voxel (à l'intérieur d'un

²³⁴ Dès la conception du protocole expérimental, il avait été ainsi prévu une période d'acquisition "à blanc" avant le début de la session proprement dite.

²³⁵ Friston, K.J., Holmes, A.P., Worsley, K.J., Poline J.-B., Frith, C.D., Frackowiak, R.S.J. (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2: 189-210.

masque d'analyse commun à l'ensemble des sujets) de manière à tester l'hypothèse nulle selon un seuil statistique défini à $p < .05$ corrigé pour les comparaisons multiples et une taille minimale des clusters activés de 15 voxels est choisie.

Les localisations anatomiques des clusters activés, caractérisés par leur pic d'activation maximum, ont été déterminées via l'atlas de Talairach & Tournoux, suite à la conversion des coordonnées fournies par SPM de l'espace MNI vers l'espace stéréotaxique²³⁶. Une confirmation des régions ainsi identifiées a de plus été effectuée via le logiciel de labellisation automatique Talairach Daemon²³⁷ (Research Imaging Center, University of Texas)

Modèle statistique et inférences : Analyse à effets aléatoires

Comme la première analyse "à effets fixes" ne permettait pas d'estimer la variance inter-sujets et donc de généraliser les résultats obtenus à une population autre que celle testée, nous avons procédé à une analyse de second niveau dite "à effets aléatoires" (*Random effects* ou *RFX*). Cette analyse permet d'évaluer aussi bien la variance intra-sujets que la variance inter-sujets et a pour objectif de déterminer les régions activées de la même manière chez tous les sujets²³⁸. Cette analyse s'est effectuée en deux étapes : la création d'une design matrix par sujet et la définition/estimation pour chacune des matrices du contraste global [VT – baseline], et l'utilisation d'un modèle statistique de type "one-sample t-test" avec 9 degrés de liberté permettant de tester l'hypothèse nulle sur ces contrastes selon une taille minimale des clusters activés de 15 voxels et un seuil statistique défini à $p < .005$ non-corrigé pour les comparaisons multiples pour les deux régions pour lesquelles nous avons des hypothèses *a priori* fortes (soit les gyri frontal inférieur et supramarginal de l'hémisphère gauche) et un seuil défini à $p < .05$ corrigé pour les comparaisons multiples au niveau du cluster pour toutes les autres activations rapportées.

Résultats

Analyse à effets fixes

Le contraste global [VT – baseline], entre la condition de transformation verbale et la condition de base, révèle un réseau neural d'aires distribuées (*large-scale neural network*), principalement latéralisé dans l'hémisphère gauche, et incluant des régions des cortex frontal, pariétal, temporal, des ganglions de la base et du cervelet (voir la Table 15 et les Figure 17 & 18 pour les pics d'activation maximum observés).

Le pic maximal d'activation est observé dans la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche (i.e. Broca - $x, y, z = -55 \ 9 \ 22$) et s'étend dans les régions supérieures vers le gyrus frontal moyen ($x, y, z = -28 \ -1 \ 55$) et la limite antérieure du gyrus pré-central ($x, y, z = -48 \ 2 \ 44$). A l'intérieur de ce cluster, des activations de la limite périsylvienne du gyrus temporal supérieur et de la partie antérieure de l'insula sont également observées. Des activations homologues du cortex pré-frontal droit, d'amplitudes moindres, sont localisées dans les gyri frontaux inférieur et moyen ($x, y, z = 59 \ 13 \ 21$; $x, y, z = 36 \ 24 \ 4$; $x, y, z = 24 \ 3 \ 61$). On constate une activation bilatérale de l'aire motrice supplémentaire ($x, y, z = -4 \ 14 \ 44$), s'étendant ventralement vers la partie antérieure du gyrus cingulaire. Les lobules pariétaux inférieurs gauche et droit, et plus précisément les gyrus

²³⁶ Brett, M., Johnsrude, I.S. & Owen, A.M. (2002). The problem of localization in the human brain. *Nature Neuroscience*, 3: 243-249.

²³⁷ Lancaster, J.L., Summerlin, J.L., Rainey, L., Freitas, C.S. & Fox, P.T. (1997). The talairach daemon, a database server for talairach atlas labels. *NeuroImage*, 5(4): S633.

²³⁸ Holmes, A.P., Friston, K.J. (1998). Generalisability, random effects and population inference. *NeuroImage*, 7: S754 ; Friston, K.J., Holmes, A.P. & Worsley, K.J. (1999). How many subjects constitute a study? *NeuroImage*, 10(1): 1-5. Voir également la page web de Terry Oakes (http://psypzh.psych.wisc.edu/~oakes/spm/spm_random_effects.html).

Table 15 : Localisation dans l'espace stéréotaxique et aires de Brodman (BA) associées des activations observées pour le contraste [VT – baseline]. Analyse à effets fixes (N=10, $p < .05$ corrigé, cluster ≥ 15 voxels).

Pics d'activation	Voxels	Hémisphère	Coordonnées			BA	Z	P
			x	y	z			
Gyrus Frontal Inférieur	264	G	-55	9	22	44	Inf	< .001
Gyrus Précentral		G	-48	2	44	4/6	Inf	< .001
Gyrus Frontal Moyen		G	-28	-1	55	6	Inf	< .001
Gyrus Supramarginal	192	G	-44	-33	46	40	Inf	< .001
Gyrus Supramarginal		G	-51	-36	52	40	Inf	< .001
Gyrus Postcentral		G	-59	-14	28	1,2,3	7.80	< .001
Gyrus Supramarginal	103	D	44	-32	51	40	Inf	< .001
Gyrus Supramarginal		D	63	-33	29	40	6.39	< .001
Cervelet	146	G	-32	-52	-23	-	Inf	< .001
Cervelet		G	-20	-63	-12	-	Inf	< .001
Cervelet		G	-20	-68	-32	-	5.30	< .001
Cervelet	171	D	20	-64	-37	-	Inf	< .001
Cervelet		D	32	-51	-18	-	Inf	< .001
Cervelet		D	20	-55	-12	-	7.10	< .001
Gyrus Frontal Mésial	77	G/D	-4	14	44	6	Inf	< .001
Gyrus Frontal Moyen	53	D	24	3	61	6	Inf	< .001
Gyrus Frontal Inférieur	46	D	59	13	21	44/45	Inf	< .001
Gyrus Frontal Moyen		D	51	6	44	6	6.75	< .001
Noyau Caudé	40	G	-20	-11	23	-	5.85	< .001
Gyrus Frontal Inférieur	19	D	36	24	4	45	6.28	< .001

Figure 17 : Analyse à effets fixes – Projections dans l'espace stéréotaxique des activations observées pour le contraste [VT –baseline] (N=10, $p < .05$ corrigé, cluster ≥ 15 voxels). (A) Projections sur un cerveau transparent (*Glass Brain view*). (B) Projections sur le template 'T1_152' centrées sur les pics d'activations correspondants (a) au gyrus frontal inférieur gauche ($x, y, z = -55 \ 9 \ 22$) et (b) au gyrus supramarginal gauche ($x, y, z = -44 \ -33 \ 46$). (C) Valeurs moyennes des coefficients associés aux régresseurs pour les deux pics d'activations. (1,2) Conditions de transformations verbales pour les logatomes monosyllabiques /psə/-/əps/ et /spə/-/pəs/, (3) pour les prénoms dissyllabiques /lwi.ʒã/-/ʒã.lwi/, (4,5,6) conditions de base pour les mêmes paires de séquences.

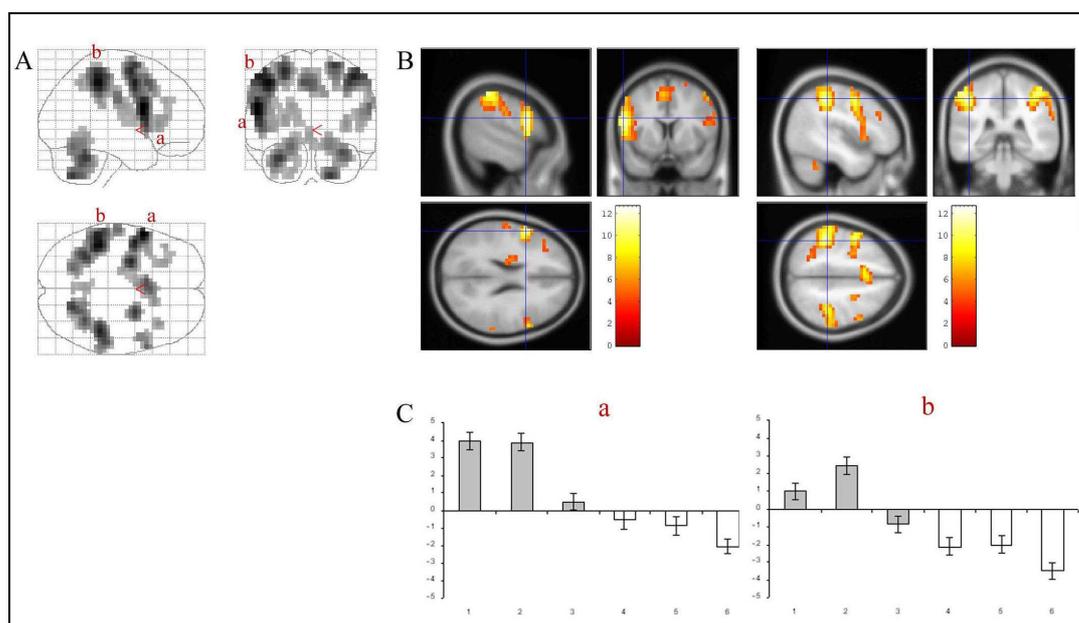
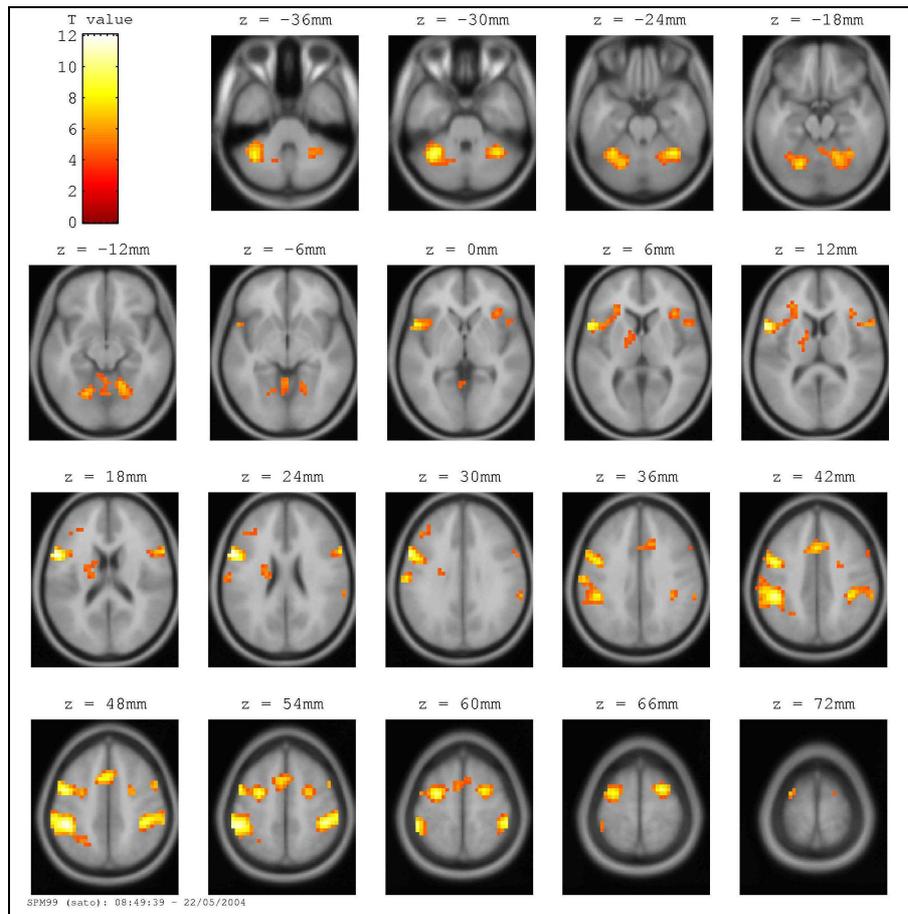


Figure 18 : Analyse à effets fixes – Projections sur le template ‘T1_152’ (coupes axiales) des activations observées pour le contraste [VT –baseline] (N=10, $p < .05$ corrigé, cluster ≥ 15 voxels).



supra-marginaux, sont tous deux activés ($x, y, z = -44 -33 46$; $x, y, z = 44 -32 51$), avec une extension de l'activation vers la partie antérieure du gyrus post-central pour l'hémisphère gauche ($x, y, z = -59 -14 28$). Enfin, des pics d'activation sont observés bilatéralement dans le cervelet ($x, y, z = -32 -52 -23$; $x, y, z = 20 -64 -37$) et dans la région du noyau caudé des noyaux gris centraux de l'hémisphère gauche ($x, y, z = -20 -11 23$).

- Recherche d'un fractionnement entre types de stimuli

Contraste [VT–Baseline] - Logatomes monosyllabiques. Pour les paires de logatomes monosyllabiques, l'activation est maximale dans la région du gyrus frontal inférieur et du gyrus supramarginal de l'hémisphère gauche. Pour la seule paire /spø/-/pøs/, on observe également une activation bilatérale de l'aire motrice supplémentaire et du cervelet, une activation dans l'hémisphère gauche du gyrus frontal moyen et de la partie antérieure de l'insula et enfin l'activation du gyrus supramarginal droit.

Contraste [VT–Baseline] – Prénoms dissyllabiques. Une activation bilatérale maximale est localisée dans une région dorsale des lobules pariétaux inférieurs et dans le cervelet. Pour l'hémisphère gauche, on observe des activations du gyrus frontal moyen, du cortex cingulaire antérieur, enfin, du gyrus précentral. Pour l'hémisphère droit, des activations sont constatées dans le gyrus frontal inférieur et le noyau caudé.

La comparaison de ces résultats suggère donc une activation plus importante (en terme d'étendue du cluster) du gyrus frontal inférieur et du gyrus supramarginal de l'hémisphère gauche ainsi que l'activation bilatérale de la partie antérieure du cortex insulaire pour les logatomes monosyllabiques. Inversement, les prénoms dissyllabiques présentent une activation bilatérale plus

importante du cervelet ainsi qu'une activation du noyau caudé de l'hémisphère gauche (voir la Table 16).

Estimation des valeurs de signal - De manière à tester de possibles différences d'activations liées à l'utilisation des deux types de paires de séquences (i.e., lexicales et non-lexicales) par rapport au couplage fronto-pariétal observé, nous avons procédé à une estimation de la valeur moyenne des coefficients des régresseurs (effet *beta*) associés à chacune des 6 conditions (i.e., conditions de transformation verbale et conditions de répétition pour les 3 paires de stimuli) pour les pics d'activations localisés dans la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche ($x, y, z = -55\ 9\ 22$) et dans le gyrus supramarginal gauche ($x, y, z = -44\ -33\ 46$). Du fait de l'utilisation de paramètres de spécification identique pour les différentes conditions (temps de répétition, nombre de dynamiques, nombre de séries, fonction de régression de type "box-car" convoluée avec une fonction de type "hrf"), cette analyse permet donc d'estimer la contribution relative de chacune des conditions par rapport à la valeur moyenne globale du signal obtenu. Pour les deux pics d'activations, on observe une valeur supérieure des coefficients associés aux conditions de transformations pour les deux paires de logatomes monosyllabiques par rapport à la paire de prénoms dissyllabiques (voir Figure 17-C).

Table 16 : Localisation dans l'espace stéréotaxique et aires de Brodmann associées des activations observées pour les contrastes [VT – baseline] selon les types de stimuli (N=10, $p < .05$ corrigé, cluster ≥ 15 voxels).

Pics d'activation	Voxels	Hémisphère	Coordonnées			BA	Z	P	
			x	y	z				
Logatomes Monosyllabiques									
Gyrus Frontal Inférieur	147	G	-55	9	22	44	Inf	< .001	
Gyrus Supramarginal	104	G	-44	-33	40	40	Inf	< .001	
Cervelet	23	D	20	-68	-37	-	Inf	< .001	
Cervelet	55	G	-40	-48	-28	-	Inf	< .001	
Gyrus Frontal Moyen	32	D	24	3	61	6	Inf	< .001	
Gyrus Frontal Mésial	47	G/D	0	14	44	6	7.56	< .001	
Cervelet	20	D	36	-48	-23	-	7.53	< .001	
Gyrus Supramarginal	50	D	55	-29	51	40	7.43	< .001	
Insula	20	D	28	19	-6	-	6.17	< .001	
Insula	17	G	-32	20	5	-	5.75	< .001	
Prénoms Dissyllabiques – 1: /spə/-/pəs/, 2: /psə/-/əps/									
Gyrus Supramarginal ¹	56	D	40	-33	46	40	Inf	< .001	
Gyrus Supramarginal ^{1,2}	74	G	-51	-36	52	40	Inf	< .001	
Gyrus Frontal Moyen ¹	21	G	-24	35	9	32	7.36	< .001	
Gyrus Frontal Mésial ¹	39	G	-24	-1	61	6	7.11	< .001	
Cervelet ¹	73	G	-16	-59	-17	-	7.10	< .001	
Cervelet ¹	98	D	32	-55	-17	-	7.02	< .001	
Gyrus Frontal Inférieur ^{1,2}	34	G	-51	12	5	44	6.79	< .001	
Gyrus Frontal Inférieur ¹	38	D	44	24	15	45	6.24	< .001	
Noyau caudé ¹	23	D	20	1	22	-	6.09	< .001	

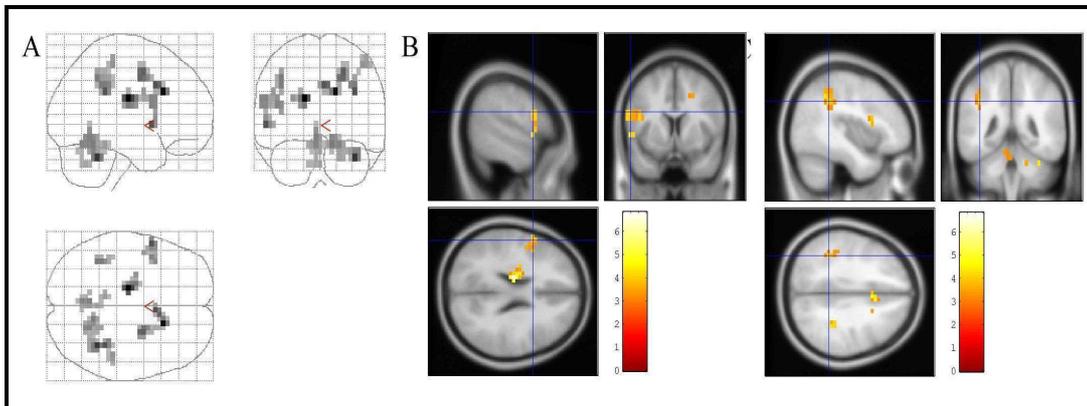
Analyse à effets aléatoires

Malgré un caractère statistique plus restrictif, un certain nombre de régions observées précédemment sont activées, bien que de manière plus réduite, dans l'analyse à effets aléatoires (voir la Table 17 et la Figure 19). On observe ainsi une activation du gyrus frontal inférieur gauche dans sa partie operculaire ($x, y, z = -55\ 9\ 22$; $x, y, z = -44\ 9\ 16$), de la limite périsylvienne du gyrus temporal supérieur gauche ($x, y, z = -55\ 8\ 0$), de la partie antérieure du gyrus cingulaire de l'hémisphère droit ($x, y, z = 16\ 21\ 27$), du gyrus supramarginal gauche ($x, y, z = -40\ -41\ 35$) et du cervelet ($x, y, z = -4\ -55\ -7$; $x, y, z = 36\ -48\ -23$).

Table 17 : Localisation dans l'espace stéréotaxique et aires de Brodmann (BA) associées des activations observées pour le contraste [VT – baseline]. Analyse à effets aléatoires (N=10, $p < .005$ non corrigé, cluster ≥ 15 voxels).

Pics d'activation	Voxels	Hémisphère	Coordonnées			BA	Z	P
			x	y	z			
Gyrus Cingulaire Antérieur	35	D	16	21	27	32	3.83	< .001
Gyrus Cingulaire Ant.		G	4	13	32	24	3.44	< .001
Gyrus Cingulaire Ant.		G	24	2	44	6/32	4.90	< .001
Cervelet	41	D	36	-48	-23	-	3.60	< .001
Cervelet		D	12	-51	-13	-	3.15	= .001
Cervelet		D	20	-55	-12	-	3.06	= .001
Gyrus Temporal Supérieur	29	G	-55	8	0	22	3.44	< .001
Gyrus Frontal Inférieur		G	-55	9	22	44	3.08	= .001
Gyrus Frontal Inférieur		G	-44	9	16	44	3.06	= .001
Gyrus Supramarginal	17	G	-40	-41	35	40	3.15	= .001
Cervelet	31	G	-4	-55	-7	-	3.09	= .001
Cervelet		G	-4	-63	-12	-	3.06	= .001
Cervelet		G	-8	-40	-13	-	2.87	= .002

Figure 19 : Analyse à effets aléatoires – Projections dans l'espace stéréotaxique des activations observées pour le contraste [VT –baseline] (N=10, $p < .005$ non corrigé, cluster ≥ 15 voxels). (A) Projections sur un cerveau transparent (*Glass Brain view*). (B) Projections sur le template 'T1_152' centrées sur les pics d'activations correspondants au gyrus frontal inférieur gauche ($x, y, z = -55\ 9\ 22$) et au gyrus supramarginal gauche ($x, y, z = -44\ -33\ 46$).



Discussion Générale

Cette étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle avait pour objectif la localisation anatomo-fonctionnelle des mécanismes cérébraux mis en jeu lors de la recherche active de transformation verbale : Soit les processus d'analyse syllabique en ligne (ou parsing syllabique), de stockage temporaire de l'information verbale (ou but de l'action phonologique) et de prise de décision/conscience de l'émergence d'une nouvelle représentation. De manière à évaluer les activations cérébrales spécifiquement associées aux transformations verbales, deux conditions furent contrastées : Une condition de base (*baseline*) impliquant la répétition mentale de chacune des séquences et une condition de transformation verbale (*VT*) impliquant la répétition mentale des mêmes séquences avec recherche active de transformations.

Engagement de la Boucle Phonologique

En accord avec les précédentes hypothèses comportementales de Reisberg et ses collègues, le contraste entre ces deux conditions révèle dans l'analyse à effets aléatoires, l'activation d'un réseau neural similaire à celui précédemment observé dans des tâches de mémoire de travail. Ce réseau d'aires distribuées, principalement latéralisé dans l'hémisphère gauche, inclut l'activation des régions du gyrus frontal inférieur, du gyrus supérieur temporal et du gyrus supramarginal de l'hémisphère gauche, du cortex cingulaire antérieur droit, enfin, du cervelet bilatéralement. Dans l'analyse à effets fixes, un certain nombre de régions sensorimotrices sont également activées : La partie antérieure du cortex insulaire de l'hémisphère gauche, le noyau caudé, l'aire motrice supplémentaire, le cortex prémoteur et le gyrus postcentral gauche²³⁹ (voir la Figure 20).

Face à cet engagement de la Boucle Phonologique dans les processus d'analyse et d'émergence des transformations, il est intéressant de noter l'absence d'activation significative du cortex préfrontal dorsolatéral, relié à l'administrateur central du modèle de Baddeley & Hitch et impliqué dans les processus exécutifs de contrôle attentionnel de l'information, en particulier dans l'allocation des ressources attentionnelles et l'ordonnancement/regroupement séquentiel des informations verbales²⁴⁰. Ce résultat est en accord avec les études montrant une activation nulle ou très faible de cette région lorsque la charge mnésique est peu importante²⁴¹, ce qui est le cas dans la procédure de transformation verbale. Le réseau associé aux transformations verbales montre cependant l'activation du cortex cingulaire antérieur, une région également reliée aux processus

²³⁹ Cette discussion sera principalement basée sur le couplage frontal-pariétal entre le gyrus frontal inférieur et le gyrus supramarginal de l'hémisphère gauche, apparaissant tous deux dans les analyses statistiques menées. Du fait de l'adéquation entre nos résultats et ceux de précédentes études d'imagerie portant sur la mémoire de travail, nous tiendrons également compte dans cette discussion des activations observées lors de l'analyse à effets fixes, moins restrictive que celle à effets aléatoires.

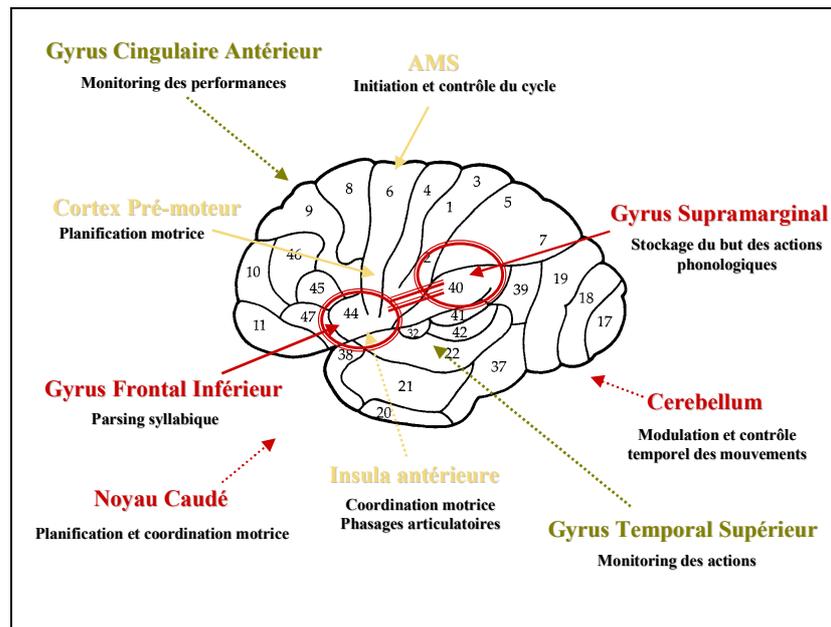
²⁴⁰ Henson, R.N.A, Burgess, N. & Frith, C.D. (2000). *op. cit.* ; Smith, E.E., Jonides, J., Marshuetz, C. & Koeppel, R.A. (1998). *op. cit.*

²⁴¹ Certaines études ont ainsi montré un saut brusque quantitatif en terme d'activation de cette région lors de tâche de n-back en faisant varier n de 0 ou 1 (pas ou peu d'activation) à 2 et plus (forte activation). Ce changement brutal correspondrait à la possibilité pour le sujet d'effectuer la tâche sans recourir à des processus d'inhibition et de codage séquentiel des informations lorsque n est inférieure à 2. Cohen, J.D., Perlstein, W.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Noll, D.C., Jonides, J. & Smith, E.E. (1997). *op. cit.*

exécutifs de l'administrateur central et impliquée dans les processus de décision et de monitoring des performances du sujet²⁴².

