



HAL
open science

Bases neurales de la compréhension de la phrase affective

Virginie Beaucousin

► **To cite this version:**

Virginie Beaucousin. Bases neurales de la compréhension de la phrase affective : Des fonctions ortholinguistiques à la prosodie affective. Neurosciences. Université Caen Basse Normandie, 2006. Français. NNT: . tel-01576051

HAL Id: tel-01576051

<https://hal.science/tel-01576051>

Submitted on 22 Aug 2017

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



UNIVERSITE de CAEN / BASSE-NORMANDIE

UFR de MEDECINE

ECOLE DOCTORALE NORMANDE CHIMIE BIOLOGIE

THESE

Présentée par

M^{lle} Virginie Beaucousin

Et soutenue

Le 5 Décembre 2006

En vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'UNIVERSITE de CAEN

Spécialité Physiologie, biologie des organismes, populations, interactions

(Arrêté du 7 Août 2006)

BASES NEURALES DE LA COMPREHENSION DE LA PHRASE AFFECTIVE :

Des fonctions ortholinguistiques à la prosodie affective



MEMBRES du JURY

Directrice de thèse : Dr Nathalie Tzourio-Mazoyer, DR CEA

Co-directrice de thèse : Pr Anne Lacheret-Dujour, Université Caen

Dr Martin Meyer, Université Zurich, Suisse (Rapporteur)

Dr Mireille Besson, Université Aix en Provence, DR CNRS (Rapporteur)

Je tiens à remercier :

Monsieur le Professeur Bernard Mazoyer de m'avoir accueillie dans son laboratoire, guider dans les méandres des statistiques et de la rédaction d'article,

Madame le Docteur Mireille Besson, et Monsieur le Docteur Martin Meyer d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse,

Madame le Docteur Nathalie Tzourio-Mazoyer pour m'avoir appris le métier (pas toujours facile) de chercheur et fait découvrir le monde passionnant de la neuroimagerie,

Madame le Professeur Anne Lacheret-Dujour pour m'avoir ouvert la perspective d'un travail inter-disciplinaire,

Madame Marie-Renée Boudou-Turbelin pour sa participation plus qu'active dans la mise au point et les analyses des études psycholinguistiques et pour son soutien sans faille au cours de ces quatre années,

Monsieur Michel Morel 'l'inventeur' de Kali pour sa collaboration dans la mise au point du corpus,

Madame Arlette Pineau, notre rayon de soleil et Monsieur Gaël Jobard pour m'avoir permis d'enseigner,

Emmanuel Melet et Anne-Marie Melot qui m'ont fait partager leurs connaissances dans les domaines de la théorie de l'esprit ; Sylvain Moutier, Sandrine Rossi, Laure Zago et Olivier Houdé pour l'initiation au raisonnement ; Cyril Courtin pour la découverte de la langue des signes ; Fabrice Crivello, Marc Joliot, Laurent Petit pour leur formation à l'anatomie cérébrale et les scripts d'analyse sous matlab ; Perrine Brazo, Pascal Dellamillieure, Sonia Dollfus pour m'avoir admis dans le club sélecte de 'la schizophrénie',

Guy Perchey, l'irremplaçable collègue des 'manips' et du déjeuner ; Nicolas Delcroix et Frank Lamberton, les sauveteurs de l'IRM ; Anito Foro et Carole Loslier les gardiennes des clés parfois inaccessibles des démarches administratives,

Annick, Blandine, Gaëlle, Gregory, Jeanne, Laetitia (ma sœur astrale), Laurent, Mathieu (mon voisin de bureau), Mélanie, Nicolas (Un Duke), Pauline, Pierre-Yves (le fou savant), Isabelle et Hélène (les Dukies) pour leur contribution tant amicale que professionnelle à ce travail,