Enfin, ce résultat apparaît conforme à ceux de précédentes études ayant également montré l'engagement de ce système de mémoire lors de tâches d'imagerie auditive²⁴³. Des auteurs ont ainsi comparé la génération de phrases imaginées à la première, seconde et troisième personne, à une répétition mentale simple des mêmes stimuli. Le contraste entre ces tâches montre l'activation du réseau de la Boucle Phonologique ainsi que celui des aires motrices et sensorimotrices. Les auteurs attribuent ce résultat à une demande attentionnelle plus importante lors des tâches d'imagerie, nécessitant la récupération en mémoire des caractéristiques propres de la voix imaginée, sa reproduction interne et le monitoring de l'image ainsi constituée (*verbal self-monitoring*).

Figure 20 : Le réseau neural des transformations verbales.



Existence d'un couplage frontal-pariétal

Face aux résultats observés dans la tâche de transformation verbale, une première hypothèse serait celle de l'implication respective des aires perceptivo-productives dédiées au langage dans les processus de répétition subvocale (SMA, aires sensorimotrices, cervelet, insula, noyau caudé), de l'aire de Broca dans l'analyse syllabique en ligne de la forme répétée, et, enfin, du gyrus supramarginal dans la rétention temporaire de celle-ci. Cependant, en regard des mécanismes liés aux transformations verbales et face à cette implication de la mémoire de travail, l'hypothèse classiquement admise d'une dissociation des régions frontales et pariétales, à l'intérieur de ce système, entre les processus de répétition subvocale et de stockage phonologique - associés respectivement au gyrus frontal inférieur et au gyrus supramarginal – mérite d'être éclaircie.

²⁴² Smith, E.E. & Jonides, J. (1999). *op. cit.* ; Barch, D.M., Braver, T.S., Sabb, F.W. & Noll, D.C. (2000). *op. cit.* ; Liddle, P.F., Kiehl K.A. & Smith, A.M. (2001). Event-related fMRI study of response inhibition. *Human Brain Mapping*, 12: 100-109 ; Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T. & Shibasaki, H. (2003). *op. cit.*

²⁴³ McGuire, P.K., Silbersweig, D.A., Murray, R.M., David, A.S., Frackowiak, R.S. & Frith C.D. (1996). Functional anatomy of inner speech and auditory verbal imagery. *Psychological Medicine*, 26(1): 29-38 ; Shergill, S.S., Bullmore, E.T., Brammer, M.J., Williams, S.C., Murray, R.M. & McGuire, P.K. (2001). A functional study of auditory verbal imagery. *Psychological Medicine*, 31(2): 241-253 ; Aleman, A., Formisano, E., Koppenhagen, H., Hagoort, P., de Haan, E.H.F. & Kahn R.S. (2004). The functional neuroanatomy of metrical stress evaluation of perceived and imagined spoken words. *Cerebral Cortex*, to appear.

L'analyse de l'action dans l'aire de Broca

En premier lieu, la vue encore trop largement partagée dans la littérature sur la mémoire de travail et le langage concernant l'implication du gyrus frontal inférieur (et plus spécifiquement de l'aire de Broca) dans les mécanismes de répétition subvocale et de production de la parole ne s'accorde pas avec nos résultats. En effet, étant donné, d'une part, l'existence d'une procédure de répétition mentale dans les deux conditions utilisées, et d'autre part, l'activation du gyrus frontal inférieur lors de la soustraction des données métaboliques entre la condition de transformation verbale et la condition de répétition simple, il semble dès lors difficile d'assigner à cette région ce rôle exclusif de simple répétition subvocale. Ce résultat va d'ailleurs dans le sens d'études récentes ayant démontré la non-activation du gyrus frontal inférieur lors de tâches de répétition automatique de parole, aussi bien lors d'une répétition à voix haute que lors d'une répétition mentale²⁴⁴. Des études neurologiques ont de plus montré que des lésions du gyrus frontal inférieur gauche n'entraînaient pas nécessairement une aphasie de type Broca persistante et que des déficits de planification articulatoire, généralement associés à ce syndrome, pouvaient résulter de lésions situées en dehors de cette région dans l'extrémité antérieure du cortex insulaire de l'hémisphère dominant²⁴⁵.

En accord avec les études montrant la spécialisation de cette région dans les processus d'écoute attentive de liste de mots différents²⁴⁶, de conversion grapho-phonémique en lecture silencieuse de mots ou de non-mots²⁴⁷, de lecture labiale, d'observation et d'imitation d'actions orofaciales²⁴⁸ et, enfin, dans des tâches nécessitant "la scission de l'atome" qu'est la syllabe, notamment dans des tâches de rimes, de comptage, de détection de phonèmes²⁴⁹, nous considérons cette région comme un possible système attentionnel impliqué dans la reconnaissance, la compréhension et l'analyse des actions, aussi bien propres qu'externes, et ne participant donc pas *stricto-sensu* aux processus moteurs de production de parole interne ou externe²⁵⁰. Ce système serait dès lors parfaitement

²⁴⁴ Murphy, K., Corfield, D.R., Guz, A., Fink, G.R., Harrison, J., Wise, R.J.S. & Adams, L. (1997). *op. cit.* ; Wise, R.J., Greene, J., Buchel, C. & Scott, S.K. (1999). *op. cit.* ; Bookheimer, S.Y., Zeffiro, T.A., Blaxton, T., Gaillard, W.D. & Theodore, W.H. (2000). *op. cit.* ; Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Meyer, J., Dogil, G., Haider, H. & Grodd, W. (2000). *op. cit.* ; Wildgruber, D., Ackermann, H. & Grodd, W. (2001). *op. cit.* Pour un résultat opposé, soit l'activation de la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche lors d'une tâche de comptage ou lors de la récitation de poèmes enfants surpris, voir Blank, S.C., Scott, S.K., Murphy, K., Warburton, E. & Wise, R.J.S. (2002). Speech production: Wernicke, broca and beyond. *Brain*, 125: 1829-1838.

²⁴⁵ Dronkers, N.F. (1996). *op. cit.* ; Dronkers, N.F., Redfern, B.B. & Knight, R.T. (2000). The neural architecture of language disorders. In: Gazzaniga, M.S. (Editor), *The New Cognitive Neurosciences*. MIT Press, Cambridge, pp. 949-958.

²⁴⁶ Papathanassiou, D., Etard, O., Mellet, E., Zago, L., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). A common language network for comprehension and production: A contribution to the definition of language epicenters with PET. *NeuroImage*, 11(4): 347-357.

²⁴⁷ Price, C., Moore, C.J., Humphreys, G.W. & Wise, R.J.S. (1997). *op. cit.* ; Fiez, J., Balota, D.A., Raichle, M.E. & Petersen, S.E. (1999). *op. cit.*

²⁴⁸ Calvert, G.A. & Campbell, R. (2003). Reading speech from still and moving faces: The neural substrates of visible speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(1): 57-70 ; Callan, D.E., Jones, J.A., Munhall, K., Callan, A.M., Kroos, C. & Vatiokis-Bateson, E. (2003). Neural processes underlying perceptual enhancement by visual speech gestures. *Neuroreport*, 14(17): 2213-2218 ; Jones, J.A. & Callan D.E. (2003). Brain activity during audiovisual speech perception: An fMRI study of the McGurk effect. *Neuroreport*, 14(8): 1129-1133 ; Santi, A., Servos, P., Vatiokis-Bateson, E., Kuratate, T. & Munhall, K. (2003). Perceiving biological motion: Dissociating visible speech from walking. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(6): 800-809 ; Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G., Freund H.-J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, 13: 400-404 ; Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J.C. & Lenzi, G.L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: A relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 100(9): 5497-5502 ; Leslie, K.R., Johnson-Frey, S.H. & Grafton, S.T. (2004). Functional imaging of face and hand imitation: Towards a motor theory of empathy. *NeuroImage*, 601-607.

²⁴⁹ Démonet, J.-F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J.L., Wise, R., Rascol, A. & Frackowiak, R.S.J. (1992). *op. cit.* ; Paulesu, E., Frith, C.D. & Frackowiak, R.S.J. (1993). *op. cit.* ; Démonet, J.-F., Price, C., Wise, R. & Frackowiak, R.S.J. (1994). *op. cit.* ; Thierry, G., Boulouvar, K., Kherif, F., Ranjeva, J.-P. & Démonet, J.-F. (1999). *op. cit.* Pour une revue, Poldrack, R.A., Wagner, A.D., Prull, M.W., Desmond, J.E., Glover, G.H. & Gabrieli, J.D.E. (1999). *op. cit.*

²⁵⁰ Dans cette hypothèse, l'engagement du gyrus frontal inférieur lors de tâches de production de la parole serait donc étroitement lié aux mécanismes attentionnels nécessaires à la réalisation de ces tâches, à la nature/complexité des stimuli verbaux utilisés, enfin, au degré d'expertise qu'ont les sujets par rapport à celle-ci. Voir à ce sujet, Petersen, S.E., Van

adapté aux mécanismes linguistiques de parsing syllabique nécessaires à la procédure de transformation verbale.

Activations des aires sensorimotrices

Un certain nombre d'activations de régions sensorimotrices impliquées dans les processus de production et de perception de la parole ont également été observées : L'aire motrice supplémentaire, le cortex prémoteur, l'extrémité antérieure de l'insula et le noyau caudé de l'hémisphère gauche, enfin, le cervelet. Ces régions sont respectivement considérées comme impliquées dans l'initiation²⁵¹, la planification/coordination des gestes articulatoires²⁵², et dans la modulation et le contrôle temporel de ces mouvements²⁵³. Nous considérons le processus d'alternance entre paire de stimuli répétés comme le facteur majeur à l'activation observée de ces aires par contraste entre la condition de transformation verbale et la condition de répétition. En effet, cette alternance entre représentations verbales implique, tout au long de la procédure, la prise en compte d'une nouvelle représentation articulo-motrice/phonologique dans le processus de répétition, d'où un engagement plus important de ces aires par rapport à la condition de base.

A l'intérieur même du processus de transformation, il est enfin intéressant de constater l'activation bilatérale de la partie antérieure de l'insula gauche pour la seule paire /pəs-/spə/, présentant un degré d'attractivité et de cohérence articulatoire égal pour les deux séquences, et de là, une alternance perceptive supposée facilitée entre les deux formes possibles. Cette activation semble ainsi confirmer l'hypothèse du rôle possible de ce système dans la coordination motrice des séquences articulatoires et plus particulièrement des phasages dynamiques en parole. L'absence d'activation de cette région pour les paires /psə-/əps/ et /lwi.ʒã-/ʒã.lwi/ pourrait dans ce cadre s'expliquer respectivement par un mécanisme d'alternance plus difficile du fait de la forte stabilité/attractivité de la séquence /psə/ par rapport à la séquence /əps/, limitant l'importance des mécanismes de rephasages articulatoires de /əps/ vers /psə/ et par un mécanisme de parsing intersyllabique relativement automatisé et n'incluant pas de processus de rephasages articulatoires lors des transformations alternées entre /lwi.ʒã/ et /ʒã.lwi/.

Outre l'activation de ces aires motrices de la parole, le réseau neural associé aux transformations verbales montre également l'activation du gyrus temporal supérieur, dans la partie périsylvienne adjacente au gyrus frontal inférieur. Cette région, précédemment observée durant des tâches de répétition interne et d'imagerie auditive consistant en la génération mentale de phrases à la première, seconde et troisième personne, a été suggérée comme responsable du suivi en ligne de sa propre voix (*verbal self monitoring*)²⁵⁴. Les connexions entre les régions frontale et temporale durant la production interne de parole permettraient ainsi d'informer les aires liées à la perception du langage d'une production auto-générée. Cette hypothèse est d'ailleurs en accord avec les données montrant une activation accrue de cette région chez des patients schizophrènes souffrant

Mier, H., Fiez, J.A. & Raichle M.E. (1998). The effects of practice on the functional anatomy of task performance. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 95: 853-860.

²⁵¹ Ziegler, W., Kilian, B. & Deger, K. (1997). The role of left mesial frontal cortex in fluent speech: Evidence from a case of left supplementary motor area hemorrhage. *Neuropsychology*, 35: 1197-1208. Voir aussi : MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2001). Motor mechanisms in speech ontogeny: Phylogenetic, neurobiological and linguistic implications. *Current Opinion in Neurobiology*, 11: 696-700.

²⁵² Dronkers, N.F. (1996). *op.cit.* ; Wise, R.J., Greene, J., Buchel, C. & Scott, S.K. (1999) *op.cit.* A noter les cas de troubles articulatoires (dysarthrie) et de volume de la voix (dysphonie) observés chez des patients après lésion focale des noyaux gris centraux : Dubois, B., Pillon, B. & Deweer, B. (2000). Troubles cognitifs et comportementaux après lésion des noyaux gris centraux. In: Lechevallier *et al.* (Editors), *Traité de Neuropsychologie Clinique*. De Boeck, pp. 1-21.

²⁵³ Wildgruber, D., Ackermann, H. & Grodd, W. (2001). *op.cit.* ; Mathiak, K., Hertrich, I., Grodd, W. & Ackermann H. (2003). Cerebellum and speech perception: A functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(6): 902-912.

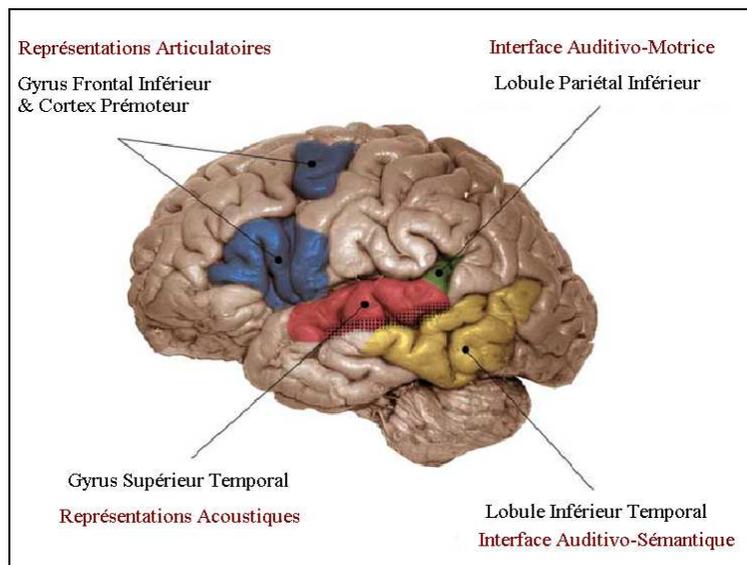
²⁵⁴ McGuire, P.K., Silbersweig, D.A., Murray, R.M., David, A.S., Frackowiak, R.S. & Frith C.D. (1996). *op. cit.* ; Shergill, S.S., Bullmore, E.T., Brammer, M.J., Williams, S.C., Murray, R.M. & McGuire, P.K. (2001). *op. cit.* ; Shergill, S.S., Brammer, M.J., Fukuda, R., Bullmore, E., Amaro Jr, E., Murray, R.M. & McGuire, P.K. (2002). *op. cit.*

d'hallucinations auditivo-verbales et avec l'idée que ce symptôme positif chez ce type de patients est dû à un dérèglement des systèmes de régulation de l'action²⁵⁵.

Mapping des représentations acoustiques et articulatoires

Nous considérons la charge mnésique associée à la tâche de transformation verbale comme relativement faible (maintenance temporaire de l'une des deux représentations verbales jusqu'à l'émergence perceptive de sa forme associée). Dès lors, l'implication supposée du lobule pariétal inférieur, et plus particulièrement du gyrus supramarginal, dans la rétention passive du matériel verbal en un code phonologique doit être examinée.

Figure 21 : Modèle neural de perception et de production du langage. Repris de Hickok & Poeppel (2004).



Hickok & Poeppel²⁵⁶ ont suggéré une hypothèse qui semble mieux correspondre à nos résultats. Les auteurs se sont en effet posé la question de la nécessité d'une dissociation entre les processus d'encodage phonologique en production et perception du langage. Ils ont alors suggéré un modèle de perception et de production de la parole composé à la fois d'aires langagières communes (*overlapping networks*) et d'aires spécifiquement dédiées (voir la Figure 21). Cette hypothèse de deux réseaux à la fois distincts et partiellement commun est ainsi consistante avec une vue dissociée des mécanismes de production et de perception ainsi que l'existence identique de certains mécanismes d'encodage des informations verbales²⁵⁷. Dans ce modèle, il est proposé en premier lieu l'existence de systèmes supportant les représentations acoustiques de la parole (*sound-based*

²⁵⁵ Frith, C.D. (1992). *The Cognitive Neuropsychology of Schizophrenia*. Hillsdale NJ: Erlbaum ; Shergill, S.S., Bullmore, E.T., Simmons, A., Murray, R.M. & McGuire, P.K. (2000). Functional anatomy of auditory imagery in schizophrenic patients with auditory hallucinations. *American Journal of Psychiatry*, 157(10): 1691-1693. Pour une revue, Georgieff, N. (2000). *op. cit.* ; Jeannrod, M. (2002). *op. cit.*

²⁵⁶ Hickok, G. & Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in Cognitive Science*, 4(4): 131-138 ; Hickok, G. (2001). Functional anatomy of speech perception and speech production: Psycholinguistic implications. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(3): 225-235 ; Hickok, G. & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92: 67-99.

²⁵⁷ Pour une revue des corrélats neuroanatomiques des systèmes de production et de perception de la parole, voir respectivement : Indefrey, P. & Levelt, W.J.M (2004). The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition*, 92: 101-144 ; Price, C.J. (2000). The anatomy of language: Contributions from functional neuroimaging. *Journal of Anatomy*, 197: 335-359 ; Scott, S.K. & Johnsrude, I.S. (2003). The neuroanatomical and functional organization of speech perception. *Trends in Neurosciences*, 26(2): 100-107 ; Scott, S.K. & Wise, R.J.S (2004). The functional neuroanatomy of prelexical processing in speech perception. *Cognition*, 92: 13-45.

representations of speech) et localisés bilatéralement dans les gyri supérieurs temporaux postérieurs²⁵⁸. De là, deux circuits neuronaux latéralisés dans l'hémisphère gauche sont disponibles : un circuit dorsal pariétal-frontal (du lobule pariétal inférieur au gyrus frontal inférieur) impliqué dans les processus de langage nécessitant un *mapping* (transcodage) direct entre formes acoustiques et formes articulatoires des représentations verbales²⁵⁹, et, un circuit temporal-pariétal-occipital, impliqué dans les processus de mapping entre les formes acoustiques et les représentations lexico-sémantiques. Pour les auteurs, le gyrus supramarginal ne serait pas lié au stockage des représentations phonologiques *per se* mais constituerait plutôt une interface auditivo-motrice (par des mécanismes de recodage sensori-moteur) entre représentations acoustiques de la parole des cortex auditifs et représentations articulo-motrices exploitées dans le cortex prémoteur et le gyrus frontal inférieur gauche. De là, nous suggérons l'existence dans les processus de transformation verbale d'un circuit pariétal-frontal/frontal-pariétal lié à la transmission et au recodage des informations langagières. Le gyrus supramarginal serait impliqué dans la construction des représentations phonologiques, ou plus spécifiquement l'encodage/stockage du but articulatoire/phonologique global²⁶⁰, par activation des représentations corporelles du tract vocal en mémoire à long-terme²⁶¹ (lobule pariétal supérieur, précunéus). Ces représentations seraient alors recodées et transmises au cortex prémoteur et au gyrus frontal inférieur puis renvoyées en retour, lors de l'émergence d'une nouvelle représentation (dépendante du processus de parsing syllabique et des mécanismes possibles de compétition entre deux représentations et de prise de décision²⁶²).

²⁵⁸ On peut noter que seul le gyrus temporal supérieur gauche est activé lors de tâches de production externe ou mentale de la parole. Hickok et Poeppel soulignent l'existence possible d'un circuit additionnel frontal-temporal dont la fonction serait celle d'une interface directe entre représentations auditives et représentations motrices. L'engagement de cette région pourrait également correspondre à un système de monitoring des actions, sous-tendant les mécanismes d'attribution de celles-ci à soi ou à autrui. Ainsi, les aires frontales codant l'action engagée, moduleraient spécifiquement l'activité des aires temporales de réception, ceci permettant une anticipation sensorielle du discours produit.

²⁵⁹ Ce rôle du gyrus supramarginal dans le mapping entre formes acoustiques et formes articulatoires est bien entendu décrit ici en rapport avec des entrées issues du cortex auditif. Cette région est également impliquée lors de tâches de mémoire de travail en modalité visuelle, ce système étant sensible uniquement à une similarité phonologique et non orthographique des items présentés. Il est enfin intéressant de constater l'existence de cet effet de similarité phonologique lors de tâches d'empan chez des sujets sourds ou malentendants utilisant la langue des signes ou le langage parlé complété ainsi que chez des sujets aveugles en lecture braille. Ces résultats suggèrent ainsi une nature phonologique des représentations contenues dans le gyrus supramarginal, ce, une fois les entrées sensorielles, auditives, visuelles ou tactiles, recodées sous ce format. Wilson, M. (2001). The case for sensorimotor coding in verbal working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(1): 44-57 ; Leybaert, J. & Lechat, J. (2001). Phonological similarity effects in memory for serial order of cued speech. *Journal of Speech, Language & Hearing Research*, 44(5): 949-63 ; Millar, S. (1975). Effects of tactual and phonological similarity on the recall of Braille letters by blind children. *British Journal of Psychology*, 66(2):193-201. Pour une étude d'imagerie concernant l'aspect "amodal" des représentations phonologiques en mémoire de travail verbale, Schumacher, E.H., Lauber, E., Awh, E., Jonides, J., Smith, E. & Koeppel, R.A. (1996). Pet evidence for an amodal verbal working memory system. *NeuroImage*, 3: 79-88.

²⁶⁰ Baciú, M., Abry, C. & Segebarth, C. (2000). Equivalence motrice et dominance hémisphérique : Le cas de la voyelle [u]. In *Actes des XVIIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, Aussois, pp. 213-216 ; Abry, C. (2002). La théorie motrice de la perception de la parole: Avancées récentes vers une somatotopisation de la perception active des unités de la parole. *Actes du colloque international ACFOS IV*, Paris, pp. 94-97.

²⁶¹ Cette hypothèse est relative à une étude IRMf ayant montré une activation bilatérale du gyrus pariétal supérieur, et plus spécifiquement du précunéus, lors de la production de la voyelle neutre [u] et non lors de la production compensée de cette même voyelle. Ce résultat impliquerait donc la récupération de la posture habituelle du tract vocal en mémoire à long-terme. Baciú, M., Abry, C. & Segebarth, C. (2000). *op. cit.* Voir également une étude récente ayant montré une activation bilatérale du lobule pariétal supérieur lors de mouvements de la langue. Watanabe, J., Sugiura, M., Miura, N., Watanabe, Y., Maeda, Y., Matsue, Y. & Kawashima, R. (2004). The human parietal cortex is involved in spatial processing of tongue movement – An fMRI study. *NeuroImage, to appear*. A noter enfin les cas de lésions du gyrus pariétal supérieur postérieur, entraînant chez les sujets des déficits de reconnaissance des actions externes ou propres, des difficultés à imaginer les actions, voire à les inhiber : Jeannerod, M. (2001). *op. cit.* ; Schwoebel, J., Boronat, C.B. & Coslett, H.B. (2002). *op. cit.* ; Wilson, M. (2003). *op. cit.*

²⁶² Ces mécanismes de compétition/décision pouvant être notamment reliés à l'engagement du cortex cingulaire antérieur : Carter, C.S., Braver, T.S., Bach, D.M., Botvinick, M.M., Noll, D. & Cohen J.D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280: 747-749 ; Barch, D.M., Braver, T.S., Sabb, F.W. & Noll, D.C. (2000). *op. cit.* ; Liddle, P.F., Kiehl K.A. & Smith, A.M. (2001). *op. cit.* ; Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T. & Shibasaki, H. (2003). *op. cit.* Voir également l'activation possible de la région frontale operculaire et du cortex insulaire antérieure lors d'une tâche perceptive d'identification/discrimination syllabique : Binder, J.R., Liebenthal, E., Possing, E.T., Medler, D.A. & Douglas Ward, B. (2004). Neural correlates of sensory and decision processes in auditory object identification. *Nature Neuroscience*, 7(3): 295-30.

Dans le cadre de cette hypothèse, les analyses des contrastes individuels [VT – baseline] pour les trois paires de stimuli ainsi que l'estimation de la valeur moyenne des coefficients des régresseurs de chacune des conditions démontrent l'influence majeure des deux conditions de transformation verbale liées aux paires de stimuli de type logatomes monosyllabiques par rapport aux autres conditions (et notamment par rapport à la condition de recherche de transformation pour la paire de prénoms dissyllabiques) dans les activations localisées dans la partie operculaire du gyrus frontal inférieur et dans le gyrus supramarginal de l'hémisphère gauche. L'activation du gyrus frontal inférieur gauche lors des conditions de recherche de transformation s'explique selon nous par l'existence et mise en œuvre d'une procédure d'analyse et de parsing syllabique pour ces conditions par rapport aux conditions de répétition simple. La différence observée pour les conditions de transformation verbale entre les deux types de stimuli pourrait être liée à une différence de profondeur de traitement dans l'analyse de ces stimuli. En effet, pour les logatomes monosyllabiques, la procédure de parsing syllabique n'implique pas une "simple" détection de traces de jointure entre syllabes mais bien un véritable changement de la représentation verbale itérée par le suivi attentionnel de mécanismes articulo-moteurs.

La différence d'influence entre conditions de transformation verbale et conditions de répétition dans l'activation du gyrus supramarginal tient selon nous au fait qu'il n'y a pas nécessité de procéder à de multiples recodage/stockage sensorimoteur lors de la répétition du même stimulus. La différence entre logatomes monosyllabiques et prénoms dissyllabiques pour les conditions de transformation verbale pourrait être liée, d'une part, à une intervention plus importante des mécanismes de recodage sensorimoteur entre représentations phonologiques et représentations articulo-motrices exploitées dans le gyrus frontal inférieur et, d'autre part, à une possible influence/suppléance des représentations lexicales et sémantiques liées à ces stimuli²⁶³. Enfin, la différence d'activation observée entre les paires /pəs/-/spə/ et /psə/-/əps/ (cf. Figure 17) semble démontrer l'hypothèse d'une plus grande stabilité, et donc d'un nombre d'alternance perceptive moindre, pour la paire /psə/-/əps/ (due à un degré de stabilité/attractivité important de la séquence /psə/) expliquant ainsi l'engagement moindre de cette région dans les processus d'encodage et de stockage du but articulo-phonologique.

Emergence Consciente des Représentations Verbales et Mécanismes de Prise de Décision

Les processus de prise de décision, entraînant la modification de l'état perceptif du sujet par le contrôle actif attentionnel de mécanismes articulo-moteurs, pourraient être reliés aux activations observées dans le cervelet et dans le gyrus cingulaire antérieur²⁶⁴. L'un des rôles suggérés du cervelet dans les tâches de mémoire de travail verbale est en effet celle d'un système de contrôle moteur prédictif ayant pour fonction d'estimer la concordance des signaux afférents issus du cortex frontal, liés aux sorties du processus de contrôle articulo-phonologique, et ceux issus du cortex pariétal, liés au contenu de l'unité de stockage phonologique²⁶⁵. Dans le cas de signaux divergents, le cervelet enverrait alors une commande correctrice (*feedforward command*) au cortex frontal permettant une réactualisation des représentations motrices traitées par le processus de contrôle articulo-phonologique. Une autre région pouvant être reliée aux mécanismes de prise de décision est le cortex cingulaire

²⁶³ Jonides, J., Schumacher, E.H., Smith, E.E., Koeppel, R.A., Awh, E., Reuter-Lorentz, P.A., Marshuetz, C. & Willis, C.R. (1998). *op. cit.* ; Hickok, G. & Poeppel, D. (2000). *op. cit.* ; Hickok, G. (2001). *op. cit.* ; Hickok, G. & Poeppel, D. (2004). *op. cit.*

²⁶⁴ Pour une revue sur les bases neurales du raisonnement décisionnel, Berthoz, A. (2003). *op. cit.*

²⁶⁵ Desmond J.E., Gabrieli, J.D.E., Wagner, A., Ginier, B.L. & Glover, G.H. (1997). Lobular patterns of cerebellar activation in verbal working memory and finger-tapping tasks as revealed by functional MRI. *Journal of Neuroscience*, 17: 9675-9685. De manière plus spécifique, les auteurs suggèrent une dissociation entre les régions bilatérales supérieures du cervelet, liées au traitement des sorties du processus de répétition, et la région droite inférieure liée au traitement du contenu actuel de l'unité de stockage phonologique. Voir également l'implication suggérée du cervelet dans les processus de couplage sensorimoteur entre stimuli présentés et réponses attendues: Bischoff-Grethe, A., Ivry, R.B. & Grafton, S. (2002). Cerebellar involvement in response reassignment rather than attention. *Journal of Neuroscience*, 22(2): 546-553.

antérieur. Cette région, considérée comme l'un des corrélats neuroanatomiques de l'administrateur central, serait en effet impliquée dans les processus exécutifs de contrôle attentionnel de l'information, et de manière plus spécifique, dans les processus d'inhibition, de décision et de monitoring des performances du sujet²⁶⁶.

Ainsi, le couplage fonctionnel lors de la recherche active de transformation entre, d'une part, les régions frontales, temporales et pariétales, respectivement impliquées dans les processus en ligne d'analyse et de parsing syllabique, de suivi du soi vocal et des mécanismes d'encodage et de stockage du but articulatoire/phonologique, et, d'autre part, les régions du cortex cingulaire antérieur et du cervelet, impliquées dans les processus de contrôle attentionnel et moteur, constituent une plateforme adaptée à l'émergence des transformations verbales²⁶⁷.

²⁶⁶ Smith, E.E. & Jonides, J. (1999). *op. cit.* ; Barch, D.M., Braver, T.S., Sabb, F.W. & Noll, D.C. (2000). *op. cit.* ; Liddle, P.F., Kiehl K.A. & Smith, A.M. (2001). Event-related fMRI study of response inhibition. *Human Brain Mapping*, 12: 100-109 ; Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T. & Shibasaki, H. (2003). *op. cit.*

²⁶⁷ Ce couplage fonctionnel peut être rapproché de celui observé entre des populations de neurones interconnectés de régions préfrontales (*frontal eye field*), pariétales (*LIP*) et temporales (*MT/V5*) impliqués dans les processus d'intégration des signaux sensorimoteurs nécessaires au contrôle visuel lors de tâches de vision active chez des singes et nécessitant des décisions perceptives simples sur des stimuli visuels ambiguës, par exemple lors d'expériences de rivalité binoculaire. Pour une revue, Kast, B. (2001). Decisions, decisions... *Nature*, 411: 471-488. Etroitement reliée à la question des mécanismes neuronaux de prise de décision est l'hypothèse de l'existence de mécanismes d'intégration et de liage, liés à la synchronisation temporelle des décharges d'assemblées de neurones interconnectés, issus de régions corticales distinctes et fonctionnellement spécifiques (régions sensorielles, motrices, associatives...), comme schéma plausible des bases neurales de la "signification". Une corrélation entre les changements dynamiques observés dans la synchronisation/désynchronisation des décharges neuronales et dans l'alternance perceptive de stimuli visuels a ainsi été observée tant chez l'homme que chez l'animal. Varela, F., Lachaux, J.-P., Rodriguez, E. & Martinerie, J. (2001). The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, 2: 229-238 ; Rodriguez, E., George, N., Lachaux, J.-P., Martinerie, B. & Varela, F.J. (1999). Perception's shadow: Long distance synchronization of human brain activity. *Nature*, 397: 430-433. Pour une revue, Changeux, J.P. (2002). *L'Homme de Vérité*. Paris, Odile Jacob ; Singer, W. (2002). Synchronisation neuronale et représentations mentales. *Pour la Science*, 302, 74-79. A notre connaissance, ces expériences ont toujours concerné des stimuli de type visuels, l'existence de tels mécanismes de synchronisation neuronale lors de l'émergence des transformations verbales, par l'écoute attentive de stimuli langagiers, pourrait dès lors constituer une avancée importante vers une meilleure compréhension des mécanismes neuronaux de prise de décision et d'émergence perceptive.

Résumé

Cette étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) avait pour objectif la localisation des mécanismes cérébraux mis en jeu lors de la recherche active de transformations verbales, i.e., les changements perceptifs pouvant survenir lors de la répétition interne de séquences langagières. De manière à évaluer les activations cérébrales spécifiquement associées à l'analyse et l'émergence des transformations, deux conditions furent contrastées : Une condition de base impliquant la répétition mentale de chacune des séquences et une condition de transformation verbale impliquant la répétition mentale des mêmes séquences avec recherche active de transformations. Le contraste entre ces deux conditions révèle l'activation d'un réseau neural similaire à celui observé dans des tâches de mémoire de travail. Ce réseau d'aires distribuées, principalement latéralisé dans l'hémisphère gauche, inclut l'activation des régions du gyrus frontal inférieur, du gyrus supérieur temporal et du gyrus supramarginal de l'hémisphère gauche, du cortex cingulaire antérieur droit et, enfin du cervelet. Ces résultats suggèrent que les processus de parsing syllabique, de maintenance attentionnelle de l'information et de prise de décision nécessaires à l'émergence des transformations verbales reposent sur une mémoire de travail intégrant des composantes communes aux systèmes de perception et de production de la parole.

Mots clés: IRMf, Imagerie Auditive, Effet de Transformation Verbale, Mémoire de Travail, Systèmes de Perception et de Production de la Parole.

Abstract

We used functional magnetic resonance imaging (fMRI) to localize the brain areas involved in the imagery analogue of the Verbal Transformation Effect, i.e. the perceptual changes that occur when a speech form is cycled in rapid and continuous mental repetition. Two conditions were contrasted: a baseline condition involving the simple mental repetition of speech sequences and a verbal transformation condition involving the mental repetition of the same items with an active search for verbal transformation. Our results revealed a predominantly left-lateralised network of cerebral regions activated by the verbal transformation task, similar to the neural network involved in verbal working memory: The left inferior frontal gyrus, the left superior temporal gyrus, the left supramarginal gyrus, the anterior part of the right cingulate cortex and the cerebellar cortex bilaterally. Our results strongly suggest that the imagery analogue of the Verbal Transformation Effect, which requires percept analysis, form interpretation and attentional maintenance of verbal material, relies on a working memory module sharing common components of speech perception and speech production systems.

Keywords: fMRI, Auditory Imagery, Verbal Transformation Effect, Verbal Working Memory, Speech Production, Speech Perception.

- Discussion -

Vers une Perception Active des Unités de Parole

Si l'on admet que la plupart des mouvements de l'expression ont été acquis graduellement et sont ensuite devenus instinctifs, il semble jusqu'à un certain point probable a priori que la faculté de les reconnaître est devenue instinctive par un mécanisme identique.

C. Darwin²⁶³

Nous ne perdrons jamais nos voix.

J.-L. Schwartz²⁶⁴

Vers une Perception Active des Unités de Parole

Les résultats des études comportementales réalisées dans le cadre de cette thèse démontrent clairement l'existence d'un biais d'asymétrie dans l'émergence des transformations verbales, biais relevant de contraintes motrices, dépendantes du système de production de la parole. En utilisant le paradigme des transformations verbales comme outil expérimental d'investigation, c'est ainsi le potentiel de mise en forme du langage par les mécanismes de perception et d'action que nous avons voulu interroger, ce, en adoptant une position visant à étudier la perception, comme la production, des unités de parole par le biais de leurs structurations réciproques, ou co-structurations, et non comme deux systèmes indépendants et séparément étudiables. Dans le cadre des travaux visant à démontrer l'existence d'une instantiation physique, donc par la substance, des principes et paramètres de la phonologie, ces études soulignent l'implication des représentations articulo-motrices dans la construction et l'analyse des représentations mentales phonologiques et apportent de nouveaux arguments en faveur d'une nature des représentations perceptives orientées vers le contrôle de l'action.

Face à ces résultats, une question fondamentale est celle de l'identification et localisation des processus cognitifs et cérébraux nécessaires à l'intégration et au traitement des représentations sensorimotrices lors de l'émergence de nouvelles représentations. L'identification d'un réseau neural similaire à celui précédemment mis en évidence lors de tâches de mémoire de travail verbale a permis de démontrer l'engagement de ce système mnésique dans les processus de parsing syllabique, de maintenance attentionnelle de l'information et de prise de décision nécessaires à l'émergence des transformations verbales. L'engagement plus important de ce réseau lors de la manipulation de séquences articulatoires complexes suggère de plus sa possible sensibilité et dépendance non seulement à des principes d'organisation phonologique mais aussi à des contraintes articulatoires spécifiques.

Mis en relation, ces travaux s'inscrivent dès lors dans une problématique/perspective plus large, celle du rôle possible de la mémoire de travail verbale dans l'acquisition du langage. Des recherches récentes ont en effet permis de déterminer l'implication de la Boucle Phonologique dans l'apprentissage de formes phonologiques nouvelles. Dans le cadre des théories soulignant l'importance de l'apprentissage des coordinations orofaciales et orolaryngées dans l'acquisition du langage et face aux études récentes indiquant l'existence possible d'un système de communication/imitation fondé sur la reconnaissance gestuelle, nous émettons l'hypothèse que ce système de mémoire de travail incorpore un processus de contrôle de la parole, fournissant ainsi une plateforme adaptée à la comparaison et l'évaluation des unités de parole et, de là, au développement des capacités langagières.

Arguments pour une Nature Articulatoire de la Boucle Phonologique

Comme souligné précédemment, des recherches récentes ont permis de déterminer l'implication de la Boucle Phonologique dans l'acquisition et le développement du langage. Ces études ont ainsi montré que la contribution de ce système dans la rétention de matériel verbal familier ne serait

²⁶⁸ Darwin, C. (1872). *L'Expression des Emotions chez l'Homme et les Animaux*. Paris, Rivages.

²⁶⁹ Schwartz, J.-L. (2001). J'entends une voix qui a deux ailes. In: *Chansons de Feu pour un Temps de Glace*. Productions Label'Anatole & Musiques Créatives du Sud.

qu'un produit accidentel de sa fonction première : son véritable rôle serait de servir le langage au travers de l'apprentissage de formes phonologiques nouvelles et de permettre, sinon la création, du moins le renforcement des structures phonologiques sous-jacentes²⁷⁰. Cependant, un problème conceptuel majeur se pose quant à la nature même de la Boucle Phonologique. En effet, des études de patients anarthriques et dysarthriques, souffrant de déficits du système de production de la parole mais ne présentant pas de troubles significatifs de mémoire de travail verbale, ont entraîné les psychologues de la mémoire à concevoir ce système comme de moins en moins articuloire et de plus en plus phonologique²⁷¹. Cette conception éloigne alors ce modèle d'une partie des théories et des données expérimentales soulignant l'importance de l'apprentissage de coordinations orofaciales et orolaryngées nouvelles dans l'acquisition des gestes de parole²⁷².

Face à cette question de la nature articuloire/phonologique de la mémoire de travail verbale, nous voulons rappeler ici un certain nombre de travaux suggérant une implication directe de l'appareil périphérique articuloire dans le fonctionnement de ce système, notamment dans la mise en œuvre du processus de contrôle articuloire et dans les mécanismes d'encodage/transcodage sensorimoteur de l'information verbale²⁷³.

Les premiers contre-arguments à une nature purement phonologique de la mémoire de travail verbale ne sont pas nouveaux et sont d'ailleurs à l'origine du terme de Boucle Articuloire initialement choisi par Baddeley et Hitch pour désigner leur modèle. Les effets de longueur de mot et de suppression articuloire, reliés tous deux à la mise en œuvre de programmes moteurs articuloires, sont en effet traditionnellement associés au fonctionnement de la Boucle Phonologique. Rappelons que la capacité de stockage temporaire de l'information verbale est étroitement liée à la durée de prononciation des items à mémoriser, ce quel que soit le type de présentation (i.e., auditive ou visuelle). Cet effet de longueur de mot est généralement associé à la durée d'articulation du matériel verbal à mémoriser et désigné comme dépendant du processus de contrôle articuloire²⁷⁴. Des interprétations alternatives ont cependant été formulées pour expliquer ce phénomène. Brown et Hulme, en utilisant un modèle mathématique de déclin temporel de la trace mnésique et fonction de la longueur syllabique des représentations stockées, ont ainsi suggéré que cet effet ne représente qu'une simple propriété émergente de la mémoire de travail verbale et ne soit aucunement relié au processus de contrôle articuloire²⁷⁵. Cependant, le déclin des traces mnésiques dans ce modèle est étroitement lié à la durée de présentation des items à mémoriser lors de la phase d'encodage. Ce modèle ne peut donc expliquer l'effet de longueur de mot observé dans des tâches d'empan lors de la présentation visuelle et à vitesse fixe du matériel verbal. Une seconde interprétation de cet effet est basée sur la structure phonologique des séquences stockées, i.e. dépendant du nombre de syllabes ou de phonèmes, plus que sur leur durée de prononciation propre.

²⁷⁰ Pour une revue, voir Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1993). *op. cit.* ; Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C. (1998). *op. cit.* ; Comblain, A. (1999). *op. cit.* ; Baddeley, A.D. (2003) *op. cit.*

²⁷¹ Baddeley, A.D. & Wilson, B. (1985). *op. cit.* ; Bishop, D.V.M. & Robson, J. (1989). *op. cit.* Pour une description détaillée de ces études, voir Gathercole, S.E. (1994). *op. cit.*

²⁷² Liberman, A.M. & Mattingly, I.G. (1985). *op. cit.* ; Kuhl, P.K. & Meltzoff, A.N. (1996). Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100: 2425-2438 ; Meltzoff, A.N. & Moore, M.K. (1997). Explaining facial imitation: A theoretical Model. *Early Development and Parenting*, 6: 179-192 ; MacNeilage, P.F. (1998). *op. cit.* ; Liberman, A.M. & Whalen, D.H. (2000). On the relation of speech to language. *Trends in Cognitive Science*, 3(7): 254-264 ; Schwartz, J.L., Abry, C., Boë, L.J. & Cathiard, M.A. (2002). *op. cit.*

²⁷³ Bien que toujours contestée par nombre de psychologues de la mémoire, cette hypothèse/conception de la mémoire de travail dépendant de contraintes sensorimotrices est cependant généralement admise dans le domaine des neurosciences. Ainsi, en 1993, Jean-François Démonet, sur le rôle de l'aire de Broca, notait déjà que "l'activation observée de cette aire pré-motrice dans des tâches de compréhension de méta-langage artificiel suggère l'implication d'un processus de transcodage sensorimoteur qui est aussi impliqué dans d'autres phénomènes psychologiques comme la théorie de perception de la parole, le langage intérieur, la boucle articuloire de la mémoire de travail, ou les stratégies motrices développées par les enfants durant la période d'acquisition du langage". Ce sont exactement les domaines traités dans la présente discussion pour argumenter d'une nature "articuloire" de la Boucle Phonologique. Démonet, J.-F., Wise, R. & Frackowiak, R.S.J. (1993). Language functions explored in normal subjects by positron emission tomography: A critical review. *Human Brain Mapping*, 1: 39-47.

²⁷⁴ Baddeley, A.D., Thomson, N. & Buchanan, M. (1975). *op. cit.*

²⁷⁵ Brown, G.D.A. & Hulme, C. (1995). Modelling item length effects in memory span: No rehearsal needed? *Journal of Memory and Language*, 34: 594-621.

Cependant, du fait des différences temporelles minimales de durée d'articulation des séquences à mémoriser une fois le nombre de phonèmes contrôlé, des résultats contradictoires ont été observés. Il apparaît ainsi difficile de trancher entre ces deux explications articulatoire ou phonologique. Des données expérimentales en faveur d'une interprétation motrice de l'effet de longueur de mot proviennent néanmoins d'études portant sur les capacités de mémoire de travail pour des sujets sourds ou malentendants utilisant la langue des signes. Des études ont en effet montré que la mémoire de travail verbale dans cette langue présentait les mêmes caractéristiques et contraintes qu'en langage parlé. Ainsi, les effets de longueur de mot, de suppression articulatoire, d'écoute inattentive et de similarité phonologique ont tous été observés en langue des signes. De plus, le patron des interactions entre ces effets est identique pour des gestes signés ou parlés²⁷⁶. Du fait de structures organisationnelles des gestes signés fortement similaires avec les structures phonologiques en langage parlé et d'une amplitude des mouvements gestuels plus accentués dans cette langue, Wilson et Emmorey ont pu démontrer chez des sujets sourds de naissance que l'effet de longueur de mot n'était pas fonction du nombre de segments phonologiques des items à mémoriser mais bien de la durée des mouvements relatifs à ces séquences²⁷⁷. Prises ensemble, ces études convergent donc vers une interprétation motrice de l'effet de longueur de mot, reliée à la durée de réalisation des gestes langagiers articulatoires ou manuels.

Outre la durée de prononciation des items à mémoriser, de nombreuses études suggèrent également une relation possible entre vitesse d'articulation et performances en mémoire de travail. Des chercheurs ont ainsi observé un empan systématiquement plus faible pour des enfants gallois que pour des enfants anglais²⁷⁸. Ces résultats s'expliquent, selon les auteurs, par le temps de prononciation des voyelles plus longues et plus traînantes en gallois. Une étude ultérieure a d'ailleurs permis d'étendre cette relation entre empan de chiffres et durée de prononciation pour quatre langues différentes²⁷⁹. D'autres études ont souligné l'influence de l'âge sur la capacité/vitesse d'articulation/répétition, ce, en accord avec le développement de l'empan durant l'enfance²⁸⁰. Enfin, une étude longitudinale menée par Speidel sur le développement du langage de jumeaux hétérozygotes bilingues anglais-allemand souligne aussi l'importance des capacités articulatoires sur la mémoire de travail verbale²⁸¹. Les deux enfants présentaient de bonnes et comparables capacités intellectuelles et avaient une excellente compréhension de l'anglais et de l'allemand. Cependant, le garçon présentait jusqu'à un âge avancé des problèmes de production dans les deux langues ainsi que des capacités de mémoire de travail verbale inférieures à celles de sa sœur. De ces résultats, Speidel suggère que les capacités articulatoires durant les premières étapes de l'acquisition du langage influencent directement la mémoire phonologique de l'enfant.

Une seconde source de données en faveur d'une nature articulatoire de la mémoire de travail verbale provient des études portant sur l'effet de suppression articulatoire. Les performances dans les tâches d'empan mnésique ou de rappel libre immédiat sont en effet significativement diminuées lorsque l'on demande aux sujets, pendant la phase de présentation des items à mémoriser, de répéter conjointement une séquence hors de propos²⁸². Cette technique expérimentale est présumée empêcher le fonctionnement normal du processus de contrôle articulatoire, soit pour rafraîchir des éléments se trouvant déjà dans l'unité de stockage phonologique, soit pour convertir des éléments visuels en un code phonologique. Différentes interprétations, rejetant l'implication de programmes moteurs articulatoires, ont été formulées pour expliquer cet effet. Une première approche est celle

²⁷⁶ Pour une revue, voir Wilson, M. (2001). *op. cit.*

²⁷⁷ Wilson, M. & Emmorey, K. (1998). A "Word length effect" for sign language: Further evidence for the role of language in structuring working memory. *Memory & Cognition*, 26: 584-590. Face aux travaux portant sur la simulation mentale du mouvement, les résultats de cette étude fournissent de plus de nouveaux arguments en faveur d'un couplage fonctionnel entre mouvement exécuté et mouvement imaginé.

²⁷⁸ Ellis, N.C. & Hennesly, R.A. (1980). *op. cit.*

²⁷⁹ Naveh-Benjamin, M. & Ayres, T.J. (1986). *op. cit.*

²⁸⁰ Pour une revue, Baddeley, A.D. (1986). *op. cit.* ; Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1993). *op. cit.*

²⁸¹ Speidel, G.E. (1989). Imitation: A bootstrap for learning to speak? In: Speidel, G.E. & Nelson, K.E. (Editors.), *The Many Faces of Imitation in Language Learning*, New York, Springer Verlag: 151-179 ; Speidel, G.E. (1993). Phonological short-term memory and individual differences in learning to speak: A bilingual case study. *First Language*, 13: 69-91.

²⁸² Murray, D.J. (1968). Articulation and acoustic confusability in short-term memory. *Journal of Experimental Psychology*, 78: 679-684.

de Gupta et MacWhinney, associant l'effet de suppression articulatoire à celui d'écoute inattentive²⁸³. Ainsi, les performances mnésiques moindres observées lors de la répétition conjointe de matériel langagier proviendraient de la perception de matériel verbal non pertinent, interférant avec les représentations stockées. Cependant, le fait que cet effet ait été également observé lors d'une procédure de répétition conjointe silencieuse permet de rejeter définitivement cette première hypothèse²⁸⁴. Une seconde explication de cet effet est celle de la génération de représentations auditivo-perceptives mentales, sorte d'écho phonologique, ce quel que soit le mode de répétition conjointement utilisée (i.e., ouvert ou silencieux). Cependant, cette hypothèse ne s'accorde pas aux résultats obtenus par Reisberg et ses collègues lors d'une tâche de transformation verbale, montrant que le fait de mâcher du chewing-gum ou encore d'avoir les articulateurs bloqués entraîne une baisse du nombre de transformations similaire à celle observée lors d'une procédure de suppression articulatoire liée à la répétition de matériel langagier²⁸⁵. Enfin, une troisième explication concerne la nature des représentations phonologiques stockées en mémoire et suppose l'existence d'un format abstrait et amodal des représentations, non directement relié aux processus de perception et de production de la parole. Là encore, cette explication est difficilement réconciliable avec les résultats obtenus par Reisberg et ses collègues. De plus, dans le cadre de cette hypothèse, les effets de suppression articulatoire et d'écoute inattentive devraient être virtuellement identiques en termes d'interférences avec les représentations stockées, ce qui n'est pas le cas²⁸⁶.

Concernant la possible nature amodale et/ou abstraite des représentations phonologiques en mémoire de travail, un contre-argument majeur provient des études sur des sujets utilisant la langue des signes. En effet, malgré une grande similarité des résultats observés dans des tâches de mémoire de travail en langue des signes et en langue parlée, certaines différences émergent néanmoins : ces différences étant précisément liées à la nature temporelle ou spatiale des stimuli et donc au processus d'encodage mis en œuvre dans ces deux modalités. Il a notamment été montré que ces sujets utilisent les caractéristiques spatiales des items à mémoriser, par contraste à l'utilisation des caractéristiques temporelles du matériel verbal en langage parlé. On observe par exemple, lors de tâches d'empan, des résultats identiques pour ces sujets quel que soit l'ordre de rappel des séquences (normal ou inversé), ce qui n'est pas le cas pour des sujets entendants où un ordre inversé des items à rappeler entraîne une chute des performances. Ce résultat suggère ainsi, qu'en plus de l'ordre sériel des stimuli, des mécanismes de stockage de la localisation spatiale de la main pour chaque item, correspondant à sa position en début de trajectoire, sont mis en œuvre (cette source supplémentaire d'information faciliterait ainsi les mécanismes de regroupement et/ou de différenciation des items). Enfin, alors que la présentation visuelle de stimuli non-langagiers lors des phases de rétention et de rappel n'entraîne pas de déficits de performance en langue parlée (il n'existe pas non plus dans cette modalité d'effet de similarité orthographique), la présentation visuelle de matériel non verbal (formes mouvantes) provoque une baisse des performances chez des sujets utilisant la langue des signes²⁸⁷. Inversement, des études indiquent que l'effet d'écoute inattentive apparaît également lors de l'écoute de bruit non-langagier ou lors de l'écoute de musique instrumentale²⁸⁸. L'existence de mécanismes d'interférence avec les représentations phonologiques en mémoire de travail directement fonction de la modalité langagière utilisée par le sujet - auditive ou visuelle²⁸⁹ - et ce pour des stimuli non verbaux²⁹⁰ témoigne donc de

²⁸³ Gupta, P. & MacWhinney, B. (1995). *op. cit.* Pour une interprétation similaire des effets expérimentaux liés à la Boucle Phonologique et dépendant des représentations phonologiques construites au travers des processus de perception langagière, voir Gathercole, S.E. & Martin, A. (1996). Interactive processes in phonological memory. In: Gathercole, S.E. (Editor), *Models of Short-Term Memory*. Hove, U.K.: Psychology Press, pp. 73-100.

²⁸⁴ Murray, D.J. (1967). *op. cit.* Pour un effet similaire sur l'Effet de Transformation Verbale, voir également Smith, J.D., Wilson, M. & Reisberg, D. (1995). *op. cit.*

²⁸⁵ Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). *op. cit.*

²⁸⁶ Il a par exemple été démontré que la répétition, mais non la perception, d'un item unique pouvait entraîner une baisse des performances de rappel. Baddeley, A.D. (1986). *op. cit.*

²⁸⁷ Pour une revue, Wilson, M. (2001). *op. cit.*

²⁸⁸ Jones, D. (1993). *op. cit.* ; Salamé, P. & Baddeley, A.D. (1989). *op. cit.*

²⁸⁹ Dans le cas, rare mais bien réel, de sujets sourds et aveugles, une méthode a été développée pour percevoir la parole uniquement par le toucher du conduit vocal de l'interlocuteur. Cette méthode, intitulée TADOMA, consiste à placer le pouce sur les lèvres du locuteur, l'index sur la joue et les autres doigts sur le cou en dessous de la mandibule. Il s'agit ainsi pour le sujet de pénétrer la réalité motrice de la parole par le ressenti des mouvements du conduit vocal. L'étude des

l'importance/primauté de cette modalité dans les processus d'encodage et de traitement des représentations mnésiques, un résultat difficilement réconciliable avec une conception purement abstraite et/ou amodale des représentations et traitements phonologiques.