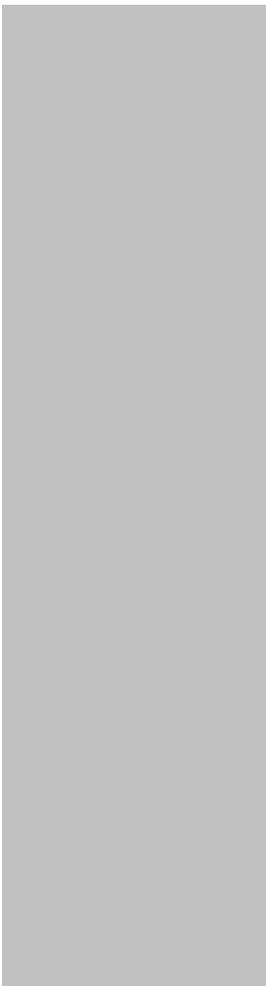
Aux membres du LNBAK de cœur et de fait, Régis, Doriane, Laurence et Jean, pour m'avoir donné le goût de la recherche et tant offert en amitié,

Mes parents, Anne et Emilie sans qui rien n'aurait été possible et qui ont toujours été là pour moi ; ainsi que ma belle-famille et Marcel(le) alias Marine pour la découverte de la Touraine et des Tourangeaux qui m'ont si généreusement accueillie,

Enfin Vincent pour qui les mots ne suffisent pas.

INTRODUCTION GENERALE	3
I. LA PROSODIE AFFECTIVE.....	8
1. L'IMPORTANCE DE LA PROSODIE AFFECTIVE DANS LA COMMUNICATION	8
2. DONNEES DE LA LINGUISTIQUE, LA NEUROPSYCHOLOGIE ET LA NEUROIMAGERIE SUR LA PROSODIE AFFECTIVE	10
II. OBJECTIFS ET PLAN DE LA THESE	23
LES BASES NEURALES DU LANGAGE DANS L'HEMISPHERE GAUCHE : UNE META-ANALYSE DE LA LITTERATURE.....	26
I. INTRODUCTION	27
II. METHODE.....	28
1. CRITERES DE SELECTION.....	28
2. SEGREGATION SPATIALE DES PICS.....	41
3. LIMITES DE L'APPROCHE.....	43
III. RESULTATS	44
IV. DISCUSSION.....	51
ETUDES DE LA COMPREHENSION DE LA PHRASE AFFECTIVE.....	75
I. MISE AU POINT D'UN CORPUS DE PHRASES	77
1. CONSTRUCTION DU CORPUS DE PHRASES	78
2. VALIDATION PSYCHOLINGUISTIQUE DU CORPUS	84
3. CONCLUSION	85
II. ETUDE PSYCHOLINGUISTIQUE DE L'IMPACT DE LA PROSODIE AFFECTIVE SUR LA COMPREHENSION DE PHRASE A CONTENU LEXICAL AFFECTIF	86
1. SUJETS ET PROTOCOLE	87
2. ANALYSE	89
3. RESULTATS.....	90
4. RECAPITULATIF DES RESULTATS COMPORTEMENTAUX	97
5. QUESTIONNAIRE POST-EXPERIMENTAL	99
6. DISCUSSION	100
III. LES BASES NEURALES DE LA COMPREHENSION DE PHRASES AFFECTIVES.....	105
1. MATERIEL ET METHODES	106
2. RESULTATS.....	118