Comme souligné précédemment, l'étude de Bishop et Robson, sur des sujets anarthriques congénitaux souffrant de déficits du système de production de la parole mais ne présentant pas de troubles significatifs de mémoire de travail verbale, et montrant notamment un effet de longueur de mot évident, représente pour nombre de psychologues de la mémoire un argument central en faveur d'une nature purement phonologique de ce système mnésique. Dans une revue récente, Margaret Wilson a néanmoins proposé une hypothèse alternative permettant d'expliquer les capacités mnésiques intactes chez ces sujets. Pour cet auteur, la possibilité que des programmes articulatoires moteurs puissent être spécifiés de manière innée ou encore être acquis sur la base des mécanismes perceptifs auditifs ou visuels de la parole ne peut être a priori exclue. Un certain nombre de données expérimentales arguent en effet en faveur de l'existence d'un schéma corporel interne, reliant les mécanismes de perception et de production des actions, impliqué chez le jeune enfant dans les procédures de simulation mentale, d'anticipation et d'imitation des actions observées, et ainsi à la base des interactions sociales²⁹¹. Enfin, un dernier contre-argument à une nature purement abstraite de la mémoire de travail verbale provient d'une étude ultérieure de Bishop, Byers-Brown et Robson²⁹². Reprenant leurs travaux menés sur le même groupe de patients anarthriques congénitaux, les auteurs réfutent partiellement leurs premières analyses. Les résultats de cette nouvelle étude montrent en effet pour ces sujets des déficits à des tests d'apprentissage et de discrimination de phonèmes pour des pseudomots (dans l'étude précédente, ils n'avaient utilisé que des mots réels). Bishop, Byers-Brown et Robson expliquent alors les différences de résultats entre les deux études par l'influence des représentations lexicales et sémantiques dans la rétention de mots réels. Bien qu'ils rappellent que l'incapacité à répéter de ces sujets n'empêche pas l'acquisition de vocabulaire mais retarde son développement, ils relient les déficits de contrôle musculaire de l'appareil articulatoire aux faibles résultats obtenus aux tests de discrimination de phonèmes et d'apprentissage de pseudomots, et proposent que les mécanismes articulatoires soient directement impliqués dans la rétention de formes phonologiques nouvelles.

En conclusion, un nombre considérable de données expérimentales suggèrent l'implication de mécanismes moteurs de l'appareil articulatoire en mémoire de travail. Nous ne défendons cependant pas une conception purement articulatoire de ce système. Nous préférons suggérer que les représentations phonologiques, contenues en mémoire de travail verbale, puissent aussi

mécanismes d'encodage et de traitement des représentations verbales mis en œuvre lors de tâches de mémoire de travail chez ces sujets pourrait ainsi permettre d'étendre ces résultats à la modalité tactile. Reed, C.M., Rabinowitz, W.M., Durlach, N.I. & Braida, L.D. (1985). Research on the tadoma method of speech communication. *Journal of Acoustical Society of America*, 28: 1275-1277.

²⁹⁰ Le degré d'interférence avec les représentations stockées en mémoire de travail étant cependant moindre pour ce type de stimuli que pour des stimuli langagiers. Il est à noter également une série de travaux montrant la possibilité de faire se croiser les modalités auditives et visuelles en mémoire de travail. Ainsi, un suffixe lu sur les lèvres perturbe le rappel d'une liste présentée auditivement, et réciproquement les performances de rappel d'une liste présentée en lecture labiale sont diminuées par la présentation acoustique et conjointe de matériel verbal. Campbell, R. & Dodd, B. (1982). Some suffix effects on lipread lists. *Canadian Journal of Psychology*, 36: 508-514 ; de Gelder, B. & Vroomen, J. (1992). Abstract versus modality-specific memory representations in processing auditory and visual speech. *Memory and Cognition*, 20: 533-538.

²⁹¹ Il a ainsi été constaté que des enfants souffrant de "membre fantôme" dès la naissance, i.e. présentant une déformation congénitale caractérisée par l'absence de certains membres de leurs corps, continuaient néanmoins à ressentir ces membres malgré leur absence physique. Ramachandran, V.S. & Blakeslee, S. (2002). *op. cit.* Il apparaît de plus que les nouveaux-nés, dès les premières heures de vie, sont capables de reproduire certaines des actions orofaciales produites devant eux. Cette capacité "innée" d'imitation suppose donc l'existence de connaissances implicites des relations/connexions existantes entre la réalisation d'une action et son observation. Meltzoff, A.N. & Moore, M.K. (1997). *op. cit.* Enfin, la prédominance de production des consonnes bilabiales (correspondant à une articulation visible) dans les premiers stades d'acquisition du langage, prédominance renforcée chez les enfants malentendants mais non chez les enfants aveugles, démontre l'importance de la lecture labiale dès les premiers stades du développement du langage et de la capacité chez le jeune enfant à traduire/reproduire les gestes orofaciaux perçus. Pour une revue, Schwartz, J.-L., Abry, C., Boë, L.-J. & Cathiard, M.A. (2002). *op. cit.*

²⁹² Bishop, D.V.M., Byers-Brown, B. & Robson, J. (1990). The relationship between phoneme discrimination, speech production, and language comprehension in cerebral-palsied individuals. *Journal of Speech and Hearing Research*, 33: 210-219.

dépendre de contraintes motrices spécifiques. En d'autres termes, la Boucle Phonologique est bien "phonologique", si l'on accepte l'idée que le système de contrôle articulatoire joue également un rôle dans l'encodage et le traitement des représentations phonologiques. Face à cette hypothèse, la Boucle Phonologique pourrait ainsi incorporer un processus de contrôle des gestes de parole et constituer dès lors une plate-forme adaptée à la comparaison et l'évaluation de formes phonologiques nouvelles, notamment lors de l'acquisition du langage.

Vers un Système de Communication/Imitation Fondé sur la Reconnaissance Gestuelle

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, visant à souligner la dépendance des représentations mentales phonologiques à des contraintes purement articulatoires, ont emprunté au domaine scientifique de la cognition motrice l'idée d'un couplage fonctionnel, d'une co-structuration, des systèmes de perception et de production de la parole. Les hypothèses que nous avons formulées, notamment celle d'une mémoire de travail jouant le rôle d'une interface entre représentations acoustiques et articulatoires et donc dépendante de contraintes sensorimotrices, s'inscrivent dans une conception d'un système de perception de la parole orientée vers et pour le contrôle de l'action.

Différents travaux et théories scientifiques apportent des arguments en faveur d'un système de perception des unités de parole étroitement dépendant des représentations d'action. Nous nous sommes notamment appuyés sur la théorie *Frame-then-Content* de Peter MacNeilage et Barbara Davis²⁹³ postulant une structure de l'organisation de la parole constituée d'un cadre oscillatoire mandibulaire porteur de la syllabe (*frame*) et d'un contenu segmental venant moduler ce cadre (*content*). Pour les auteurs, ces composantes seraient contrôlées par deux systèmes moteurs distincts, un système prémoteur mésial incluant aire motrice supplémentaire et cortex cingulaire antérieur, responsable des cyclicités endogènes auto-générées, et un système prémoteur latéral, constitué notamment des aires de Broca et de Wernicke, responsable de l'apprentissage exogène des contenus du système phonologique. Il y aurait ainsi un principe de base se traduisant par la réalisation de gestes simples d'ouverture/fermeture mandibulaire lors du babillage canonique, période d'exploration motrice chez l'enfant, permettant un apprentissage des correspondances entre les mouvements réalisés et la configuration nécessaire de son appareil articulatoire. Puis se mettrait progressivement en œuvre un paramétrage, une spécification, des productions articulatoires, paramétrage rendu possible par le développement, la maturation, des connexions corticales, plus particulièrement entre l'aire motrice supplémentaire, l'aire de Broca et le cortex moteur orofacial vers l'âge de 12-15 mois²⁹⁴. A ce stade, la communication entre ces systèmes permettrait à l'enfant une mise en relation des actions exécutées et des actions perçues²⁹⁵. Ce jeu des facteurs d'origine endogène et exogène aboutirait à la spécialisation/maturation fonctionnelle de ces régions cérébrales dans la reconnaissance des gestes de parole et le développement des capacités cognitives associées²⁹⁶, i.e., perceptives, motrices et attentionnelles, une étape primordiale dans la reconnaissance et l'apprentissage des unités langagières pertinentes et de leur régularité et organisation au sein de l'environnement linguistique de l'enfant.

²⁹³ MacNeilage, P.F. (1998). *op. cit.* ; MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2001). *op. cit.* ; Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (2004). The frame/content theory of speech evolution: From lip smacks to syllables. *Primatologie, to appear.*

²⁹⁴ Abry, C., Laboissière, R. & Schwartz, J.-L. (1998) *op. cit.* ; Abry, C., Stefanuto, M., Vilain, A. & Laboissière, R. (2002). *op. cit.*

²⁹⁵ Cet enchaînement des phases d'acquisition des gestes de parole est assez proche de celui postulé par Meltzoff et Moore pour expliquer les mécanismes d'imitation des gestes orofaciaux chez l'enfant et spécifiant trois étapes successives nécessaires, soit une première étape d'identification/différenciation des parties de son corps (*organ identification*), une seconde étape d'exploration motrice (*body babbling*) et enfin une dernière étape de comparaison/ajustement des mouvements produits et des mouvements de l'adulte perçus (*organ relations*). Meltzoff, A.N. & Moore, M.K. (1997). *op. cit.*

²⁹⁶ de Schonen, S. & Livet, M.-O. (1999). Neurosciences du développement cognitif. In: Rondal, J.A. & Esperet, E. (Eds.), *Manuel de Psychologie de l'Enfant*, Liège, Mardaga, pp. 101-153.

L'apprentissage progressif des unités langagières au cours du développement, étroitement lié à l'analyse et à la construction des représentations mentales phonologiques, pourrait en partie dépendre du système de mémoire de travail verbale. En effet, par l'observation des relations entre les capacités mnésiques et le degré d'acquisition du vocabulaire chez des enfants de 3 à 8 ans, Baddeley et ses collègues ont montré que le véritable rôle de ce système mnésique serait de permettre l'apprentissage de formes phonologiques nouvelles²⁹⁷. L'engagement possible de cette mémoire, notamment au travers du processus de contrôle articulatoire, dans la comparaison et l'évaluation des gestes de parole, et donc dans le traitement des représentations d'actions, est de plus suggéré par le nombre important de données expérimentales soulignant l'implication de contraintes sensorimotrices dans son fonctionnement²⁹⁸.

En accord avec ces données, des travaux de neuroimagerie fonctionnelle ont montré l'encapsulation des régions cérébrales associées à ce système - notamment lors de tâches métalinguistiques dont la réalisation nécessite l'analyse et la manipulation en ligne d'informations verbales - au sein des réseaux neuronaux impliqués dans les processus de perception et de production de la parole. Hickok et Poeppel ont ainsi suggéré que la mémoire de travail, partageant des composantes communes à ces deux systèmes, constitue une interface privilégiée entre les représentations acoustiques de la parole, exploitées dans le gyrus temporal supérieur, et les représentations articulo-motrices issues du gyrus frontal inférieur²⁹⁹. Ces mécanismes de recodage/mapping sensorimoteur des informations acoustiques et articulatoires, localisés dans le gyrus supramarginal du cortex pariétal inférieur, seraient à la base de la construction des représentations mentales phonologiques. L'engagement de ce circuit fronto-temporo-pariétal lors de tâches de mémoire de travail (ou lors de la perception/compréhension de parole) serait directement fonction de la nécessité et du degré d'implication des mécanismes d'encodage/transcodage des informations sensorimotrices dans la réalisation de ces tâches et pourrait dépendre de la possible intervention/suppléance des régions cérébrales - notamment du gyrus temporal inférieur, du gyrus précentral et du lobule pariétal supérieur - impliqués dans la conservation à long-terme des représentations lexico-sémantiques, des coordinations articulatoires et des configurations spatiales du conduit vocal. Cette suppléance des représentations en mémoire à long-terme dans le fonctionnement de la mémoire de travail permettrait d'expliquer notamment l'observation d'une corrélation entre capacités mnésiques et degré d'acquisition du vocabulaire chez l'enfant³⁰⁰, les effets de lexicalité et de ressemblance lexicale chez l'adulte ou, d'un point de vue général, les différences d'activations des régions cérébrales associées au fonctionnement de ce système mnésique observées lors de tâches linguistiques et/ou mnésiques en fonction de la nature/caractéristique des stimuli utilisés et de la profondeur des traitements requis pour réaliser ces tâches.

Dès lors, une question importante est celle de l'identification des mécanismes neurophysiologiques liés à la maturation du système de mémoire de travail verbal, à la construction progressive des représentations de parole en mémoire à long-terme et au jeu des interactions entre ces deux systèmes durant l'enfance. Cependant, bien que les données issues de la neuropsychologie développementale et des neurosciences du développement aient permis une meilleure compréhension des mécanismes à la base de l'épigenèse des compétences cognitives (et notamment du langage), le jeu complexe des facteurs d'origine endogène et exogène dans la maturation et la spécialisation fonctionnelle des régions cérébrales rend difficile une telle approche³⁰¹. Une source potentielle d'information vers une meilleure compréhension des mécanismes à la base du développement des capacités cognitives chez l'homme pourrait provenir de l'étude des

²⁹⁷ Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1993). *op. cit.* ; Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C. (1998). *op. cit.* ; Baddeley, A.D. (2003) *op. cit.*

²⁹⁸ Pour une revue, voir Wilson, M. (2001). *op. cit.*

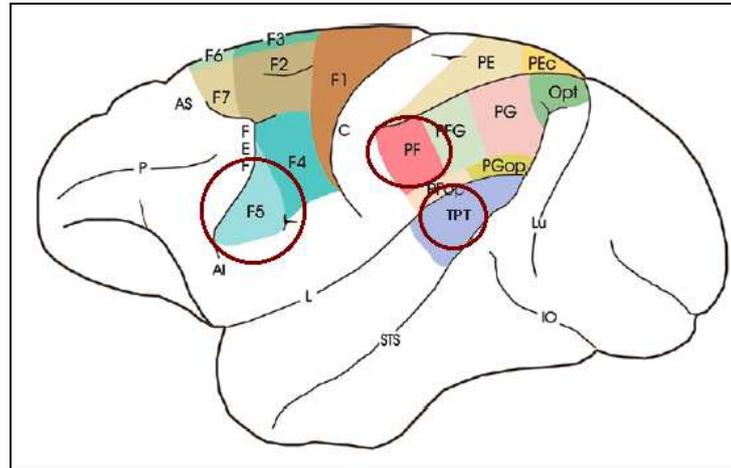
²⁹⁹ Hickok, G. & Poeppel, D. (2000). *op. cit.* ; Hickok, G. (2001). *op. cit.* ; Hickok, G. & Poeppel, D. (2004). *op. cit.*

³⁰⁰ En accord avec cette hypothèse, une analyse plus détaillée de ces études indique qu'entre 3 et 6 ans, ce sont les capacités de mémoire de travail qui déterminent les connaissances lexicales des sujets. Par contre, à partir de 6 ans, cette relation s'inverse : ce sont les connaissances lexicales des enfants qui déterminent leur performance aux tâches de mémoire de travail. Ce résultat s'expliquerait par le développement du lexique chez l'enfant : arrivées à un certain stade de maturation, ces capacités lexicales et sémantiques influenceraient alors l'apprentissage de nouveaux mots.

³⁰¹ de Schonen, S. & Livet, M.-O. (1999). *op. cit.*

caractéristiques, et notamment de l'architecture, des régions cérébrales chez les primates non-humains et des connexions entre ces régions, permettant par l'identification de correspondances/équivalences avec leurs supposés homologues chez l'homme d'établir un parallèle entre capacités cognitives et développement cérébral.

Figure 22 : Vue latérale du cerveau d'un singe macaque. AI: sillon arqué inférieur, AS: sillon arqué supérieur, C: Sillon central, L: Scissure latérale, P: Scissure Principale, Pos: Sillon pariéto-occipital, STS: Sillon supérieur temporal.



Dans une revue récente sur le développement des connexions cortico-corticales des régions du cortex préfrontal, pariétal et temporal entre différentes espèces de primates non-humains, Aboitiz et Garcia ont ainsi postulé que, dans l'évolution humaine, deux grandes tendances dans ce développement neural sont à l'origine du langage³⁰² (voir la Figure 22). La première concerne l'établissement/développement de connexions entre l'aire Tpt, possible précurseur de l'aire de Wernicke, et l'aire PF du lobule pariétal inférieur, possible précurseur du gyrus supramarginal et richement connecté avec le cortex prémoteur, incluant l'homologue de l'aire de Broca dans sa partie ventrale (aire F5). L'aire Tpt, située dans la partie dorsale du lobe supérieur temporal, représente chez le macaque une zone multimodale recevant des projections des aires auditives, visuelles et du cortex somatosensoriel. Cette région est supposée jouer un rôle dans les mécanismes de localisation spatiale des sources sonores, et notamment des cris des congénères. Les auteurs supposent que le développement des connexions entre ces deux régions pariétale et temporale ont permis de relier le système auditif avec la boucle pariéto-frontale impliquée dans la coordination motrice des mouvements et, plus particulièrement, la génération des mouvements orofaciaux. Bien que moins argumenté par les auteurs, le second développement important serait celui de l'établissement possible de connexions directes entre l'aire Tpt et l'homologue de l'aire de Broca, permettant une certaine automaticité des mécanismes de transcoding des informations sensorimotrices. Pour les auteurs, la mise en place de ce système, qu'ils considèrent comme le précurseur de la mémoire de travail chez l'homme, aurait contribué à la formation de concepts élaborés du monde environnant par l'élaboration de représentations internes, sur la base des informations sensorimotrices issues du circuit pariéto-frontal et des informations auditives issues du cortex temporal. Impliqué dans l'apprentissage/imitation des vocalisations, ce système serait ainsi à l'origine de l'établissement des premières primitives du langage³⁰³.

³⁰² Aboitiz, F. & Garcia, V. (1997). The evolutionary origin of the language areas in the human brain. A neuroanatomical perspective. *Brain Research Reviews*, 25: 381-396.

³⁰³ Pour les auteurs, la faculté de langage serait le fruit de développements biologiques graduels liés aux principes de sélection naturelle. Cette vue darwinienne de l'origine du langage s'oppose en partie avec la conception chomskienne d'un organe du langage fruit d'une unique mutation biologique. Chomsky dans une version plus modérée de sa théorie a cependant réintroduit l'importance du système sensorimoteur, sinon dans l'établissement, du moins dans le

Pris ensemble, ces travaux arguent donc en faveur d'un système de perception/communication de la parole orienté vers et pour le contrôle de l'action, issu du développement des capacités motrices et perceptives et de leur mise en relation au travers d'un système de mémoire de travail adapté au traitement des représentations mentales sensorimotrices. Un dernier élément majeur en faveur de cette hypothèse est la découverte récente du système des neurones miroirs par l'équipe de Giacomo Rizzolatti, une découverte suggérant l'existence d'un système de compréhension et d'imitation des actions, notamment orofaciales, chez le singe et probablement mis en œuvre chez l'homme³⁰⁴.

A l'origine de cette découverte est l'observation chez le singe macaque d'une propriété singulière des neurones de l'aire F5 du cortex prémoteur ventral, une région richement interconnectée notamment avec les aires visuelles et qui participe à la préparation et la coordination de mouvements orientés vers un but. Des enregistrements individuels de neurones dans cette aire ont effet montré qu'ils étaient activés aussi bien lors de l'exécution d'une action spécifique (par exemple la saisie d'un objet) que lors de l'observation par le singe, alors immobile, d'une action similaire effectuée par l'expérimentateur. Ces neurones, dès lors baptisés neurones miroirs, sont donc actifs pour une action donnée qu'elle soit effectuée par l'animal ou que ce dernier observe son exécution par un tiers (congénère ou humain)³⁰⁵. Ce n'est cependant que lorsque l'action fait sens et qu'elle met en relation un effecteur biologique³⁰⁶ (main ou bouche) et un objet que les neurones miroirs s'activent³⁰⁷. Il semble donc que ces neurones génèrent une représentation interne de l'action transitive perçue, une représentation nécessaire à sa reconnaissance. Certaines des caractéristiques de ces neurones permettent de mieux cerner leur rôle dans ce processus de compréhension de l'action. Il a été ainsi montré que la signification de l'objet n'avait pas d'influence majeure sur leur degré d'activation (ainsi saisir une pomme ou saisir un sphère métallique produit la même intensité de réponse), qu'ils présentaient un large degré de généralisation (on observe des réponses similaires pour des stimuli visuels différents mais impliquant tous la même action réalisée avec le même effecteur), enfin, qu'il existait une congruence forte entre leurs propriétés visuelles et motrices (par exemple, les neurones impliqués dans la saisie manuelle d'un objet sont uniquement sensibles à la perception de mouvements similaires³⁰⁸). Sur la base de telles propriétés, il a été suggéré que les neurones miroirs constituent dès lors un système perceptif de reconnaissance gestuelle impliqué dans la compréhension, voire l'imitation, des actions perçues.

Il a été également observé l'existence de neurones miroirs associés à la reconnaissance des actions orofaciales dans une région plus ventrale de l'aire F5, ces neurones étant activés aussi bien

développement des capacités langagières. Hauser, M.D., Chomsky, N. & Fitch, W.T. (2002). The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve? *Science*, 298: 1569-1579.

³⁰⁴ Pour une revue, Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Review Neuroscience*, 2 : 661-670 ; Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27: 169-192.

³⁰⁵ Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: A neurophysiological study. *Exp. Brain Res.*, 91: 176-180 ; Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L. & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119: 593-609.

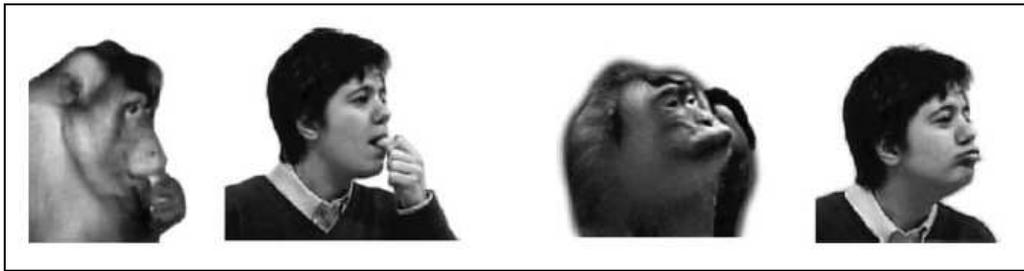
³⁰⁶ Ainsi l'utilisation d'un outil pour saisir un objet ne semble pas provoquer l'activation de ces neurones chez le singe. L'excitabilité préférentielle des neurones miroirs pour des actions biologiques a également été montrée chez l'homme. Tai, Y.F., Scherfler, C., Brooks, D.J., Sawamoto, N. & Castiello, U. (2004). The human premotor cortex is 'mirror' only for biological actions. *Current Biology*, 14 : 117-120.

³⁰⁷ Une autre catégorie de neurones visuomoteurs présents dans l'aire F5 et dans l'aire intrapariétale antérieure (AIP) chez le singe renforce cette liaison entre réponse neuronale et but de l'action : les neurones canoniques. Bien que partageant avec les neurones miroirs les mêmes propriétés motrices, ces neurones s'activent à la simple vue d'un objet saisissable (et lorsque le singe saisit cet objet). Il a été suggéré que ce type de neurone soit impliqué dans un mécanisme de transformation des propriétés intrinsèques de l'objet perçu vers la réalisation (simulée ou non) d'un mouvement approprié. Pour une description du circuit neural des neurones canoniques chez le singe et chez l'homme : Grèzes, J., Armony, J.L., Rowe, J. & Passingham, R.E. (2003). Activations related to "mirror" and "canonical" neurons in the human brain: An fMRI study. *NeuroImage*, 18: 928-937.

³⁰⁸ Les propriétés motrices des neurones de l'aire F5 sont en fait très spécifiques. Ainsi, un ensemble de neurones donné peut être impliqué dans le codage d'une posture particulière des doigts de la main mais pas dans celui correspondant à une configuration des doigts différente. Il a été proposé une distinction entre les neurones pour lesquels les propriétés motrices et visuelles étaient strictement congruentes et les neurones dont l'activation ne dépend pas forcément de l'observation d'une action strictement identique au type d'action motrice qu'ils codent.

lors de l'exécution que lors de l'observation de telles actions³⁰⁹. Dans le cortex prémoteur, les résultats ont montré que 80% de ces neurones miroirs répondaient à des actions ingestives (comme saisir de la nourriture avec la bouche) et 20% répondaient aussi à des actions communicatives non liées à un objet (*lip smacking*, voir la Figure 23). Cette découverte de neurones miroirs associés à des actions intransitives orofaciales semble donc indiquer l'existence de représentations sensorimotrices permettant la reconnaissance de gestes orofaciaux communicatifs et/ou émotionnels chez le singe macaque, possibles précurseurs des mécanismes d'empathie et de mindreading chez l'homme³¹⁰.

Figure 23 : Exemple d'actions orofaciales transitives et intransitives pour lesquelles l'activation de neurones miroirs de l'aire F5 a été observée. Repris de Ferrari *et al.* (2003).



Un autre résultat majeur provient d'une étude montrant l'existence de neurones miroirs, baptisés neurones miroirs audio-visuels, activés lors de la présentation de stimuli audiovisuels liés à des actions transitives (comme ouvrir une cacahuète) et lors de la seule écoute des stimuli auditifs associés³¹¹ (et non lors de l'écoute de stimuli reliés à des actions intransitives comme des cris d'animaux). Une étude ultérieure a de plus montré que l'amplitude de réponse de la moitié de ces neurones augmentait lors de la présentation conjointe des stimuli audio et visuels par rapport à une présentation unimodale³¹². Ces résultats soulignent ainsi l'importance des mécanismes de transcodage entre représentations acoustiques et motrices et démontrent la capacité de ce système de reconnaissance gestuelle à générer des représentations d'action en dehors de toute information visuelle³¹³.

³⁰⁹ Ferrari, P. F., Gallese, V., Rizzolatti, G. & Fogassi, L. (2003). Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *European Journal of Neuroscience*, 17: 1703-1714. Ces résultats suggèrent donc une somatotopisation des neurones miroirs activés en fonction des effecteurs biologiques impliqués dans l'action perçue ou exécutée, ce, conformément aux activations observées initialement dans les cortex moteur et sensoriel.

³¹⁰ Cette étude apporte ainsi de nouveaux éléments en faveur de la théorie *Frame-then-Content* de MacNeilage postulant l'apparition d'un premier répertoire de gestes communicatifs dérivé en partie des activités ingestives. MacNeilage, P.F. (1998). *op. cit.* Cette théorie s'oppose à celle de Rizzolatti et Arbib postulant l'existence d'un répertoire de protosignes composé de gestes manuels à l'origine du développement du langage parlé. Rizzolatti, G. & Arbib, M.A. (1998). Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*, 21: 188-194 ; Arbib, M.A. (2004). From monkey-like action recognition to human language: An evolutionary framework for neurolinguistics. *Behavioral and Brain Sciences, to appear*. Pour une revue des débats sur l'évolution du langage, Christiansen, M.H. & Kirby, S. (2003). Language evolution: Consensus and controversies. *Trends in Cognitive Sciences*, 7: 300-307. Pour une étude récente des mécanismes d'empathie montrant notamment l'activation du cortex frontal inférieur et du gyrus temporal supérieur lors de la reconnaissance et de l'imitation d'expressions faciales émotionnelles chez l'homme : Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J.C. & Lenzi, L.G. (2003). *op. cit.*

³¹¹ Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science*, 297: 846-848.

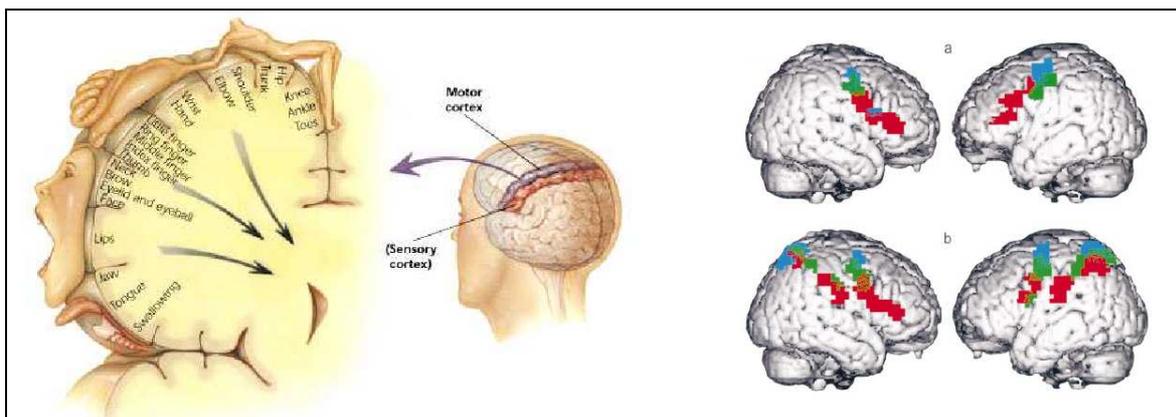
³¹² Keysers, C., Kohler, E., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (2003). Audiovisual mirror neurons and action recognition. *Exp. Brain Res.*, 153: 628-636.

³¹³ Cette capacité des neurones miroirs a aussi été testée par Umiltà *et al.* Les chercheurs ont ainsi observé que certains neurones miroirs étaient activés aussi bien lors la perception visuelle d'une action transitive dirigée vers un objet que lors de la perception de la même action une fois l'objet retiré de la vue du singe lors de la partie finale du mouvement. Umiltà, M.A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C. & Rizzolatti, G. (2001). I know what you are doing. *Neuron*, 31: 155-165.

Concernant l'architecture neurale d'un tel système, l'existence de neurones miroirs a également été observée dans le lobule pariétal inférieur du singe (aire 7b ou PF)³¹⁴. Comme décrit précédemment, cette région est fortement connectée avec le cortex prémoteur ventral, incluant l'aire F5, et reçoit des projections du gyrus temporal supérieur (notamment l'aire Tpt). Les neurones de cette aire présentent des propriétés fonctionnelles hétérogènes : si la presque totalité de ces neurones sont activés en fonction de stimuli sensoriels (i.e., visuels, somatosensoriel, bimodal), la moitié est aussi activée lors de l'exécution d'une action. Il a enfin été montré que les deux tiers de ces neurones visuomoteurs présentaient toutes les caractéristiques des neurones miroirs. Des neurones répondant spécifiquement aux actions perçues (transitives ou non), mais ne possédant pas de propriétés motrices, sont aussi présents dans la région dorsale du sillon temporal supérieur, une région étroitement liée à la perception des mouvements biologiques. Un point capital est donc que ce circuit temporo-pariéto-frontal est très proche du système de mémoire de travail présent chez le singe, décrit par Aboitiz et Garcia, et chez l'homme (une fois pris en compte les homologues possibles de ces régions), un résultat renforçant notre conception du rôle possible de cette mémoire dans le traitement et mise en relation des représentations acoustiques et motrices.

Les résultats de nombreuses études utilisant les techniques d'imagerie fonctionnelle, de stimulation magnétique transcraniale et d'électro-magnétoencéphalographie ont apporté de solides preuves en faveur de l'existence d'un tel système de reconnaissance des actions chez l'homme³¹⁵. Les activations observées lors de l'observation d'actions transitives, mettant en relation un effecteur biologique et un objet, montrent l'engagement d'un réseau neural d'aires distribuées constitué des aires visuelles des cortex occipital, pariétal et temporal mais aussi de la partie antérieure du lobule pariétal inférieur, dans les gyri supramarginal et angulaire, et de la partie ventrale du cortex prémoteur, incluant la partie operculaire du gyrus frontal (i.e., l'aire de Broca) et une région ventrale du gyrus précentral. Ces dernières régions, frontale et pariétale, présentant des propriétés fonctionnelles motrices, ont donc été désignées comme représentant le cœur du système de neurones miroirs chez l'homme.

Figure 24 : Gauche : Somatotopie des cortex moteur et somatosensoriel. D'après Penfield & Rasmussen (1952). Droite : Activations des cortex prémoteur et pariétal lors de l'observation d'actions transitives (a) et intransitives (b) - Rouge : Mouvement de la bouche, Vert : Mouvement de la main, Bleu : Mouvement du pied. Repris de Buccino *et al.* (2001)



Un résultat important est celui de l'observation de différences de localisation spatiale des activations dans ces régions en fonction de l'effecteur impliqué, suggérant l'existence de représentations internes motrices propres au type des mouvements perçus. En comparant les réponses obtenues lors de l'observation d'actions transitives et intransitives (pantomimes) liées au pied, à la main/au bras et à la bouche (comme taper dans un ballon, attraper un ballon, mordre dans

³¹⁴ Fogassi, L., Gallese, V., Fadiga, L. & Rizzolatti, G. (1998). Neurons responding to the sight of goal directed hand/arm actions in the parietal area PF (7b) of the macaque monkey. *Soc. Neurosci.*, 25: 257.

³¹⁵ Pour une revue récente, Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). *op. cit.*

un pomme ou mimer ces actions), Buccino et ses collègues ont ainsi montré une somatotopisation du cortex prémoteur et du lobule pariétal inférieur conforme à celle depuis longtemps observée dans les cortex moteur et somatosensoriel³¹⁶ (voir la Figure 24). Il est à noter que l'observation des actions intransitives (i.e., sans la présence de l'objet) entraîne également l'activation des mêmes régions du cortex prémoteur. Face à l'absence de réponses des neurones miroirs à ce type d'actions chez le singe (excepté pour les actions orofaciales communicatives), ce résultat semble donc indiquer une évolution/sophistication des mécanismes de reconnaissance et compréhension gestuelle, probablement reliée au développement des capacités d'apprentissage et d'imitation chez l'homme³¹⁷.

Un dernier résultat majeur dans l'étude de ce système de perception active des gestes orofaciaux est celui de l'excitabilité du cortex moteur primaire, soit un phénomène de "résonance" motrice, lors de la perception uniquement auditive de séquences langagières. En utilisant la technique de stimulation transcraniale magnétique³¹⁸ appliquée au cortex moteur primaire de l'hémisphère gauche, Fadiga et ses collègues ont enregistré chez des sujets italiens les potentiels évoqués moteurs des muscles de la langue lors de l'écoute attentive de liste de mots et de pseudo-mots, contenant soit une consonne double fricative labio-dentale (i.e., [f] comme dans /baffo/) soit une consonne double fricative linguo-palatale (i.e., [r] comme dans /birra/) et lors de l'écoute de matériel non-verbal (sons bi-tonaux)³¹⁹. Les résultats ont montré une amplitude accrue des potentiels évoqués moteurs de la langue lors de l'écoute des mots et pseudo-mots contenant la consonne double fricative linguo-palatale et dont la production articuloire est donc fortement dépendante de ce muscle par rapport aux autres stimuli. Des résultats similaires ont été rapportés lors de l'enregistrement des muscles des lèvres inférieure et supérieure, montrant lors de la perception visuelle (lecture labiale) ou auditive de syllabes une amplitude plus forte de ces muscles par rapport à la perception ou la vision de stimuli non-verbaux³²⁰. Combinés aux études d'imagerie fonctionnelle ayant montré lors de tâches méta-linguistiques ou lors de la perception audio et/ou visuelle de séquences langagières l'activation d'un réseau fronto-temporo-pariétal, incluant le gyrus frontal inférieur, le gyrus supramarginal et le gyrus temporal supérieur de l'hémisphère gauche, ces résultats suggèrent donc l'implication de représentations motrices articuloires dans les mécanismes de perception et compréhension du langage.

En conclusion, ces études convergent vers l'idée d'un système de reconnaissance et de compréhension gestuelle ayant contribué, par la mise en relation des représentations motrices,

³¹⁶ Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G. & Freund H.-J. (2001). *op. cit.*

³¹⁷ Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). *op. cit.* ; Arbib, M.A. (2004). *op. cit.* Dans ce cadre, un résultat intéressant provient de l'observation de l'activation du gyrus frontal inférieur gauche chez l'homme lors de la perception visuelle de l'action de mordre, qu'elle soit réalisée par un homme, par un chien ou par un singe. En revanche, l'observation d'actions orofaciales communicatives (respectivement, lecture labiale, aboiement et *lip smacking*) n'a entraîné l'activation de cette même région que lors de la lecture labiale. Ces différences d'activations liées aux actions orofaciales humaines/non-humaines et communicatives/non-communicatives suggèrent une spécificité de traitement des représentations internes des actions communicatives chez l'homme propre à son espèce. Buccino, G., Lui, F., Canessa, N., Patteri, I., Lagravinese, G., Benuzzi, F., Porro, C.A. & Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits involved in the recognition of actions performed by non-conspecifics: An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16: 114-126.

³¹⁸ Cette technique non-invasive de stimulation électrique du système nerveux, lorsqu'elle est appliquée au système moteur à une intensité appropriée, permet de définir un niveau de référence lors de l'enregistrement des potentiels évoqués moteurs des muscles controlatéraux de la zone stimulée. Les différences d'amplitude des potentiels évoqués moteurs en fonction du contexte expérimental par rapport à ce niveau de référence permettent alors de déterminer le degré d'implication du cortex moteur dans la réalisation de la tâche à effectuer. Selon la durée de stimulation, le nombre et l'intensité des décharges, cette technique permet également d'inhiber les régions cérébrales, créant ainsi une sorte de lésion virtuelle, et constitue donc un outil précieux dans le domaine des neurosciences. Pour une revue de cette technique, Walsh, V. & Cowey, A. (2000). Transcranial magnetic stimulation and cognitive neuroscience. *Nature Review Neuroscience*, 1: 73-79 ; Anand, S. & Hotson, J. (2002). Transcranial magnetic stimulation: Neurophysiological applications and safety. *Brain and Cognition*, 50: 366-386 ; Sack, A.T. & Linden, D.E.J. (2003). Combining transcranial magnetic stimulation and functional imaging in cognitive brain research: Possibilities and limitations. *Brain Research Reviews*, 43: 41-56.

³¹⁹ Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G. & Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: A TMS study. *European Journal of Neuroscience*, 15: 399-402.

³²⁰ Watkins, K.E., Strafelle, A.P. & Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, 41(3): 989-994.

visuelles et acoustiques, à la formation de concepts élaborés du monde environnant, précurseurs du système linguistique. La maturation du système cérébral, et notamment l'établissement et le développement progressif de connexions neurales entre les régions sensorielles et motrices, auraient permis une sophistication accrue de ces mécanismes de compréhension de l'action, jusqu'à l'émergence d'un système de mémoire de travail verbal chez l'homme adapté à la comparaison et l'évaluation des unités langagières. Ainsi, que ce soit dans le contrôle exécutif, la simulation mentale ou encore la perception des gestes de parole, ces représentations d'actions partagées pourraient bien être au cœur de la communication parlée.

Bibliographie

- Aboitiz, F. & Garcia, V. (1997). The evolutionary origin of the language areas in the human brain. A neuroanatomical perspective. *Brain Research Reviews*, 25: 381-396.
- Abry, C. & Schwartz, J.-L. (1997). La Parole Cognitive. In: Gordon, M.B. & Paugam-Moisy, H. (Eds.), *Sciences Cognitives, Diversité des Approches*, Paris, Hermès, pp.103-114.
- Abry, C. (1997). *De la Parole Articulatoire à la Parole Narrative*. Thèse non publiée de Doctorat d'Etat. Université Stendhal, Grenoble III.
- Abry, C., Laboissière, R. & Schwartz, J.-L. (1998). A new puzzle for the evolution of speech? *Behavioral and Brain Sciences*, 21: 512-513
- Abry, C. (2002). La théorie motrice de la perception de la parole: Avancées récentes vers une somatotopisation de la perception active des unités de la parole. *Actes du colloque international ACFOS IV*, Paris, pp. 94-97.
- Abry, C., Stefanuto, M., Vilain, A. & Laboissière, R. (2002). What can the utterance "tan-tan" of Broca's patient Leborgne tell us about the hypothesis of an emergent "babble-syllable" downloaded by SMA? In: Durand, J., Lacks, B. (Eds.), *Phonology: From Phonetics to Cognition*. Oxford University Press, Oxford, pp. 226-243.
- Ackermann, H. & Riecker, A. (2004). The contribution of the insula to motor aspects of speech production: a review and a hypothesis. *Brain and Language*, 89(2): 320-328.
- Aleman, A., Formisano, E., Koppenhagen, H., Hagoort, P., de Haan, E.H.F. & Kahn R.S. (2004). The functional neuroanatomy of metrical stress evaluation of perceived and imagined spoken words. *Cerebral Cortex*, to appear.
- Anand, S. & Hotson, J. (2002). Transcranial magnetic stimulation: Neurophysiological applications and safety. *Brain and Cognition*, 50: 366-386.
- Arbib, M.A. (2004). From monkey-like action recognition to human language: An evolutionary framework for neurolinguistics. *Behavioral and Brain Sciences*, to appear.
- Ashburner, J. & Friston, K.J. (1997). Spatial transformation of images. In: Frackowiak, R.S.J., Friston, K.J., Frith, C.D., Dolan, R.J. & Mazziotta, J.C. (Editors), *Human Brain Function*, Academic Press, pp. 43-58.
- Atkinson R.C. & Shiffrin R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In: Spence, K.W. (Editor), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. New York, Academic Press, Vol. 2, pp. 89-115.
- Baciu, M., Abry, C. & Segebarth, C. (2000). Equivalence motrice et dominance hémisphérique : Le cas de la voyelle [u]. In *Actes des XVIIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, Aussois, pp. 213-216.
- Baddeley, A.D. (1966). Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic and formal similarity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18: 362-365.
- Baddeley, A.D. & Hitch, G.J. (1974). Working memory. In: Bower, G. A. (Editor), *Recent advances in learning and motivation*. New York, Academic Press, Vol. 8, pp. 47-90.
- Baddeley, A.D., Thomson, N. & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14: 575-589.
- Baddeley, A.D., Lewis, V.J. & Vallar, G. (1984). Exploring the articulatory loop. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 36: 233-252.
- Baddeley, A.D. & Wilson, B. (1985). Phonological coding and short-term memory in patients without speech. *Journal of Memory and Language*, 24: 490-502.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working Memory*. Oxford, Clarendon Press.

- Baddeley, A.D., Papagno, C. & Vallar, G. (1988). When long-term learning depends on short-term storage. *Journal of Memory and Language*, 27: 586-595.
- Baddeley, A.D. (1990). *La Mémoire Humaine. Théorie et Pratique*. Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble.
- Baddeley, A. D. (1992). Working Memory. *Science*, 255: 556-559.
- Baddeley, A.D. & Logie, R. (1992). Auditory imagery and working memory. In: Reisberg, D. (Editor), *Auditory Imagery*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, pp. 179-197.
- Baddeley, A.D. (1998). Working memory. *Life Sciences*, 321: 167-173.
- Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105: 158-173.
- Baddeley, A.D. (2001). Is working memory still working. *American Psychologist*, 56: 849-864.
- Baddeley, A.D. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature reviews Neuroscience*, 4: 829-839.
- Barch, D.M. Sabb, F.W., Carter, C.S., Braver, T.S., Noll, D.C. & Cohen, J.D. (1999). Overt verbal responding during fMRI scanning: Empirical investigations of problems and potential solutions. *NeuroImage*, 10: 642-657.
- Barch, D.M., Braver, T.S., Sabb, F.W. & Noll, D.C. (2000). Anterior cingulate and the monitoring of response conflict: Evidence from an fMRI study of verb generation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(2): 298-309.
- Bengston, J.D. & Ruhlen, M. (1994). Global etymologies. In: Ruhlen, M. (Editor), *On the Origin of Language*. Stanford, Stanford University Press.
- Bergounioux, G. (2001). La parole intérieure. *Langue Française*, 132.
- Bergson, H. (1896). *Matière et mémoire. Essai sur la relation du corps à l'esprit*. Paris, Presses Universitaires de France, 7^{ème} Edition.
- Berthoz, A. (1996). *Le Sens du Mouvement*. Paris, Odile Jacob.
- Berthoz, A. (2003). *La Décision*. Paris, Odile Jacob.
- Binet, A. (1886). *La psychologie du raisonnement. Recherches expérimentales par l'hypnotisme*. Paris, Alcan.
- Binder, J.R., Liebenthal, E., Possing, E.T., Medler, D.A. & Douglas Ward, B. (2004). Neural correlates of sensory and decision processes in auditory object identification. *Nature Neuroscience*, 7(3): 295-301.
- Bischoff-Grethe, A., Ivry, R.B. & Grafton, S. (2002). Cerebellar involvement in response reassignment rather than attention. *The Journal of Neuroscience*, 22(2): 546-553.
- Bishop, D.V.M. & Robson, J. (1989). Unimpaired short-term memory and rhyme judgment in congenitally speechless individuals: Implications for the notion of "articulatory coding". *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A: 123-140.
- Bishop, D.V.M., Byers-Brown, B. & Robson, J. (1990). The relationship between phoneme discrimination, speech production, and language comprehension in cerebral-palsied individuals. *Journal of Speech and Hearing Research*, 33: 210-219.
- Blakemore, S.J., Wolpert, D.M. & Frith, C.D. (1998). Central cancellation of self produced tickle sensation. *Nature Neurosciences*, 1: 635-640.
- Blakemore, S.-J. & Frith C.D. (2003). Self-awareness and action. *Current Opinion in Neurobiology*, 13: 219-224.
- Blank, S.C., Scott, S.K., Murphy, K., Warburton, E. & Wise, R.J.S. (2002). Speech production: Wernicke, broca and beyond. *Brain*, 125: 1829-1838.
- Boë, L.-J. & Liénard, J.S. (1988). La communication parlée est-elle une science ? Eléments de discussion et de réflexion suivis de repères chronologiques. *Actes des XVIIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, Nancy, pp. 79-92.
- Boë, L.-J. (1997a). Sciences phonétiques et relations forme/substance : 1. Un siècle de ruptures, négociations et réorganisations. *Histoire Epistémologie Langage*, XIX, 1: 5-41.
- Boë, L.-J. (1997b). Sciences phonétiques et relations forme/substance : 2. Du poids de la substance sur la forme aux réarticulations scientifiques. *Histoire Epistémologie Langage*, XIX, 2: 5-25.

- Boë, L.-J. (1998). Les tendances des structures phonologiques: Le poids de la forme sur la substance. Typologies, modélisation et ontogenèse. In: Escudier, P., Feng, G., Perrier, P. & Schwartz, J.-L. (1998). *La Parole, des Modèles cognitifs aux Machines Communicantes*. Ecole des Techniques Avancées Signal, Image, Parole.
- Bookheimer, S.Y., Zeffiro, T.A., Blaxton, T., Gaillard, W.D. & Theodore, W.H. (2000). Activation of language cortex with automatic speech tasks. *Neurology*, 55: 1151-1157.
- Brett, M., Johnsrude, I.S. & Owen, A.M. (2002). The problem of localization in the human brain. *Nature Neuroscience*, 3: 243-249.
- Browman, C.P. & Goldstein, L. (1989). Articulatory gestures as phonological units. *Phonology*, 6: 201-251.
- Browman, C.P. & Goldstein, L. (2000). Competing constraints on intergestural coordination and self-organization of phonological structures. *Bulletin de la Communication Parlée*, 5: 25-34.
- Brown, J. (1958). Some tests of the decay theory of immediate memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 10: 12-21.
- Brown, G.D.A. & Hulme, C. (1995). Modelling item length effects in memory span: No rehearsal needed? *Journal of Memory and Language*, 34: 594-621.
- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G. & Freund H.-J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, 13: 400-404.
- Buccino, G., Lui, F., Canessa, N., Patteri, I., Lagravinese, G., Benuzzi, F., Porro, C.A. & Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits involved in the recognition of actions performed by non-conspecifics: An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16: 114-126.
- Bullmore, E., Horwitz, B., Honey, G. & Sharma, T. (1999). A causal network model for the articulatory loop. *NeuroImage '99*: Poster 1010.
- Calvert, G.A. & Campbell, R. (2003). Reading speech from still and moving faces: The neural substrates of visible speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(1): 57-70.
- Campbell, R. & Dodd, B. (1982). Some suffix effects on lipread lists. *Canadian Journal of Psychology*, 36: 508-514.
- Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J.C. & Lenzi, G.L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: A relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 100(9): 5497-5502.
- Carter, C.S., Braver, T.S., Bach, D.M., Botvinick, M.M., Noll, D. & Cohen J.D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280: 747-749.
- Cavalli-Sforza, L. (1996). *Gènes, Peuples et Langues*. Paris, Editions Odile Jacob.
- Chambers, D. & Reisberg, D. (1985). Can mental images be ambiguous? *Journal of Experimental Psychology: General*, 11: 317-328.
- Changeux, J.P. (2002). *L'Homme de Vérité*. Paris, Odile Jacob.
- Chein, J.M., Ravizza, S.M. & Fiez, J.A. (2003). Using neuroimaging to evaluate models of working memory and their implication for language processing. *Journal of Neurolinguistics*, 16: 315-339.
- Chomsky, N. & Halle, M. (1968). *The Sound Pattern of English*. New York, Harper & Row.
- Christiansen, M.H. & Kirby, S. (2003). Language evolution: Consensus and controversies. *Trends in Cognitive Sciences*, 7: 300-307.
- Clements, G.N. (1990). The role of the sonority cycle in core syllabification. In: M.E. Beckman & J. Kingston (Eds), *Papers in Laboratory Phonology I: Between the grammar and the physics of speech*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 283-333.
- Cohen, J.D., MacWhinney, B., Flatt, M.R. & Provost, J. (1993). PsyScope: A new graphic interactive environment for designing psychology experiments. *Behav. Res. Methods Instruments Comput.*, 25(2): 257-271.
- Cohen, J.D., Perlstein, W.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Noll, D.C., Jonides, J. & Smith, E.E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386: 604-608.
- Colle, H.A. & Welsh, A. (1976). Acoustic masking in primary memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 15: 17-32.

- Comblain, A. (1999). Mémoire de travail et langage. In: Rondal, J.A. & Séron, X. (Editors), *Troubles du Langage : Bases Théoriques, Diagnostic et Rééducation*, Mardaga, pp. 312-347.
- Conrad, R. (1964). Acoustic confusion in immediate memory. *British Journal of Psychology*, 55: 75-84.
- Conrad, R. & Hull, A.J. (1964). Information, acoustic confusion and memory span. *British Journal of Psychology*, 55: 429-432.
- Content, A., Kearns, K.R. & Frauenfelder, U.H. (2001). Boundaries versus onsets in syllabic segmentation. *Journal of Memory and Language*, 45: 177-199.
- Cowan, N., Day, L., Saults, J.S., Keller, T.A., Johnson, T. & Flores, L. (1992). The role of verbal output time in the effects of word length on immediate memory. *Journal of Memory and Language*, 31: 1-17.
- Callan, D.E., Jones, J.A., Munhall, K., Callan, A.M., Kroos, C. & Vatiokis-Bateson, E. (2003). Neural processes underlying perceptual enhancement by visual speech gestures. *Neuroreport*, 14(17): 2213-2218
- Craik, F.I.M. & Lockhart, R.S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11: 671-684.
- Crowder R.G. & Morton, J. (1969). Precategorical acoustical storage (PAS). *Perception & Psychophysics*, 50: 291-323.
- Cubelli, R. & Nichelli, P. (1992). Inner speech in anarthria: Neuropsychological evidence of differential effects of cerebral lesions on subvocal articulation. *Journal of Clinical & Experimental Neuropsychology*, 14: 499-517.
- Darwin, C. (1872). *L'Expression des Emotions chez l'Homme et les Animaux*. Paris, Rivages.
- Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (1995). The articulatory basis of babbling. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38: 1199-1211.
- Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (2003). Universal intrasyllabic patterns in early acquisition. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, Barcelona, pp. 387-390.
- Davis, B.L. & MacNeilage, P.F. (2004). The frame/content theory of speech evolution: From lip smacks to syllables. *Primate, to appear*.
- de Boysson-Bardies, B. (1996). *Comment la Parole Vient aux Enfants*. Paris, Editions Odile Jacob.
- de Gelder, B. & Vroomen, J. (1992). Abstract versus modality-specific memory representations in processing auditory and visual speech. *Memory and Cognition*, 20: 533-538.
- de Jong, K.J. (2001). Rate-induced resyllabification revisited. *Language and Speech*, 44: 197-216.
- de Jong, K.J., Nagao, K. & Lim, B.M. (2002). The interaction of syllabification and voicing perception in american english. *ZAS Papers in Linguistics*, 28: 27-38.
- de Schonen, S. & Livet, M.-O. (1999). Neurosciences du développement cognitif. In: Rondal, J.A. & Esperet, E. (Eds.), *Manuel de Psychologie de l'Enfant*, Liège, Mardaga, pp. 101-153.
- Démonet, J.-F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J.L., Wise, R., Rascol, A. & Frackowiak, R.S.J. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115: 1753-1768.
- Démonet, J.-F., Wise, R. & Frackowiak, R.S.J. (1993). Language functions explored in normal subjects by positron emission tomography: A critical review. *Human Brain Mapping*, 1: 39-47.
- Démonet, J.-F., Price, C., Wise, R. & Frackowiak, R.S.J. (1994). A pet study of cognitive strategies in normal subjects during language tasks: Influence on phonetic ambiguity and sequence processing on phoneme monitoring. *Brain*, 117(pt4): 671-682.
- Démonet, J.-F., Fiez, J.A., Paulesu, E., Petersen, S.E. & Zatorre, R.J. (1996). PET studies of phonological processing. A critical reply to Poeppel. *Brain and Language*, 55: 352-379.
- Démonet, J.-F. (2000). Imageries fonctionnelles cérébrales : Vers une physiologie de la cognition humaine. *In Actes des XXIIIèmes Journées d'Etudes sur la Parole*, Aussois, pp. 39-48.
- Démonet, J.-F. & Thierry, G. (2001). Language and Brain: What is up? What is coming up? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 23: 49-73.
- Desmond J.E., Gabrieli, J.D.E., Wagner, A., Ginier, B.L. & Glover, G.H. (1997). Lobular patterns of cerebellar activation in verbal working memory and finger-tapping tasks as revealed by functional mri. *The Journal of Neuroscience*, 17: 9675-9685.
- Desmurget, M., Pélisson, D., Rossetti, Y. & Prablanc, C. (1998). From eye to hand: Planning goal-directed movements. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22(6): 761-788.

- Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: A neurophysiological study. *Exp. Brain Res.*, 91: 176-180.
- Ditzinger, T., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1997). Temporal patterning in an auditory illusion: The verbal transformation effect. *Biological Cybernetics*, 77: 23-30.
- Ditzinger, T., Tuller, B., Haken, H. & Kelso, J.A.S. (1997). A synergetic model for the verbal transformation effect. *Biological Cybernetics*, 77: 31-40.
- Dogil, G., Ackermann, H., Grodd, W., Haider, H., Kamp, H., Mayer, J., Riecker, A. & Wildgruber, D. (2002). The speaking brain: A tutorial introduction to fMRI experiments in the production of speech, prosody and syntax. *Journal of Neurolinguistics*, 15: 59-90.
- Dronkers, N.F. (1996). A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature*, 384: 159-161.
- Dronkers, N.F., Redfern, B.B. & Knight, R.T. (2000). The neural architecture of language disorders. In: Gazzaniga, M.S. (Editor), *The New Cognitive Neurosciences*. MIT Press, Cambridge, pp. 949-958.
- Dronkers, N.F. & Baldo J.V. (2001). Neural basis of speech production In: *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*. Elsevier, pp. 1875-14879.
- Dubois, B., Pillon, B. & Deweer, B. (2000). Troubles cognitifs et comportementaux après lésion des noyaux gris centraux. In: Lechevallier *et al.* (Editors), *Traité de Neuropsychologie Clinique*. De Boeck, pp. 1-21.
- Duchet, J.-L. (1981). *La Phonologie*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Dufour, S., Peereman, R., Pallier, C. & Radeau, M. (2002). VoCoLex: A lexical database on phonological similarity between French words. *L'Année Psychologique*, 102: 725-746.
- Dufour, S. & Peereman, R. (2003). Inhibitory priming effects in auditory word recognition: When the target's competitors conflict with the prime word. *Cognition*, 88: B33-B44.
- Dumay, N., Frauenfelder, U.H. & Content, A. (2002). The role of the syllable in lexical segmentation in French: Word-spotting data. *Brain and Language*, 81: 144-161.
- Edmonson, J.R., Hutchinson, J.M. & Nerbonne, M.A. (1981). Verbal transformation patterns in children with articulation defects. *Journal of Auditory Research*, 21(2): 85-92.
- Ehrsson, H.E., Geyer, S. & Naito, E. (2003). Imagery of voluntary movements of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representation. *Journal of Neurophysiology*, 90: 3304-3316.
- Ellis, N.C. & Hennesly, R.A. (1980). A bilingual word-length effect: implications for intelligence testing and the relative ease of mental calculation in Welsh and English. *British Journal of Psychology*, 71: 43-52.
- Eustache, F. & Faure, S. (1996). *Manuel de neuropsychologie*. Paris, Dunod.
- Evans, A.C., Kamber, M., Collins, D.L. & MacDonald, D. (1994). An MRI-based probabilistic atlas of neuroanatomy. In: Shorvon, S., Fish, D., Andermann, F., Bydder, G.M. & Stefan, H. (Editors), *Magnetic Resonance Scanning and Epilepsy*, NATO, ASI Series, Life Sciences, 264: 263-274.
- Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G. & Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: A TMS study. *European Journal of Neuroscience*, 15: 399-402.
- Ferrari, P. F., Gallese, V., Rizzolatti, G. & Fogassi, L. (2003). Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *European Journal of Neuroscience*, 17: 1703-1714.
- Fiez, J., Balota, D.A., Raichle, M.E. & Petersen, S.E. (1999). Effects of lexicality, frequency, and spelling to sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron*, 24: 205-218.
- Floccia, C. & Goslin, J. (2003). Où sont les frontières syllabiques en français? Le cas des clusters intervocaliques: Perspective développementale. *Journées d'Etudes Linguistiques du CIRLEP, Université de Reims*.
- Fogassi, L., Gallese, V., Fadiga, L. & Rizzolatti, G. (1998). Neurons responding to the sight of goal directed hand/arm actions in the parietal area PF (7b) of the macaque monkey. *Soc. Neurosci.*, 25: 257.
- Frackowiak, R.S.J. Frackowiak, R.S.J., Friston, K.J., Frith, C.D., Dolan, R.J. & Mazziotta, J.C. (1997). *Human Brain Function*, Academic Press.
- Freud, S. (1930). *Le mot d'esprit et ses rapports avec l'inconscient*. Paris, Gallimard.
- Friston, K.J., Ashburner, J., Frith, C.D., Poline, J.-B., Heather, J.D. & Frackowiak, R.S.J. (1995). Spatial registration and normalization of images. *Human Brain Mapping*, 2: 165-189.

- Friston, K.J., Holmes, A.P., Worsley, K.J., Poline J.-B., Frith, C.D., Frackowiak, R.S.J. (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2: 189-210.
- Friston, K.J., Holmes, A.P. & Worsley, K.J. (1999). How many subjects constitute a study? *NeuroImage*, 10(1): 1-5.
- Frith, C.D. (1992). *The Cognitive Neuropsychology of Schizophrenia*. Hillsdale NJ: Erlbaum.
- Fujimaki, N., Nielsen, M., Hayakawa, T., Kato, M. & Miyachi, S. (1999). Neural activity dependent on phonological demands in a verbal working memory task. *NeuroImage '99*: Poster 919.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L. & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119: 593-609.
- Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1990). The role of phonological memory in vocabulary acquisition: A study of young children learning new names. *British Journal of Psychology*, 81: 439-454.
- Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1993). *Working Memory and Language*. Hove, Lawrence Erlbaum.
- Gathercole, S.E. (1994). Neuropsychology and working memory: A review. *Neuropsychologia*, 8: 494-505.
- Gathercole, S.E. (1995). Is nonword repetition a test of phonological memory or long-term knowledge? It all depends on the nonwords. *Memory & Cognition*, 23: 83-94.
- Gathercole S.E. (1997). Models of verbal short-term memory. In: Conway, M.A. (Editor), *Cognitive Models of Memory*. Psychology Press, pp. 13-45.
- Gathercole, S.E. & Martin, A. (1996). Interactive processes in phonological memory. In: Gathercole, S.E. (Editor), *Models of Short-Term Memory*. Hove, U.K.: Psychology Press, pp. 73-100.
- Georgieff, N. (2000). Neuropsychopathologie cognitive sociale de l'action : Apport à l'étude des symptômes positifs de la schizophrénie. *Intellectica*, 2(31): 191-225.
- Glanzer, M. & Cunitz, A.R. (1966). Two storage mechanisms in free recall. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, 5: 351-360.
- Glanzer, M. (1972). Storage mechanisms in free recall. In: Bower, G. A. (Editor), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. New York, Academic Press, Vol. 5.
- Gleason, P., Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1996). Syllable affiliation of consonant clusters undergoes a phase transition over speaking rates. *Proceedings of the 4th International Conference on Spoken Language Processing*, Philadelphia, Vol. 1, pp. 276-278.
- Gomez, C., Argandona, E.D., Solier, R.G., Angulo, J.C. & Vazquez, M. (1995). Timing and competition in networks representing ambiguous figures. *Brain and Cognition*, 29: 103-114.
- Goslin, J. & Frauenfelder, U.H. (2000). A comparison of theoretical and human syllabification. *Language and Speech*, 44(4): 409-436.
- Grèzes, J. & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, 12: 1-19.
- Grèzes, J., Armony, J.L., Rowe, J. & Passingham, R.E. (2003). Activations related to "mirror" and "canonical" neurones in the human brain: An fMRI study. *NeuroImage*, 18: 928-937.
- Gupta, P. & MacWhinney, B. (1995). Is the articulatory loop articulatory or auditory? Reexamining the effects of concurrent articulation on immediate serial recall. *Journal of Memory and Language*, 34: 63-88.
- Habib, M. & Galaburda, A.M. (1994). Fondements neuroanatomiques et neurobiologiques du langage. In: Seron, X. & Jeannerod, M. (Editors), *Neuropsychologie Humaine*, Liège, Mardaga, pp. 320-335.
- Hagège, C. (1982). *La Structure des Langues*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Haken, H., Kelso, J.A.S. & Bunzt, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51: 347-356.
- Hauser, M.D., Chomsky, N. & Fitch, W.T. (2002). The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve? *Science*, 298: 1569-1579.
- Hebb, D.O. (1949). *The Organization of Behavior*. New York, Wiley.
- Henson, R.N.A., Burgess, N. & Frith, C.D. (2000). Recoding, storage, rehearsal and grouping in verbal short-term memory: An fmri study. *Neuropsychologia*, 38: 426-440.
- Hickok, G. & Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in Cognitive Science*, 4(4): 131-138.

- Hickok, G. (2001). Functional anatomy of speech perception and speech production: Psycholinguistic implications. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(3): 225-235.
- Hickok, G. & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92: 67-99.
- Holmes, A.P., Friston, K.J. (1998). Generalisability, random effects and population inference. *NeuroImage*, 7: S754.
- Honey, G.D., Bullmore, E. & Sharma, T. (2000). Prolonged reaction time to a verbal working memory task predicts increased power of posterior parietal cortical activation. *NeuroImage*, 12: 495-503.
- Honey, G.D., Fu, C.H.Y., Kim, J., Brammer, M.J., Croudace, T.J., Suckling, J., Pich, E.M., Williams, S.C.R. & Bullmore, E. (2002). Effects of verbal working memory load on corticocortical connectivity modeled by path analysis of functional magnetic resonance imaging data. *NeuroImage*, 17: 573-582.
- Hooper, J.B. (1972). The syllable in phonological theory. *Language*, 48: 525-540.
- Huang, J., Carr, T.H. & Cao, Y. (2001). Comparing cortical activations for silent and overt speech using event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, 15: 39-53.
- Indefrey, P. & Levelt, W.J.M (2004). The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition*, 92: 101-144.
- Jacobs, J. (1887). Experiments on 'prehension'. *Mind*, 12: 75-79.
- Jakobson, R., Fant, C.G.M. & Halle, M. (1952). *Preliminaries to Speech Analysis*. Cambridge, MIT Press.
- Jakobson, R. (1966). Implications of language universals for linguistics. In: J.H. Greenberg (Editor), *Universal of language*, MIT Press, Cambridge, pp. 263-278.
- Jakobson, R. (1969). *Langage Enfantin et Aphasie*. Paris, Editions de Minuit.
- Jakobson R. & Waugh, L. (1980). *La Charpente Phonique du Langage*. Paris, Les Editions de Minuit.
- Jackson P.L. & Decety, J. (2004). Motor cognition: A new paradigm to study self-other interactions. *Current Opinion in Neurobiology*, 14: 259-263.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain. Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17: 187-245.
- Jeannerod, M. & Frack, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 9: 735-739.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition, *NeuroImage*, 14: S103-S109.
- Jeannerod, M. (2002). *La nature de l'esprit*. Paris, Odile Jacob.
- Jeannerod, M. (2003). The mechanism of self-recognition in humans. *Behavioural Brain Research*, 142: 1-15.
- Jones, D. (1993). Objects, streams and threads of auditory attention. In: Baddeley, A.D. & Weiskrantz, L. (Editors), *Attention, Selection, Awareness and Control*. Oxford, Oxford University Press, pp. 87-104.
- Jones, D.M. & Macken, W.J (1995). Phonological similarity in the irrelevant speech effect: Within- or between- stream similarity? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 21: 103-115.
- Jones, J.A. & Callan D.E. (2003). Brain activity during audiovisual speech perception: An fMRI study of the McGurk effect. *Neuroreport*, 14(8): 1129-1133.
- Jonides, J., Schumacher, E.H., Smith, E.E., Koeppe, R.A., Awh, E., Reuter-Lorentz, P.A., Marshuetz, C. & Willis, C.R. (1998). The role of parietal cortex in verbal working memory. *Journal of Neuroscience*, 18: 5026-5034.
- Kast, B. (2001). Decisions, decisions... *Nature*, 411: 471-488.
- Kaminska, Z., Pool, M. & Mayer, P. (2000). Verbal transformation: Habituation or spreading activation? *Brain and Language*, 71: 285-298.
- Kelso, J.A.S. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18: 63.
- Kenstowicz, M. (1994). *Phonology in Generative Grammar*. Blackwell, Oxford Press.
- Kent, D.R., Kent, F.J., Weismer, G. & Duffy, J.R. (2000). What dysarthria can tell us about the neural control of speech. *Journal of Phonetics*, 28: 273-302.

- Keysers, C., Kohler, E., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (2003). Audiovisual mirror neurons and action recognition. *Exp. Brain Res.*, 153: 628-636.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science*, 297: 846-848.
- Kosslyn, S.M., Ganis, G. & Thompson, W.L. (2003). Mental imagery: Against the nihilistic hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3): 109-111.
- Kuhl, P.K. & Meltzoff, A.N. (1996). Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100: 2425-2438.
- Lackner, J.R. (1974). Speech production: Evidence for corollary-discharge stabilization of perceptual mechanisms. *Perceptual and Motor Skills*, 39: 899-902.
- Lallouache, M.T. (1990). Un poste 'visage-parole'. Acquisition et traitement de contours labiaux. *Actes des XVIIIèmes Journées d'Études sur la Parole*, Montréal, pp. 282-286.
- Lancaster, J.L., Summerlin, J.L., Rainey, L., Freitas, C.S. & Fox, P.T. (1997). The talairach daemon, a database server for talairach atlas labels. *NeuroImage*, 5(4): S633.
- Landauer, T.K. (1962). Rate of implicit speech. *Perceptual and Motor Skills*, 15: 646.
- Larsen, B., Skinhoj, E. & Lassen, N.A. (1978). Variations in regional cortical blood flow in the normal human brain. *Neuroreport*, 10: 7765-7769.
- Leslie, K.R., Johnson-Frey, S.H. & Grafton, S.T. (2004). Functional imaging of face and hand imitation: Towards a motor theory of empathy. *NeuroImage*, 21: 601-607.
- Levelt, W.J.M. (1989). *Speaking: From Intention to Articulation*. MIT Press, Cambridge.
- Levelt, W.J.M., Roelofs, A. & Meyer, A.S. (1999). A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, 22: 1-38.
- Leybaert, J. & Lechat, J. (2001). Phonological similarity effects in memory for serial order of cued speech. *Journal of Speech, Language & Hearing Research*, 44(5): 949-63
- Liberman, A.M. & Mattingly, I.G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21: 1-36.
- Liberman, A.M. & Whalen, D.H. (2000). On the relation of speech to language. *Trends in Cognitive Science*, 3(7): 254-264.
- Liddle, P.F., Kiehl K.A. & Smith, A.M. (2001). Event-related fMRI study of response inhibition. *Human Brain Mapping*, 12: 100-109.
- Liljencrants, J. & Lindblom, B.E.F. (1972). Numerical simulation of vowel quality systems: The role of perceptual contrast. *Language*, 48: 839-862.
- Luce, P.A., Pisoni, D.B. & Goldinger, S.D. (1990). Similarity neighborhoods of spoken words. In: G.T.M. Altman (Editor), *Cognitive models of speech processing: Psycholinguistic and computational perspectives*. Cambridge, MIT Press, pp. 122-147.
- Luce, P.A. & Pisoni, D.B. (1998). Recognizing spoken words: The neighborhood activation model. *Ear and Hearing*, 19: 1-36.
- MacKay, D.G. (1982). The problems of flexibility, fluency, and speed-accuracy trade-off in skilled behavior. *Psychological Review*, 89: 483-527.
- MacKay, D.G., Wulf, G., Yin, C. & Abrams, L. (1993). Relations between word perception and production: New theory and data on the verbal transformation effect. *Journal of Memory and Language*, 32: 624-646.
- MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (1990). Acquisition of speech production: Frames, then content. In: Jeannerod, M. (Editor), *Attention and Performance, XIII. Motor Representation and Control*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, pp. 453-475.
- MacNeilage, P.F. (1998). The frame/content theory of evolution of speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, 21: 499-511.
- MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2000). Origin of the internal structure of words. *Science*, 288: 527-531.
- MacNeilage, P.F., Davis, B.L., Matyear, C.M. & Kinney, A. (2000). Origin of speech output complexity in infants and in languages. *Psychological Science*, 310(5): 459-460.
- MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2001). Motor mechanisms in speech ontogeny: Phylogenetic, neurobiological and linguistic implications. *Current Opinion in Neurobiology*, 11: 696-700.

- MacNeilage, P.F. & Davis, B.L. (2003). Intersyllabic and word-level regularities in early acquisition. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, Barcelona, pp. 383-386.
- Maddieson, I. (1984). *Patterns of Sounds*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Malmberg, B. (1963). *Structural Linguistics and Human Communication. An Introduction into the Mechanism of Language and the Methodology of Linguistics*. New York: Academic Press.
- Mathiak, K., Hertrich, I., Grodd, W. & Ackermann H. (2003). Cerebellum and speech perception: A functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(6): 902-912.
- Mazard, A., Mazoyer, B., Etard, O., Tzourio-Mazoyer, N., Kosslyn, S.M., & Mellet, E. (2002). Impact of fmri acoustic noise on the functional anatomy of visual mental imagery. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(2): 172-186.
- Mazoyer, B. (2002). L'imagerie cérébrale : IRM et TEP. *Pour la Science*, 302: 42-49.
- Mazoyer, B. (2002). L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. In: Houde, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (Editors), *Cerveau et Psychologie*, Paris, PUF, pp. 231-256.
- Mazoyer, B., Zago, L., Mellet, E., Bricogne, S., Etard, O., Houde, O., Crivello, F., Joliot, M., Petit, L. & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Cortical networks for working memory and executive functions sustain the conscious resting state in man. *Brain Research Bulletin*, 54(3): 287-298.
- McClelland, J.L. & Elman, J.L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, 18: 1-86.
- McGuire, P.K., Silbersweig, D.A., Murray, R.M., David, A.S., Frackowiak, R.S. & Frith C.D. (1996). Functional anatomy of inner speech and auditory verbal imagery. *Psychological Medicine*, 26(1): 29-38.
- Mehler, J. & Dupoux, E. (1990). *Naitre Humain*. Odile Jacob, Paris.
- Melton, A.W. (1963). Implications of short-term memory for a general theory of memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 2: 1-21.
- Meltzoff, A.N. & Moore, M.K. (1997). Explaining facial imitation: A theoretical Model. *Early Development and Parenting*, 6: 179-192.
- Meynadier, Y. (2001). La syllabe phonétique et phonologique : Une introduction. *Travaux Interdisciplinaires du Laboratoire Parole et Langage*, Vol. 20, 91-148.
- Miller, G.A. (1956) The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63: 81-96.
- Millar, S. (1975). Effects of tactual and phonological similarity on the recall of Braille letters by blind children. *British Journal of Psychology*, 66(2): 193-201.
- Murphy, K., Corfield, D.R., Guz, A., Fink, G.R., Harrison, J., Wise, R.J.S. & Adams, L. (1997). Cerebral areas associated with motor control of speech in humans. *JAP*, 83: 1438-1447.
- Murray, D. (1967). The role of speech responses in short-term memory. *Canadian Journal of Psychology*, 21: 263-276.
- Murray, D.J. (1967). Overt versus covert rehearsal in short-term memory. *Psychonomic Science*, 7: 362-364.
- Murray, D.J. (1968). Articulation and acoustic confusability in short-term memory. *Journal of Experimental Psychology*, 78: 679-684.
- Natsoulas, T. (1965). A study of the verbal transformation effect. *American Journal of Psychology*, 78: 257-263.
- Naveh-Benjamin, M. & Ayres, T.J. (1986). Digit span, reading rate, and linguistic relativity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38: 739-751.
- Necker, L.A. (1832). Observations on some remarkable phenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *Lond. Edinb. Philos. Mag. Sci.*, 3: 329-337.
- Newman, S.D., Twieg, D.B. & Carpenter, P.A. (2001). Baseline conditions and subtractive logic in neuroimaging. *Human Brain Mapping*, 14: 228-235.
- Ninio, J. (1998). *La science des illusions*. Paris, Odile Jacob.
- Norris, D., McQueen, J. & Cutler, A. (2000). Merging information in speech recognition. *Behavioural and Brain Sciences*, 23: 299-370.
- Nota, Y., Honda, K., Shimada, Y. & Fujimoto, I. (2002). Brain regions involved in motor control of speech. *NeuroImage'2002*: Poster 10140.

- Öhman, S.E.G. (1967). Numerical model of coarticulation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 41: 310-320.
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9: 97-114.
- Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T. & Shibasaki, H. (2003). The neural basis of individual differences in working memory capacity: An fMRI study. *NeuroImage*, 18: 789-797.
- Papathanassiou, D., Etard, O., Mellet, E., Zago, L., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). A common language network for comprehension and production: A contribution to the definition of language epicenters with PET. *NeuroImage*, 11(4): 347-357.
- Paulesu, E., Frith, C.D. & Frackowiak, R.S.J. (1993). The neural correlates of the verbal components of working memory. *Nature*, 362: 342-344.
- Pessenti M. (2002). L'imagerie cérébrale fonctionnelle et la neuropsychologie. In: Houde, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (Editors), *Cerveau et Psychologie*, Paris, PUF, pp. 343-370.
- Petersen, S.E., Fox, P.T., Posner, M.I., Mintun, M. & Raichle, M.E. (1988) Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331: 585-588.
- Petersen, S.E., Van Mier, H., Fiez, J.A. & Raichle M.E. (1998). The effects of practice on the functional anatomy of task performance. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 95: 853-860.
- Peterson, L.R. & Peterson M.J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58: 193-198.
- Piaget, J. & Chomsky, N. (1975). *Théorie du Langage, Théorie de l'Apprentissage*. Paris, Le Seuil.
- Pinker, S. (1994). *L'Instinct du Langage*. Paris, Odile Jacob.
- Pinker, S. (1997). *Comment Fonctionne l'Esprit*. Paris, Odile Jacob.
- Pitt, M. & Shoaf, L. (2001). The source of a lexical bias in the verbal transformation effect. *Language and Cognitive Processes*, 16(5/6): 715-721.
- Pitt, M. & Shoaf, L. (2002). Linking verbal transformations to their causes. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception and Performance*, 28(1): 150-162.
- Poldrack, R.A., Wagner, A.D., Prull, M.W., Desmond, J.E., Glover, G.H. & Gabrieli, J.D.E (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage*, 10: 15-35.
- Pöppel, E. (1997). A hierarchical model of temporal perception. *Trends in Cognitive Science*, 1(2): 56-61.
- Pöppel, E. & Wittmann, R. (1999). Time in the mind. In Wilson & Keil (Editors), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, Cambridge, MIT Press, pp. 841-843.
- Porro, C.A., Francescato, M.P., Cettolo, V., Diamond, M.E., Baraldi, P., Suiani, C., Bazzochi, M. & di Prampero, P.E. (1996). Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery. A functional magnetic resonance study. *Journal of Neurosciences*, 16: 7688-7698.
- Posner, M.I. & Raichle, M.E. (1994). *Images of Mind*. Scientific American Library, New-York.
- Postma, A. & Noordanus, C. (1996). Production and detection of speech errors in silent, mouthed, noise-masked, and normal auditory feedback speech. *Language and Speech*, 39(4): 375-392.
- Postman, L. & Philips, L.W. (1965). Short-term temporal changes in free recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 17: 132-138.
- Price, C., Moore, C.J., Humphreys, G.W. & Wise, R.J.S. (1997). Segregating semantic from phonological processes during reading. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 9: 727-733.
- Price, C.J. (2000). The anatomy of language: Contributions from functional neuroimaging. *Journal of Anatomy*, 197: 335-359.
- Pulgram, E. (1970). *Syllable, Word, Nexus, Cursus*. The Hague: Mouton.
- Pylyshyn, Z. (2003). Explaining mental imagery: now you see it, now you don't: Reply to Kosslyn *et al.* *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3): 111-112.
- Pylyshyn, Z. (2003). Return of the mental image: Are there really pictures in the brain? *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3): 113-118.
- Ramachandran, V.S. & Blakeslee, S. (2002). *Le Fantôme intérieur*. Paris, Odile Jacob.
- Reed, C.M., Rabinowitz, W.M., Durlach, N.I. & Braid, L.D. (1985). Research on the tadoma method of speech communication. *Journal of Acoustical Society of America*, 28: 1275-1277.

- Reisberg, D., Smith, J.D., Baxter, A.D. & Sonenshine, M. (1989). Enacted auditory images are ambiguous; Pure auditory images are not. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A: 619-641.
- Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Meyer, J., Dogil, G., Haider, H. & Grodd, W. (2000). Articulatory/phonetic sequencing at the level of the anterior perisylvian cortex: A functional magnetic resonance imaging (fmri) study. *Brain and Language*, 75: 259-276.
- Rizzolatti, G. & Arbib, M.A. (1998). Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*, 21: 188-194.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Review Neuroscience*, 2 : 661-670.
- Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27: 169-192.
- Rochet-Capellan, A. (2004). *L'Economie Articulaire des Mots du Français : Une Autre Explication de l'Effet LC ?* Mémoire de DEA de Sciences Cognitives, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Rodriguez, E., George, N., Lachaux, J.-P., Martinerie, B. & Varela, F.J. (1999). Perception's shadow: Long distance synchronisation of human brain activity. *Nature*, 397: 430-433.
- Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C., Segebarth, C., Morand, S., Gemignani, A., Decors, M. & Jeannerod, M. (1996). Possible involvement of primary cortex in mentally simulated movement: A functional magnetic resonance imaging. *Neuroreport*, 7: 1280-1284.
- Rousset, I. (2003). From lexical to syllabic organization: Favored and disfavored co-occurrences. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, Barcelona, pp. 715-718.
- Ruchkin, D.S., Grafman, J., Cameron, K. & Berndt, R.S. (2004). Working memory retention systems: A state of activated long-term memory. *Behavioral and Brain Sciences*, to appear.
- Sack, A.T. & Linden, D.E.J. (2003). Combining transcranial magnetic stimulation and functional imaging in cognitive brain research: Possibilities and limitations. *Brain Research Reviews*, 43: 41-56.
- Salamé, P. & Baddeley, A.D. (1982). Disruption of short-term memory by unattended speech: Implications for the structure of working memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 21: 150-164.
- Salamé, P. & Baddeley, A.D. (1989). Effects of background music on phonological short-term memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A: 107-122.
- Santi, A., Servos, P., Vatiokis-Bateson, E., Kuratate, T. & Munhall, K. (2003). Perceiving biological motion: Dissociating visible speech from walking. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(6): 800-809.
- Schumacher, E.H., Lauber, E., Awh, E., Jonides, J., Smith, E. & Koeppel, R.A. (1996). PET evidence for an amodal verbal working memory system. *NeuroImage*, 3: 79-88.
- Schwartz, J.-L. & Escudier, P. (2000). *La Parole Cognitive*. Paris, Hermès.
- Schwartz, J.-L., Abry, C., Boë, L.-J. & Cathiard, M.A. (2002). Phonology in a theory of perception-for-action-control. In: Durand, J., Lacks, B. (Eds.), *Phonology: From Phonetics to Cognition*. Oxford University Press, Oxford, pp. 240-280.
- Schwoebel, J., Boronat, C.B. & Coslett, H.B. (2002). The man who executed « imagined » movements: Evidence for dissociable components of the body schema. *Brain and Cognition*, 50: 1-16.
- Scott, S.K. & Johnsrude, I.S. (2003). The neuroanatomical and functional organization of speech perception. *Trends in Neurosciences*, 26(2): 100-107.
- Scott, S.K. & Wise, R.J.S (2004). The functional neuroanatomy of prelexical processing in speech perception. *Cognition*, 92: 13-45.
- Seron, X. (1993). *La neuropsychologie cognitive*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Seron, X. & Jeannerod, M. (1994). *Neuropsychologie Humaine*. Liège, Mardaga.
- Shallice, T. & Warrington, E.K. (1970). Independent functioning of verbal memory stores: A neuropsychological study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 22: 261-273.
- Shattuck-Hufnagel, S. (1979). Speech errors as evidence for a serial order mechanism in sentence production. In: W.E. Cooper and E.C.T. Walker (Editors), *Sentence Processing: Psycholinguistic Studies Presented to Merrill Garrett*, Hillsdale NJ: Erlbaum, pp. 295-342.
- Shergill, S.S., Bullmore, E.T., Simmons, A., Murray, R.M. & McGuire, P.K. (2000). Functional anatomy of auditory imagery in schizophrenic patients with auditory hallucinations. *American Journal of Psychiatry*, 157(10): 1691-1693.

- Shergill, S.S., Bullmore, E.T., Brammer, M.J., Williams, S.C., Murray, R.M. & McGuire, P.K. (2001). A functional study of auditory verbal imagery. *Psychological Medicine*, 31(2): 241-253.
- Shergill, S.S., Brammer, M.J., Fukuda, R., Bullmore, E., Amaro Jr., E. Murray, R.M. & McGuire, P. (2002). Modulation of activity in temporal cortex during generation of inner speech. *Human Brain Mapping*, 16: 219-227.
- Shoaf, L. & Pitt, M. (2002). Does node stability underlie the verbal transformation effect? A test of node structure theory. *Perception & Psychophysics*, 64(5): 795-803.
- Sirigu, A. & Duhamel, J.R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(7): 910-919
- Smith, E.E., Jonides, J., Marshuetz, C. & Koeppel, R.A. (1998). Components of verbal working memory: Evidence from neuroimaging. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 95: 876-882.
- Smith, E.E. & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283: 1657-1661.
- Smith, J.D., Reisberg, D. & Wilson, M. (1995). The role of subvocalization in auditory imagery. *Neuropsychologia*, 11: 1433-1454.
- Sock, R. (1998). *Organisation Temporelle en Production de la Parole – Emergence de Catégories Sensori-Motrices Phonétiques*. Presses Universitaires du Septentrion.
- Speidel, G.E. (1989). Imitation: A bootstrap for learning to speak? In: Speidel, G.E. & Nelson, K.E. (Editors.), *The Many Faces of Imitation in Language Learning*, New York, Springer Verlag: 151-179.
- Speidel, G.E. (1993). Phonological short-term memory and individual differences in learning to speak: A bilingual case study. *First Language*, 13: 69-91.
- Sperry, R.W. (1950). Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 43: 482-489.
- Stetson, R.H. (1951). *Motor Phonetics: A study of speech movements in action*. Amsterdam: North-Holland, 2nd Edition.
- Stevens S.S. (1951). Mathematics, measurements, and psychophysics. In: Stevens S.S. (Editor), *Handbook of Experimental Psychology*, New York, Wiley, pp. 1-49.
- Stricker, S. (1885). *Du Langage et de la Musique*. Paris, Bibliothèque de Philosophie Contemporaine.
- Tai, Y.F., Scherfner, C., Brooks, D.J., Sawamoto, N. & Castiello, U. (2004). The human premotor cortex is 'mirror' only for biological actions. *Current Biology*, 14: 117-120.
- Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *A Co-Planar Stereo-Taxic Atlas of Human Brain*. Stuttgart, Thieme.
- Thierry, G., Boulanouar, K., Kherif, F., Ranjeva, J.-P. & Démonet, J.-F. (1999). Temporal sorting of neural components underlying phonological processing. *Neuroreport*, 10: 2599-2603.
- Thierry, G., Ibarrola, D., Démonet, J.-F. & Cardebat, D. (1999). Demand on verbal working memory delays haemodynamic response in the inferior prefrontal cortex. *Human Brain Mapping*, 19: 37-46.
- Treiman, R. (1983). The structure of spoken syllables: Evidence from novel word games. *Cognition*, 15: 49-74.
- Treiman, R. & Danis, C. (1988). Syllabification of intervocalic consonants. *Journal of Memory and Language*, 27: 87-104.
- Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1990). Phase transitions in speech production and their perceptual consequences. In: M. Jeannerod (Editor), *Attention and Performance XIII*, Hillsdale, NJ: Erlbaum, pp. 429-452.
- Tuller, B. & Kelso, J.A.S. (1991). The production and perception of syllable structure. *Journal of Speech and Hearing Research*, 34: 501-508.
- Tzourio-Mazoyer, N. & Crivello, F. (2002). L'anatomie corticale probabiliste. In: Houde, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (Editors), *Cerveau et Psychologie*, Paris, PUF, pp. 159-178.
- Umiltà, M.A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C. & Rizzolatti, G. (2001). I know what you are doing. *Neuron*, 31: 155-165.
- Vallar, G. & Baddeley, A.D. (1984). Fractionation of working memory: Neuropsychological evidence for a phonological short-term store. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23: 151-161.
- Vallée, N., Boë, L.J., Maddieson, I. & Rousset, I. (2000). Des lexiques aux syllabes des langues du monde – Typologie et structures. *Actes des XXIIIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, Aussois, pp. 93-96.

- Varela, F.J., Thompson, E. & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind. Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge, MIT Press.
- Varela, F., Lachaux, J.-P., Rodriguez, E. & Martinerie, J. (2001). The brainweb: Phase synchronization and large scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, 2: 229-238.
- Vitevitch, M.S. & Luce, P.A. (1998). When words compete: Levels of processing in perception of spoken words. *Psychological Science*, 9: 325-329.
- Vitevitch, M.S. & Luce, P.A. (1999). Probabilistic phonotactics and neighborhood activation in spoken word recognition. *Journal of Memory and Language*, 40: 374-408.
- von Holst, E. (1954). Relations between the central nervous system and the peripheral organs. *British Journal of Animal Behavior*, 2: 89-94.
- Walsh, V. & Cowey, A. (2000). Transcranial magnetic stimulation and cognitive neuroscience. *Nature Review Neuroscience*, 1: 73-79.
- Warren, M.R. & Gregory, R.L. (1958). An auditory analogue of the visual reversible figure. *American Journal of Psychology*, 71: 612-613.
- Warren, M.R. (1961). Illusory changes of distinct speech upon repetition – The verbal transformation effect. *British Journal of Psychology*, 52: 249-258.
- Warren, M.R. (1982). *Auditory Perception*. Pergamon Press, New York.
- Warren, M.R. & Meyers, D.M. (1987). Effects of listening to repeated syllables: Category boundary shifts versus verbal transformation. *Journal of Phonetics*, 15: 169-181.
- Watanabe, J., Sugiura, M., Miura, N., Watanabe, Y., Maeda, Y., Matsue, Y. & Kawashima, R. (2004). The human parietal cortex is involved in spatial processing of tongue movement – An fMRI study. *NeuroImage, to appear*.
- Watkins, K.E., Strafelle, A.P. & Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, 41(3): 989-994.
- Waters, G.S, Rochon, E. & Caplan, D. (1992). The role of high-level planning in rehearsal: Evidence from patients with apraxia of speech. *Journal of Memory and Language*, 31: 54-73.
- Wildgruber, D., Ackermann, H. & Grodd, W. (2001). Differential contributions of motor cortex, basal ganglia, and cerebellum to speech motor control: Effects of syllable repetition rate evaluated by fmri. *NeuroImage*, 13: 101-109.
- Wilson, M. & Emmorey, K. (1998). A “Word length effect” for sign language: Further evidence for the role of language in structuring working memory. *Memory & Cognition*, 26: 584-590.
- Wilson, M. (2001). The case for sensorimotor coding in verbal working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(1): 44-57.
- Wilson, M. (2003). Imagined movements that leak out. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(2): 53-55.
- Wise, R.J., Greene, J., Buchel, C. & Scott, S.K. (1999). Brain regions involved in articulation. *Lancet*, 353: 1057-1061.
- Wolpert, D.M., Ghahramani, Z. & Jordan, M.I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 268: 1880-1882.
- Yetkin, F.Z., Hammeke, T.A., Swanson, S.J., Morris, G.L., Mueller, W.M., McAuliffe, T.L. & Haughton, V.M. (1995). A comparison of functional mr activation patterns during silent and audible language tasks. *AJNR*, 16: 1087-1092.
- Yin, C. & MacKay, D.G. (1992). Auditory illusions and aging: Transmission of priming in the verbal transformation paradigm. Paper presented at the *IVth Biennial Cognitive Aging Conference*, Atlanta.
- Ziegler, W., Kilian, B. & Deger, K. (1997). The role of left mesial frontal cortex in fluent speech: Evidence from a case of left supplementary motor area hemorrhage. *Neuropsychology*, 35: 1197-1208.

Liste des Publications

Articles publiés ou soumis dans des revues avec comité de lecture

- Abry, C., Sato, M., Schwartz, J.-L., Løevenbruck, H. & Cathiard, M.-A. (2004). Attention-based maintenance of speech forms in memory: The case of verbal transformations. Commentary on target paper 'Working Memory Retention Systems: A State of Activated Long-Term Memory' by Ruchkin, Grafman, Cameron and Berndt. *Behavioral and Brain Sciences*, 26: 728-729.
- Sato, M., Baciú, M., Løevenbruck, H., Schwartz, J.-L., Cathiard, M.-A., Segebarth, C. & Abry, C. (2004). Multistable representation of speech forms: An fMRI study of verbal transformations. *NeuroImage*, 23(3): 1143-1151.
- Sato, M., Schwartz J.-L., Abry, C., Cathiard, M.-A. & Løevenbruck, H. (under review). Multistable syllables as enacted percept: A source of an asymmetric bias in the verbal transformation effect. *Perception & Psychophysics*.
- Sato, M., Rousset, I., Schwartz, J.-L. & Vallée, N. (submitted). Asymmetries in verbal transformations: A perceptual correlate of the 'Labial-Coronal' Effect.

Articles publiés dans des actes de congrès internationaux avec comité de lecture

- Sato, M., Baciú, M., Schwartz, J.-L., Abry, C., Løevenbruck, H., Cathiard, M.-A. & Segebarth, C. (2004). When multistable speech perception entails verbal working memory. *First Congress of the European Neuropsychological Societies*, April 18-20, Modena, Italy. [Abstract]
- Sato, M., Schwartz, J.-L., Abry, C., Cathiard, M.-A. & Løevenbruck, H. (2003). Articulatory control constraints as a source of bistable speech perception. *Progress in Motor Control IV: Motor Control and Learning over the Life Span*, August 20-23, Caen, France. [Abstract]
- Sato, M. & Schwartz, J.-L. (2003). Linking speech, verbal imagery and working memory: Articulatory control constraints in the verbal transformation effect. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, pp. 435-438, August 03-09, Barcelona, Spain.
- Sato, M., Baciú, M., Abry, C., Løevenbruck, H. & Segebarth, C. (2003). A functional MRI study of the verbal transformation effect. *Proceedings of the XVth International Congress of Phonetic Sciences*, pp.1639-1642, August 03-09, Barcelona, Spain.
- Sato, M., Baciú, M., Schwartz, J.-L., Abry, C., Løevenbruck, H., Cathiard, M.-A. & Segebarth, C. (2003). Neural correlates of the verbal transformation effect. *Proceedings of the IXth International Conference on Functional Mapping of the Human Brain*, June 18-22, New York, USA. Available on CD-Rom in *NeuroImage*, 19(2). [Abstract]
- Sato, M., Baciú, M., Schwartz, J.-L., Abry, C., Løevenbruck, H., Cathiard M.-A. & Segebarth, C. (2003). Syllable parsing, temporary storage of the phonological action goal and decision-making. *Colloquium "Vocalize to Localize: A Missing Piece in the Puzzling Route Towards Language"*, January 30-31, Grenoble, France. [Abstract]
- Sato, M., Schwartz, J.-L., Cathiard, M.-A., Abry, C. & Løevenbruck, H. (2002). Intrasyllabic articulatory control constraints in verbal working memory. *Proceedings of the VIIth International Congress of Speech and Language Processes*, pp. 669-672, September 16-20, Denver, USA.

Articles publiés dans des actes de congrès nationaux avec comité de lecture

- Rousset, I., Sato, M., Schwartz, J.-L. & Vallée, N. (2004). Un corrélat perceptif de l'effet LC. *Actes des XXVèmes Journées d'Etudes sur la Parole*, April 19-22, Fès, Morocco.

Sato, M., Schwartz, J.-L., Cathiard, M.-A., Abry, C. & Løevenbruck, H. (2002). Contraintes de contrôle articulatoire intrasyllabique dans la mémoire de travail verbale. *Actes des XXIVèmes Journées d'Etudes sur la Parole*, pp. 345-348, June 24-27, Nancy, France.

Présentations dans des colloques et congrès nationaux

Rousset, I., Sato, M., Schwartz, J.-L. & Vallée, N. (2004). Patron lexical favorisé : Mise en évidence d'un corrélat perceptif de «l'effet LC ». *Actes des Vèmes Journées Internationales du GDR Phonologies*, June 06-08, Orléans, France.

Sato, M., Baciú, M., Schwartz, J.-L., Løevenbruck, H., Abry, C., Cathiard, M.-A. & Segebarth, C. (2003). La parole intérieure, une pensée énoncée? *Journée du Pôle Rhône-Alpes de Sciences Cognitives*, May 16, Grenoble, France.

Sato, M. & Abry, C. (2003). Analyse syllabique en ligne : L'effet de transformation verbale. *Journées d'Etudes sur la Syllabe dans l'Identification des Mots Ecrits*, February 13-14, Reims, France.

Sato, M., Baciú, M., Schwartz, J.-L., Løevenbruck, H., Abry, C., Cathiard, M.-A. & Segebarth, C. (2002). Linking speech, verbal imagery and verbal short-term memory processes: a functional study of the verbal transformation effect. *Actes des Journées d'Etudes Imagerie Cérébrale et Langage*, December 03-04, Lyon, France.

Sato, M., Schwartz, J.-L., Cathiard, M.-A., Abry, C. & Løevenbruck, H. (2002). Syllabes "neckeriennes", syllabes "énoncées". *Actes des IVèmes Journées Internationales du GDR Phonologies*, June 06-08, Grenoble, France.

Sato, M., Schwartz, J.-L., Cathiard, M.-A., Abry, C. & Løevenbruck, H. (2002). Contraintes de contrôle articulatoire intrasyllabique en mémoire de travail. *Journée du Pôle Rhône-Alpes de Sciences Cognitives*, March 07, Archamps, France.

Mémoires

Sato, M. (2003). *Représentations Multistables en Mémoire de Travail*. Mémoire de DEA de Neuropsychologie, Université de Savoie.

Sato, M. (2001). *La Nature Articulatoire de la Boucle Articulatoire*. Mémoire de DEA de Sciences Cognitives, Institut National Polytechnique de Grenoble et Université Stendhal (Grenoble III).

Sato, M. (1999). *Développement d'une Application Multimédia pour l'Evaluation Neuropsychologique des Enfants Autistes et Psychotiques*. Mémoire de Maîtrise de Génie Informatique, Université de La Rochelle et Service de Pédiopsychiatrie de l'Hopital Marius Lacroix.

Index des Auteurs

A

Aboitiz, F. 109, 115
 Abrams, L. 9, 10, 17, 39, 40, 43, 60, 61, 76, 80, 122
 Abry, C. 3, 6, 41, 50, 62, 97, 103, 106, 107, 115, 125, 128, 129
 Ackermann, H. 78, 79, 81, 94, 95, 118, 124, 127
 Adams, L. 78, 79, 94, 123
 Aleman, A. 93, 115
 Amaro Jr. 125
 Anand, S. 113, 115
 Andermann, F. 85, 119
 Angulo, J.C. 12, 120
 Arbib. 110, 112, 114
 Argandona, E.D. 12, 120
 Armony, J.L. 110, 120
 Ashburner, J. 85, 115, 119
 Aso, T. 77, 93, 97, 99, 123
 Atkinson R.C. 68, 115
 Awh, E. 77, 97, 98, 121, 125
 Ayres, T.J. 71, 104, 123

B

Bach, D.M. 97, 117
 Baciú, M. 97, 115, 128, 129
 Baddeley, A.D. 8, 66, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 103, 104, 105, 108, 115, 116, 120, 121, 125, 126
 Baldo J.V. 79, 119
 Balota, D.A. 78, 94, 119
 Baraldi, P. 32, 42, 78, 124
 Barch, D.M. 81, 116
 Baxter, A.D. 7, 25, 30, 38, 39, 40, 66, 78, 105, 124
 Bazzochi, M. 32, 42, 78, 124
 Bengston, J.D. 51, 116
 Benuzzi, F. 113, 117
 Bergounioux, G. 40, 116
 Bergson, H. 66, 116
 Berndt, R.S. 75, 125
 Berthoz, A. 6, 39, 41, 98, 116
 Binet, A. 8, 42, 116
 Binkofski, F. 94, 113, 117
 Bischoff-Grethe, A. 98, 116
 Bishop, D.V.M. 73, 103, 106, 116
 Blakemore, S.J. 41, 116
 Blakesee, S. 9, 106, 124

Blank, S.C. 94, 116
 Blaxton, T. 78, 94, 116
 Boë, L.J. 3, 6, 15, 44, 49, 62, 106, 125, 126
 Bookheimer, S.Y. 78, 94, 116
 Boronat, C.B. 9, 97, 125
 Botvinick, M.M. 97, 117
 Braidá, L.D. 106, 124
 Brammer, M.J. 76, 93, 95, 121, 125
 Braver, T.S. 76, 77, 81, 92, 97, 116, 117
 Brett, M. 87, 116
 Bricogne, S. 81, 123
 Brooks, D.J. 110, 126
 Browman, C.P. 14, 62, 117
 Brown, G.D.A. 103, 117
 Brown, J. 67, 117
 Buccino, G. 94, 113, 117, 119
 Buchanan, M. 70, 71, 72, 103, 115
 Buchel, C. 78, 79, 94, 95, 127
 Bullmore, E. 76, 77, 93, 95, 96, 117, 120, 121, 125
 Bunzt, H. 15, 120
 Burgess, N. 77, 92, 120
 Bydder, G.M. 85, 119
 Byers-Brown, B. 106, 116

C

Callan D.E. 94, 121
 Callan, A.M. 94, 118
 Calvert, G.A. 94, 117
 Cameron, K. 75, 125
 Campbell, R. 94, 106, 117
 Canessa, N. 113, 117
 Cao, Y. 81, 121
 Caplan, D. 74, 127
 Cardebat, D. 78, 94, 118
 Carpenter, P.A. 82, 123
 Carr, L. 94, 111, 117
 Carr, T.H. 81, 121
 Carter, C.S. 81, 97, 116, 117
 Castiello, U. 110, 126
 Cathiard, M.-A. 3, 6, 62, 106, 125, 128, 129
 Cavalli-Sforza, L. 49, 51, 117
 Cettolo, V. 32, 42, 78, 124
 Chambers, D. 6, 117
 Changeux, J.P. 99, 117
 Chein, J.M. 75, 117
 Chollet, F. 78, 94, 118
 Chomsky, N. 17, 48, 49, 110, 117, 120, 121, 124
 Christiansen, M.H. 111, 117

Clements, G.N. 44, 60, 117
 Cohen J.D. 97, 117
 Colle, H.A. 71, 117
 Collins, D.L. 84, 119
 Comblain, A. 74, 103, 117
 Conrad, R. 68, 71, 117
 Content, A. 44, 117, 119
 Corfield, D.R. 78, 79, 94, 123
 Coslett, H.B. 9, 97, 125
 Cowan, N. 72, 117
 Cowey, A. 113, 127
 Craighero, L. 110, 112, 113, 119, 125
 Craik, F.I.M. 69, 118
 Crivello, F. 81, 84, 123, 126
 Croudace, T.J. 76, 121
 Crowder R.G. 68, 118
 Cubelli, R. 73, 118
 Cunitz, A.R. 67, 120
 Cutler, A. 12, 123

D

Danis, C. 44, 126
 Darwin, C. 102, 118
 David, A.S. 93, 95, 123
 Davis, B.L. 15, 49, 50, 51, 53, 95, 107, 118, 122
 Day, L. 72, 117
 de Boysson-Bardies, B. 51, 118
 de Gelder, B. 106, 118
 de Haan, E.H.F. 93, 115
 de Jong, K.J. 15, 29, 38, 41, 118
 de Schonen, S. 107, 108, 118
 Decety, J. 8, 14, 32, 42, 78, 120, 121, 125
 Decorps, M. 32, 42, 78, 125
 Deger, K. 95, 127
 Delon-Martin, C. 32, 42, 78, 125
 Démonet, J.-F. 78, 82, 94, 103, 118
 Desmond J.E. 98, 118
 Desmurget, M. 41, 118
 Deweer, B. 95, 119
 Di Pellegrino, G. 110, 118
 di Prampero, P.E. 32, 42, 78, 124
 Diamond, M.E. 32, 42, 78, 124
 Ditzinger, T. 12, 42, 56, 59, 60, 118
 Dodd, B. 106, 117
 Dogil, G. 78, 79, 81, 94, 118, 124
 Dolan, R.J. 84, 85, 115, 119
 Dronkers, N.F. 79, 94, 95, 119
 Dubeau, M.-C. 94, 111, 117
 Dubois, B. 95, 119
 Duchet, J.-L. 17, 119
 Duffy, J.R. 73, 121
 Dufour, S. 12, 17, 18, 52, 119
 Duhamel, J.R. 8, 42, 126
 Dumay, N. 44, 119
 Dupoux, E. 49, 123
 Durand, J. 3, 50, 115, 125
 Durlach, N.I. 106, 124

E

Edmonson, J.R. 62, 119
 Ehrsson, H.E. 32, 42, 119
 Ellis, N.C. 71, 104, 119
 Elman, J.L. 12, 123
 Emmorey, K. 104, 127
 Escudier, P. 6, 49, 116, 125
 Etard, O. 81, 82, 94, 123, 124
 Eustache, F. 81, 119
 Evans, A.C. 84, 119

F

Fadiga, L. 94, 110, 111, 112, 113, 117, 118, 119, 126
 Fant, C.G.M. 48, 121
 Faure, S. 81, 119
 Ferrari, P. F. 111, 119
 Fiez, J. 75, 78, 94, 95, 98, 117, 118, 119, 124
 Fink, G.R. 78, 79, 94, 113, 117, 123
 Fish, D. 85, 119
 Fitch, W.T. 110, 120
 Flatt, M.R. 82, 117
 Floccia, C. 45, 119
 Flores, L. 72, 117
 Fogassi, L. 94, 110, 111, 112, 113, 117, 118, 119, 121, 125, 126
 Formisano, E. 93, 115
 Fox, P.T. 81, 87, 122, 124
 Frack, V. 8, 33, 42, 78, 121
 Frackowiak, R.S. 76, 78, 84, 85, 86, 93, 94, 95, 103, 115, 118, 119, 123, 124
 Francescato, M.P. 32, 42, 78, 124
 Frauenfelder, U.H. 19, 44, 60, 117, 119, 120
 Freitas, C.S. 87, 122
 Freud, S. 14, 119
 Freund H.-J. 94, 113, 117
 Friston, K.J. 84, 85, 86, 87, 115, 119, 120
 Frith, C.D. 41, 76, 78, 84, 85, 86, 92, 94, 96, 115, 116, 119, 120, 124
 Fu, C.H.Y. 76, 121
 Fujimaki, N. 77, 119
 Fujimoto, I. 78, 123
 Fukuda, R. 95, 125
 Fukuyama, H. 77, 93, 97, 99, 123

G

Gabrieli, J.D.E. 78, 94, 98, 118, 124
 Gaillard, W.D. 78, 94, 116
 Galaburda, A.M. 49, 120
 Gallese, V. 94, 110, 111, 112, 113, 117, 118, 119, 121, 125, 126
 Ganis, G. 7, 121
 Garcia, V. 109, 115
 Gathercole, S.E. 73, 74, 75, 103, 104, 105, 108, 116, 120
 Gemignani, A. 32, 42, 78, 125
 George, N. 99, 125
 Georgieff, N. 9, 14, 41, 96, 120
 Geyer, S. 32, 42, 119

Ghaharamani, Z.....41, 127
 Ginier, B.L.....98, 118
 Glanzer, M.....67, 68, 120
 Gleason, P.....15, 41, 120
 Glover, G.H.....78, 94, 98, 118, 124
 Goldinger, S.D.....11, 17, 52, 122
 Goldstein, L.....14, 62, 117
 Gomez, C.....12, 120
 Goslin, J.....19, 44, 45, 60, 119, 120
 Grafman, J.....75, 125
 Grafton, S.....94, 98, 116, 122
 Greene, J.....78, 79, 94, 95, 127
 Gregory, R.L.....7, 40, 127
 Grèzes, J.....8, 110, 120
 Grodd, W.78, 79, 81, 94, 95, 118, 122, 124, 127
 Gupta, P.....72, 105, 120
 Guz, A.....78, 79, 94, 123

H

Habib, M.....49, 120
 Hagège, C.....48, 120
 Hagoort, P.....93, 115
 Haider, H.....78, 79, 81, 94, 118, 124
 Haken, H.....12, 15, 42, 118, 120
 Halle, M.....17, 48, 117, 121
 Hammeke, T.A.....81, 127
 Harrison, J.....78, 79, 94, 123
 Haughton, V.M.....81, 127
 Hauser, M.D.....110, 120
 Hayakawa, T.....77, 119
 Heater, J.D.....85, 119
 Hebb, D.O.....67, 120
 Hennelly, R.A.....71, 104, 119
 Henson, R.N.A.....77, 92, 120
 Hertrich, I.....95, 122
 Hickok, G.....96, 98, 108, 120
 Hitch, G.J.....66, 69, 115
 Holmes, A.P.....86, 87, 119, 120
 Honda, K.....78, 123
 Honey, G.....76, 77, 117, 120, 121
 Hooper, J.B.....44, 60, 121
 Horwitz, B.....76, 117
 Hotson, J.....113, 115
 Houde, O.....81, 83, 84, 123, 124, 126
 Huang, J.....81, 121
 Hull, A.J.....68, 71, 117
 Hulme, C.....103, 117
 Humphreys, G.W.....78, 94, 124
 Hutchinson, J.M.....62, 119

I

Iacoboni, M.....94, 111, 117
 Indefrey, P.....96, 121
 Ivry, R.B.....98, 116

J

Jackson P.L.....14, 121
 Jacobs, J.....67, 121
 Jakobson, R.....15, 48, 49, 50, 121

Jeannerod, M.....2, 8, 14, 32, 39, 41, 42, 49, 50,
 78, 81, 97, 120, 121, 122, 125
 Johnsrude, I.S.....87, 116
 Johnson, T.....72, 117
 Johnson-Frey, S.H.....94, 122
 Joliot, M.....81, 123
 Jones, D.....71, 105, 121
 Jones, J.A.....94, 118, 121
 Jonides, J.....76, 77, 92, 93, 97, 98, 99, 117,
 121, 125, 126
 Jordan, M.I.....41, 127

K

Kahn R.S.....93, 115
 Kamber, M.....84, 119
 Kaminska, Z.....9, 11, 40, 60, 76, 121
 Kamp, H.....81, 118
 Kast, B.....99, 121
 Kato, M.....77, 119
 Kawashima, R.....97, 127
 Kearns, K.R.....44, 117
 Keller, T.A.....72, 117
 Kelso, J.A.S.....12, 15, 41, 42, 56, 59, 60, 118,
 120, 121, 126
 Kenstowicz, M.....51, 60, 121
 Kent, D.R.....73, 121
 Kent, F.J.....73, 121
 Keysers, C.....111, 121, 126
 Kholer, E.....111, 121
 Kiehl K.A.....93, 97, 99, 122
 Kilian, B.....95, 127
 Kim, J.....76, 121
 Kinney, A.....15, 51, 53, 122
 Kirby, S.....111, 117
 Knight, R.T.....94, 119
 Koeppel, R.A.....76, 77, 92, 97, 98, 121, 125, 126
 Kondo, H.....77, 93, 97, 99, 123
 Kopenhagen, H.....93, 115
 Kosslyn, S.M.....7, 82, 121, 123
 Kroos, C.....94, 118
 Kuhl, P.K.....103, 121
 Kuratate, T.....94, 125

L

Laboissière, R.....50, 107, 115
 Lachaux, J.-P.....99, 125, 126
 Lackner, J.R.....40, 122
 Lacks, B.....3, 50, 115, 125
 Lagravinese, G.....113, 117
 Lallouache, M.T.....21, 122
 Lancaster, J.L.....87, 122
 Landauer, T.K.....39, 122
 Larsen, B.....78, 122
 Lassen, N.A.....78, 122
 Lauber, E.....97, 125
 Lechat, J.....97, 122
 Lenzi, G.L.....94, 117
 Leslie, K.R.....94, 122
 Levelt, W.J.M.....9, 10, 96, 121, 122

Lewis, V.J. 72, 115
 Leybaert, J. 97, 122
 Liberman, A.M. 62, 103, 122
 Liddle, P.F. 93, 97, 99, 122
 Liénard, J.S. 48, 116
 Liénart, J.S. 48, 116
 Liljencrants, J. 49, 122
 Lim, B.M. 15, 41, 118
 Lindblom, B.E.F. 49, 122
 Linden, D.E.J. 113, 125
 Livet, M.-O. 107, 108, 118
 Lockhart, R.S. 69, 118
 Logie, R. 75, 116
 Luce, P.A. 11, 12, 17, 52, 122, 126
 Lui, F. 113, 117

M

MacDonald, D. 84, 119
 MacKay, D.G. 9, 10, 11, 17, 39, 40, 43, 60, 61, 76, 80, 122, 127
 Macken, W.J. 71, 121
 MacNeilage, P.F. 15, 49, 50, 51, 53, 62, 95, 103, 107, 111, 118, 122
 MacWhinney, B. 72, 82, 105, 117, 120
 Maddieson, I. 15, 44, 49, 50, 122, 126
 Maeda, Y. 97, 127
 Malmberg, B. 44, 60, 122
 Marshuetz, C. 76, 77, 92, 98, 121, 126
 Martin, A. 105, 120
 Martinerie, B. 99, 125
 Martinerie, J. 99, 126
 Massarelli, R. 32, 42, 78, 125
 Mathiak, K. 95, 122
 Matsue, Y. 97, 127
 Mattingly, I.G. 62, 103, 122
 Matyear, C.M. 15, 51, 53, 122
 Mayer, J. 81, 118
 Mayer, P. 9, 11, 40, 60, 76, 121
 Mazard, A. 82, 123
 Mazoyer, B. 81, 82, 83, 84, 94, 123, 124, 126
 Mazziotta, J.C. 84, 85, 94, 111, 115, 117, 119
 McAuliffe, T.L. 81, 127
 McClelland, J.L. 12, 123
 McGuire, P.K. 93, 95, 96, 123, 125
 McQueen, J. 12, 123
 Mehler, J. 49, 123
 Mellet, E. 81, 82, 94, 123, 124
 Melton, A.W. 67, 123
 Meltzoff, A.N. 103, 106, 107, 121, 123
 Meyer, A.S. 10, 122
 Meyer, J. 78, 79, 94, 124
 Meyers, D.M. 9, 40, 60, 127
 Meynadier, Y. 16, 44, 60, 123
 Millar, S. 97, 123
 Miller, G.A. 67, 123
 Mintun, M. 81, 124
 Miura, N. 97, 127
 Miyauchi, S. 77, 119
 Moore, C.J. 78, 94, 124
 Moore, M.K. 103, 106, 107, 123

Morand, S. 32, 42, 78, 125
 Morishita, M. 77, 93, 97, 99, 123
 Morris, G.L. 81, 127
 Morton, J. 68, 118
 Mueller, W.M. 81, 127
 Munhall, K. 94, 118, 125
 Murphy, K. 78, 79, 94, 116, 123
 Murray, D. 8, 72, 76, 104, 105, 123
 Murray, R.M. 93, 95, 96, 123, 125

N

Nagao, K. 15, 41, 118
 Naito, E. 32, 42, 119
 Natsoulas, T. 9, 12, 17, 40, 43, 76, 80, 123
 Naveh-Benjamin, M. 71, 104, 123
 Necker, L.A. 6, 123
 Nelson, K.E. 104, 126
 Nerbonne, M.A. 62, 119
 Nespoulous, J.L. 78, 94, 118
 Newman, S.D. 81, 123
 Nichelli, P. 73, 118
 Nielsen, M. 77, 119
 Ninio, J. 7, 123
 Noll, D. 76, 77, 81, 92, 97, 116, 117
 Noordanus, C. 39, 124
 Norris, D. 12, 123
 Nota, Y. 78, 123
 Nystrom, L.E. 76, 77, 92, 117

Ö

Öhman, S.E.G. 20, 123

O

Oldfield, R.C. 80, 123
 Osaka, M. 77, 93, 97, 99, 123
 Osaka, N. 77, 93, 97, 99, 123
 Owen, A.M. 87, 116

P

Pallier, C. 17, 18, 52, 119
 Papagno, C. 74, 75, 103, 108, 115, 116
 Papathanassiou, D. 94, 124
 Passingham, R.E. 110, 120
 Patteri, I. 113, 117
 Paulesu, E. 78, 118
 Paulesu, E. 76, 78, 94, 118, 124
 Paus, T. 113, 127
 Peereman, R. 12, 17, 18, 52, 119
 Pélisson, D. 41, 118
 Perlstein, W.M. 76, 77, 92, 117
 Pessenti, M. 81, 124
 Petersen, S.E. 78, 81, 94, 95, 118, 119, 124
 Peterson, M.J. 67, 124
 Peterson, L.R. 67, 124
 Petit, L. 81, 123
 Philips, L.W. 67, 124
 Piaget, J. 49, 124
 Pich, E.M. 76, 121

Pillon, B.95, 119
 Pinker, S.6, 49, 124
 Pisoni, D.B.11, 12, 17, 52, 122
 Pitt, M.9, 12, 17, 40, 41, 43, 55, 56, 59, 60,
 76, 80, 124, 126
 Poeppel, D.96, 98, 108, 120
 Poldrack, R.A.78, 94, 124
 Poline J.-B.86, 119
 Pool, M.9, 11, 40, 60, 76, 121
 Pöppel, E.12, 42, 60, 124
 Porro, C.A.32, 42, 78, 113, 117, 124
 Posner, M.I.81, 124
 Postma, A.39, 124
 Postman, L.67, 124
 Prablanc, C.41, 118
 Price, C.78, 94, 96, 118, 124
 Provost, J.82, 117
 Prull, M.W.78, 94, 124
 Pulgram, E.44, 60, 124
 Pylyshyn, Z.7, 124

R

Rabinowitz, W.M.106, 124
 Radeau, M.17, 18, 52, 119
 Raichle M.E.95, 124
 Rainey, L.87, 122
 Ramachandran, V.S.9, 106, 124
 Ramsay, S.78, 94, 118
 Rascol, A.78, 94, 118
 Ravizza, S.M.75, 98, 117
 Raybaudi, M.32, 42, 78, 125
 Redfern, B.B.94, 119
 Reed, C.M.106, 124
 Reisberg, D.6, 7, 9, 25, 30, 38, 39, 40, 66, 75,
 76, 78, 105, 116, 117, 124, 126
 Reuter-Lorentz, P.A.77, 98, 121
 Riecker, A.78, 79, 81, 94, 115, 118, 124
 Rizzolatti, G.94, 110, 111, 112, 113, 117, 118,
 119, 121, 125, 126
 Robson, J.73, 103, 106, 116
 Rochet-Capellan, A.61, 125
 Rochon, E.74, 127
 Rodriguez, E.99, 125, 126
 Roelofs, A.10, 122
 Rosch, E.48, 126
 Rossetti, Y.41, 118
 Roth, M.32, 42, 78, 125
 Rousset, I.15, 44, 49, 51, 53, 125, 126, 128, 129
 Rowe, J.110, 120
 Ruchkin, D.S.75, 125
 Ruhlen, M.51, 116

S

Sabb, F.W.81, 116
 Sack, A.T.113, 125
 Salamé, P.71, 105, 125
 Santi, A.94, 125
 Saults, J.S.72, 117
 Sawatomo, N.110, 126

Scherfler, C.110, 126
 Schumacher, E.H.77, 97, 98, 121, 125
 Schwartz, J.-L.3, 6, 49, 50, 62, 102, 106, 107,
 115, 116, 125, 128, 129
 Schwoebel, J.9, 97, 125
 Scott, S.K.78, 79, 94, 95, 96, 116, 125, 127
 Segebarth, C.32, 42, 78, 97, 115, 125, 128, 129
 Seitz, R.J.94, 113, 117
 Seron, X.49, 81, 120, 125
 Servos, P.94, 125
 Shallice, T.69, 73, 125
 Sharma, T.76, 77, 117, 120
 Shattuck-Hufnagel, S.10, 125
 Shergill, S.S.93, 95, 96, 125
 Shibasaki, H.77, 93, 97, 99, 123
 Shiffrin R.M.68, 115
 Shimada, Y.78, 123
 Shoaf, L.9, 12, 17, 40, 41, 43, 55, 56, 59, 60,
 76, 80, 124, 126
 Shorvon, S.85, 119
 Silbersweig, D.A.93, 95, 123
 Simmons, A.96, 125
 Sirigu, A.8, 42, 126
 Skinhoj, E.78, 122
 Smith, A.M.93, 97, 99, 122
 Smith, E.76, 77, 92, 93, 97, 98, 99, 117, 121,
 125, 126
 Smith, J.D.7, 9, 25, 30, 38, 39, 40, 66, 76, 78,
 105, 124, 126
 Sock, R.3, 6, 10, 62, 126
 Solier, R.G.12, 120
 Sonenshine, M.7, 25, 30, 38, 39, 40, 66, 78,
 105, 124
 Speidel, G.E.104, 126
 Sperry, R.W.40, 126
 Stefan, H.85, 119
 Stefanuto, M.50, 107, 115
 Stetson, R.H.2, 15, 126
 Stevens S.S.6, 126
 Strafelle, A.113, 127
 Stricker, S.8, 42, 126
 Suckling, J.76, 121
 Sugiura, M.97, 127
 Suiani, C.32, 42, 78, 124
 Summerlin, J.L.87, 122
 Swanson, S.J.81, 127

T

Tai, Y.F.110, 126
 Talairach, J.83, 126
 Theodore, W.H.78, 94, 116
 Thierry, G.82, 118
 Thompson, E.48, 126
 Thompson, W.L.7, 121
 Thomson, N.70, 71, 72, 103, 115
 Tournoux, P.83, 126
 Treiman, R.7, 44, 126
 Tuller, B.12, 15, 41, 42, 56, 59, 60, 118, 120,
 126
 Twieg, D.B.82, 123

Tzourio-Mazoyer, N....81, 82, 83, 84, 94, 123,
124, 126

U

Umilta, M.A. 111, 121

V

Vallar, G. 72, 73, 74, 115, 126
Vallée, N. 15, 44, 49, 126, 128, 129
Van Mier, H. 95, 124
Van Mier, H., 95, 124
Varela, F. 48, 99, 125, 126
Vatiokis-Bateson, E. 94, 118, 125
Vazquez, M. 12, 120
Vilain, A. 50, 107, 115
Vitevitch, M.S. 11, 126
von Holst, E. 40, 127
Vroomen, J. 106, 118

W

Wagner, A. 78, 94, 98, 118, 124
Walsh, V. 113, 127
Warburton, E. 94, 116
Warren, M.R. 7, 9, 40, 60, 76, 127
Warrington, E.K. 69, 73, 125
Watanabe, J. 97, 127
Watanabe, Y. 97, 127
Waters, G. 74, 127
Watkins, K. 113, 127
Waugh, L. 6, 40, 49, 121
Weiskrantz, L. 71, 121

Weismer, G. 73, 121
Welsh, A. 71, 117
Whalen, D.H. 103, 122
Wildgruber, D. .. 78, 79, 81, 94, 95, 118, 124, 127
Williams, S.C. 76, 93, 95, 121, 125
Williams, S.C.R. 76, 121
Willis, C.R. 77, 98, 121
Wilson, B. 73, 103, 115
Wilson, M....9, 25, 30, 39, 40, 66, 76, 97, 104,
105, 108, 126, 127
Wise, R....78, 79, 94, 95, 96, 103, 116, 118, 123,
124, 125, 127
Wittmann, R. 12, 42, 60, 124
Wolpert, D.M. 41, 116, 127
Worsley, K.J. 86, 87, 119
Wulf, G....9, 10, 17, 39, 40, 43, 60, 61, 76, 80,
122

Y

Yetkin, F.Z. 81, 127
Yin, C....9, 10, 11, 17, 39, 40, 43, 60, 61, 76, 80,
122, 127

Z

Zago, L. 81, 94, 123, 124
Zatorre R.J. 78, 118
Zatorre, R.J. 78, 118
Zeffiro, T.A. 78, 94, 116
Ziegler, W. 95, 127
Zilles, K. 94, 113, 117

Index des Figures

Figure 1 : Le phénomène d’ambiguïté globale.....	7
Figure 2 : Exemple d’activation des unités représentationnelles dans le modèle NST.....	10
Figure 3 : Organisation temporelle des événements acoustiques des séquences /psə/, /səp/, /əps/, /spə/, /pəs/ et /əsp/.....	18
Figure 4 : Vue schématique des principaux lieux d’articulation et résonateurs de l’appareil phonatoire.....	19
Figure 5 : Procédure d’acquisition des images vidéos par l’intermédiaire de 2 caméras face et profil.....	21
Figure 6 : Haut. Exemple de décours temporel de l’aire aux lèvres lors de la production de la séquence /səp/ à débit fixe. Bas. Représentation schématique des index de phasage entre gestes d’ouverture bilabiale et de friction.....	22
Figure 7 : Variations de l’index de phasage des séquences en fonction de la durée du cycle durant la condition de répétition accélérée.....	22
Figure 8 : A - Variations de l’index de phasage des séquences en fonction de la durée du cycle durant la condition de répétition maintenue à vitesses constantes. B - Représentations des différences entre moyennes des index de phasage.....	24
Figure 9 : Relations entre production et perception d’une action.....	42
Figure 10 : Organisation temporelle des séquences /pa.ta/, /pi.ti/ et /po.to/.....	53
Figure 11 : Le modèle multi-composantes de mémoire de travail de Baddeley & Hitch.....	69
Figure 12 : Le modèle de Boucle Phonologique.....	70
Figure 13 : Tentative de mapping des composantes de la Boucle Phonologique et de l’Administrateur Central.....	77
Figure 14 : Décours temporel de l’acquisition des données d’une série fonctionnelle.....	83
Figure 15 : Représentation temporelle schématique d’une condition de transformation verbale.....	83
Figure 16 : Chaîne de pré-traitements des images.....	85
Figure 17 : Analyse à effets fixes – Projections dans l’espace stéréotaxique des activations observées pour le contraste [VT –baseline].....	88
Figure 18 : Analyse à effets fixes – Projections sur le template ‘T1_152’ (coupes axiales) des activations observées pour le contraste [VT –baseline].....	89
Figure 19 : Analyse à effets aléatoires – Projections dans l’espace stéréotaxique des activations observées pour le contraste [VT –baseline].....	91
Figure 20 : Réseau neural des transformations verbales.....	93
Figure 21 : Modèle neural de perception et de production du langage.....	96
Figure 22 : Vue latérale du cerveau d’un singe macaque.....	109
Figure 23 : Exemple d’actions orofaciales transitives et intransitives pour lesquelles l’activation de neurones miroirs de l’aire F5 a été observée.....	111
Figure 24 : Gauche : Somatotopie des cortex moteur et somatosensoriel. Droite : Activations des cortex prémoteur et pariétal lors de l’observation d’actions transitives et intransitives.....	112

Index des Tables

Table 1 : Expérience de transformation verbale - Fréquence des transformations observées selon différentes conditions de répétition.....	8
Table 2 : Classification des séquences sélectionnées en fonction de leur degré de phasage respectif et hypothèses de transformations préférentielles.	20
Table 3 : Expérience de transformation verbale, procédure de répétition ouverte – (A) Fréquence des transformations et stabilités observées des séquences. (B) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 1. (C) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 2.	26
Table 4 : Durée moyennes de production de chacune des séquences, extraite en début et fin d'enregistrements. Procédure de répétition ouverte.....	28
Table 5 : Expérience de transformation verbale, procédure de répétition interne – (A) Fréquence des transformations et stabilités observées des séquences. (B) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 1. (C) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 2.	31
Table 6 : Expérience de transformation verbale, procédure contrôle de répétition ouverte – (A) Fréquence des transformations et stabilités observées des séquences. (B) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 1. (C) Stabilité et attractivité pondérée des séquences du Groupe 2.	35
Table 7 : Durée moyennes de production de chacune des séquences, extraite en début et fin d'enregistrements. Procédure contrôle de répétition ouverte.....	36
Table 8 : Hiérarchies des séquences en termes de différences significatives d'attractivité et de stabilité dans les trois expériences.....	38
Table 9 : Fréquence en pourcentage des structures syllabiques de la base de données ULSID.	44
Table 10 : Expérience de Transformation Verbale, procédure de perception. Moyennes du nombre de transformations et de formes uniques rapportées en fonction des séquences.....	55
Table 11 : Expérience de Transformation Verbale, procédure de perception. Fréquence et nombre moyen des transformations présentant une forme identique à la séquence répétée, à la forme inverse ou à une autre transformation.....	56
Table 12 : Fréquence en pourcentage des principales structures syllabiques des transformations rapportées.....	57
Table 13 : Expérience de Transformation Verbale, procédure de perception. Fréquence et durée moyenne de stabilité perceptive des transformations présentant une forme identique à la séquence répétée, à la forme inverse ou à une autre transformation.....	57
Table 14 : Tableau récapitulatif des perturbations de l'Effet de Transformation Verbale, lors des paradigmes expérimentaux de perception et de production, liées aux différents effets associés à la Boucle Phonologique.	75
Table 15 : Localisation dans l'espace stéréotaxique et aires de Brodmann (BA) associées des activations observées pour le contraste [VT – baseline]. Analyse à effets fixes.....	88
Table 16 : Localisation dans l'espace stéréotaxique et aires de Brodmann associées des activations observées pour les contrastes [VT – baseline].....	90
Table 17 : Localisation dans l'espace stéréotaxique et aires de Brodmann (BA) associées des activations observées pour le contraste [VT – baseline]. Analyse à effets aléatoires.	91

Table des Matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	iii
Abstract.....	iii
- Avant Propos -	
La Parole Cognitive : Avancées vers une Théorie de la Perception pour le contrôle de l'Action	
La Parole Cognitive	2
- Chapitre Premier -	
Représentations Multistables des Unités de Parole	
L'Effet de Transformation Verbale.....	6
Syllabes Neckeriennes, Syllabes Enactées.....	6
Un Phénomène Purement Perceptif ?	9
- Chapitre II -	
Contraintes de Contrôle Articulatoire dans l'Effet de Transformation Verbale	
Introduction.....	14
Hypothèse d'un Biais d'Asymétrie dans les Transformations Verbales	14
Evidences Expérimentales de Phasages Articulatoires	17
Matériel Phonétique	17
Hypothèses de Transformations Préférentielles	19
Existence de Mécanismes Dynamiques de Phasage Inter-Articulatoires	20
Procédure.....	21
Résultats	22
Expérience de Transformation Verbale: Procédure de Répétition Ouverte	25
Méthode Expérimentale	25
Sujets	25
Procédure.....	25
Résultats	26
Procédure de parsing glissant	27
Stabilités et transformations préférentielles.....	26
Analyses temporelles.....	28
Test d'un effet d'attaque glottique.....	28
Discussion	29
Expérience de Transformation Verbale: Procédure de Répétition Interne.....	30
Méthode Expérimentale	30
Sujets	30
Procédure.....	30
Résultats	31
Procédure de parsing glissant	32
Stabilités et transformations préférentielles.....	32
Discussion	32

Expérience de Transformation Verbale: Procédure Contrôle.....	34
Méthode Expérimentale.....	34
Sujets	34
Procédure	34
Résultats	34
Procédure de parsing glissant.....	35
Stabilités et transformations préférentielles.....	35
Analyses temporelles.....	36
Test d'un effet d'attaque glottique.....	36
Discussion.....	37
Comparaison des Résultats des Expériences	37
Discussion Générale.....	39
Implication des Systèmes de Perception et de Production de la Parole.....	40
Contre-Hypothèses Lexicales et Phonologiques.....	43
Résumé.....	46
Abstract.....	46

- Chapitre III -

Un Corrélât Perceptif de l'Effet LC

Introduction.....	48
Vers une Naturalité des Inventaires Phonologiques.....	48
La Théorie Frame-then-Content.....	49
Du babillage aux tendances universelles syllabiques.....	50
L'Effet LC.....	51
Expérience de Transformation Verbale: Procédure de Perception.....	52
Méthode Expérimentale.....	52
Sujets	52
Matériel Phonétique.....	52
Procédure	53
Résultats	54
Analyse Globale.....	54
Test d'un couplage par paire des transformations.....	55
Test d'une structure syllabique préférentielle des transformations.....	57
Discussion.....	58
Discussion Générale.....	59
Dynamique des Transformations Verbales.....	59
Interprétations Lexicales des Transformations.....	60
Un Corrélât Perceptif de l'Effet LC.....	61
Résumé.....	63
Abstract.....	63

- Chapitre IV -

La Mémoire de Travail, Siège des Transformations Verbales

Introduction.....	66
Vers une Nature Duale de la Mémoire.....	67
Les premières mesures de la capacité mnésique.....	67
L'oubli en mémoire à court terme : Déclin de la trace mnésique et interférence.....	67
Le modèle modal d'Atkinson & Shiffrin.....	68
Le modèle multi-composantes de mémoire de travail de Baddeley & Hitch.....	69
La Boucle Phonologique.....	70
Les effets expérimentaux.....	70
L'apport de la neuropsychologie.....	72
Ecologie de la Boucle Phonologique.....	74

La Boucle Phonologique, Siège des Transformations Verbales ?	75
Hypothèses Neuro-Anatomiques	76
Neuroanatomie Fonctionnelle des Transformations Verbales	80
Méthode Expérimentale	80
Sujets	80
Matériel Phonétique.....	80
Procédure.....	80
Paradigme Expérimental	82
Acquisition des Données	83
Pré-traitement des données.....	84
Modèle statistique et inférences : Analyse multi-sujets à "effets fixes"	85
Modèle statistique et inférences : Analyse à effets aléatoires.....	87
Résultats	87
Analyse à effets fixes.....	87
Analyse à effets aléatoires	90
Discussion Générale.....	92
Engagement de la Boucle Phonologique	92
Existence d'un couplage frontal-pariétal.....	93
L'analyse de l'action dans l'aire de Broca	94
Activations des aires sensorimotrices.....	95
Mapping des représentations acoustiques et articulatoires	96
Emergence Consciente des Représentations Verbales et Mécanismes de Prise de Décision	98
Résumé.....	100
Abstract.....	100
- Discussion -	
Vers une Perception Active des Unités de Parole	
Vers une Perception Active des Unités de Parole	102
Arguments pour une Nature Articulatoire de la Boucle Phonologique	102
Vers un Système de Communication/Imitation fondé sur la Reconnaissance Gestuelle.....	107
Bibliographie.....	115
Liste des Publications.....	128
Index des Auteurs	130
Index des Figures & Tables	136
Table des Matières	138

Résumé

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, visant à souligner la dépendance des représentations mentales phonologiques à des contraintes purement articulatoires, ont emprunté au domaine scientifique de la cognition motrice l'idée d'un couplage fonctionnel, d'une co-structuration, des mécanismes de perception, de simulation mentale et de production des gestes de parole. Le paradigme central de ce travail est celui de l'Effet de Transformation Verbale, reposant sur la notion de formes perceptives multistables, et qui fournit un accès original aux mécanismes d'interaction sensorimotrice en relation avec l'imagerie auditive et la mémoire de travail. Les hypothèses formulées, notamment celle d'une mise en forme de certains des principes et paramètres de la phonologie par des contraintes sensorimotrices ou encore celle d'un fonctionnement de la mémoire de travail basé sur le traitement des représentations acoustiques et articulatoires, s'inscrivent dans une conception d'un système de perception de la parole orientée vers et pour le contrôle de l'action. Dans ce cadre théorique, la perception de la parole consisterait en l'ensemble des processus perceptifs permettant au niveau segmental de récupérer et contraindre les cibles et phases des gestes vocaux, mécanismes fournissant par là-même un ensemble de représentations utilisées pour le suivi et la compréhension des actions perçues mais aussi le contrôle et la spécification de nos propres actions. Les résultats obtenus lors d'expériences comportementales et de neuroimagerie fonctionnelle confirment le rôle des contraintes actionnelles dans la perception multistable de la parole et démontrent l'implication de la mémoire de travail verbale dans l'émergence des représentations perceptives. Dès lors, que ce soit dans le contrôle exécutif, la simulation mentale ou encore la perception des gestes de parole, ces "représentations partagées", pourraient être à la base des mécanismes de reconnaissance des unités de parole.

Mots Clés: Imagerie Auditive, Effet de Transformation Verbale, Phasages Articulatoires, Représentations Motrices, Mémoire de Travail Verbale, Systèmes de Production et de Perception de la Parole.

Abstract

In recent years, the studies of cerebral and cognitive systems implied in the control and the analysis of actions have provided empirical evidence towards a functional intertwining between perception, execution and mental imagery of actions. Within the framework of speech sciences, the aim of this thesis was to test the existence of purely motor constraints in the birth and analysis of mental phonological forms. The experimental paradigm of this work is that of the Verbal Transformation Effect, resting on the concept of multistable speech perception and providing an original access to sensorimotor interactions in relation to auditory imagery and working memory. By suggesting that phonology could be constrained, in some part, by sensorimotor properties and that verbal working memory could rely on both acoustical and articulatory representations, our hypotheses converge towards the idea of a speech perception system directed towards and for action control. Both behavioural and functional neuroimaging results confirm the existence of purely motor constraints in the multistable perception of speech and demonstrate the verbal working memory involvement during the emergence of perceptual representations. Involved in the executive control, the mental simulation or the perception of speech gestures, these "shared representations" could then form a basis for the recognition of speech units.

Key-Words: Auditory Imagery, Verbal Transformation Effect, Articulatory Phasing, Motor Representations, Verbal Working Memory, Speech Perception and Production Systems.