3. DISCUSSION	131
4. CONCLUSION	157
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	159
I. CONCLUSION	160
II. PERSPECTIVES	164
BIBLIOGRAPHIE.....	168
PUBLICATIONS.....	187
I. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DANS DES REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE	188
II. CHAPITRE DE LIVRE	188
III. COMMUNICATIONS INTERNATIONALES AFFICHEES.....	189
ANNEXES.....	190
I. ANNEXE 1 : PRINCIPE DE L'IRM ET ANALYSE DES DONNEES FONCTIONNELLES	191
1. PRINCIPE DE L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE	191
2. TRAITEMENT DES IMAGES ANATOMIQUES ET FONCTIONNELLES.....	197
3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	203
4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES	206
II. ANNEXE 2 : TABLES DE CONTRASTES DE LA META-ANALYSE.....	216
III. ANNEXE 3 : CORPUS DE PHRASES.....	278
1. PHRASES NEUTRES	278
2. PHRASES EMOTIONNELLES	280
3. PHRASES ATTITUDINALES.....	284
IV. ANNEXE 4 : POST-TESTS DE L'ETUDE PSYCHOLINGUISTIQUE.....	289
1. POST-TESTS DES DONNEES COMPORTEMENTALES ACQUISES AU COURS DE L'ETUDE PSYCHOLINGUISTIQUE (CHAPITRE 2, PARAGRAPHE II).....	289
2. POST-TESTS DES DONNEES COMPORTEMENTALES ACQUISES DANS L'ETUDE FONCTIONNELLE SUR LE DISCOURS AFFECTIF (CHAPITRE 2, PARAGRAPHE III)	290
V. ANNEXE 5 : LISTE DES ABBREVIATIONS.....	292
VI. ANNEXE 6 : GLOSSAIRE.....	294
VII. ANNEXE 7 : TABLE DES FIGURES	297



Introduction générale

*« Il y a autant de mouvements dans la voix qu'il y a de mouvements dans l'esprit,
et l'esprit est profondément affecté par la voix » Cicéron, De oratore*

La **neurolinguistique** est une discipline qui s'attache à explorer la représentation cérébrale du langage (Van Lancker Sidtis, 2006). Cette discipline a fait son apparition avec les études chez les patients cérébrolésés (Cohen et Hecaen, 1965). Et comme il a été souligné récemment par Noam Chomsky et coauteurs, l'interdisciplinarité est absolument indispensable pour mieux comprendre la faculté de communiquer via un système langagier élaboré (Hauser *et al.*, 2002), et notamment entre la linguistique qui définit les niveaux d'organisation du langage, la neuropsychologie et la neuroimagerie qui explore le fonctionnement cérébral. Nous aborderons ici la compréhension de la phrase affective sous ces différents points de vue, afin de mieux comprendre ses bases neurales.

De manière générale, le **langage** est une des fonctions de représentation à la disposition de l'être humain. La communication langagière repose sur l'interaction entre un émetteur (ou locuteur), qui envoie un message codé, et un récepteur (ou interlocuteur), qui peut décoder ce message (modèle de communication de Shannon et Weaver, 1948). Ce message peut être décomposé en deux éléments : les éléments ortholinguistiques et les éléments paralinguistiques (Van Lancker Sidtis, 2006).

Définissons du point de vue linguistique ces différents éléments (Lacheret-Dujour et Beaugendre, 1999).

Les **éléments ortholinguistiques** sont au nombre de cinq : la *composante phonétique* concerne les sons du langage ; la *composante phonologique* représente l'organisation de ces sons au sein du message pour former des morphèmes (plus petites unités de sons porteuses de sens) ; la *composante morphologique*¹ correspond à la combinaison des morphèmes pour former des éléments du lexique (qui correspond à l'ensemble des mots) ; la *composante syntaxique* représente le niveau d'organisation des morphèmes pour former les énoncés signifiants ; et enfin la *composante sémantique* concerne l'association des signifiés (ou concept) aux signifiants qui constituent les unités lexicales (Figure 1).

Ce message est également véhiculé par les **éléments paralinguistiques** du langage. Ce sont des éléments qui accompagnent le discours et permettent d'étoffer et de compléter le message véhiculé par les éléments ortholinguistiques. Ces éléments paralinguistiques sont les expressions faciales, les gestes, le contexte énonciatif (thème, sujet de la conversation, humour), les inférences et la prosodie affective ou intonation émotionnelle de la voix (Figure 1).

¹ La composante morphologique est peu étudiée à l'heure actuelle en neuroimagerie (Friederici *et al.*, 2000).

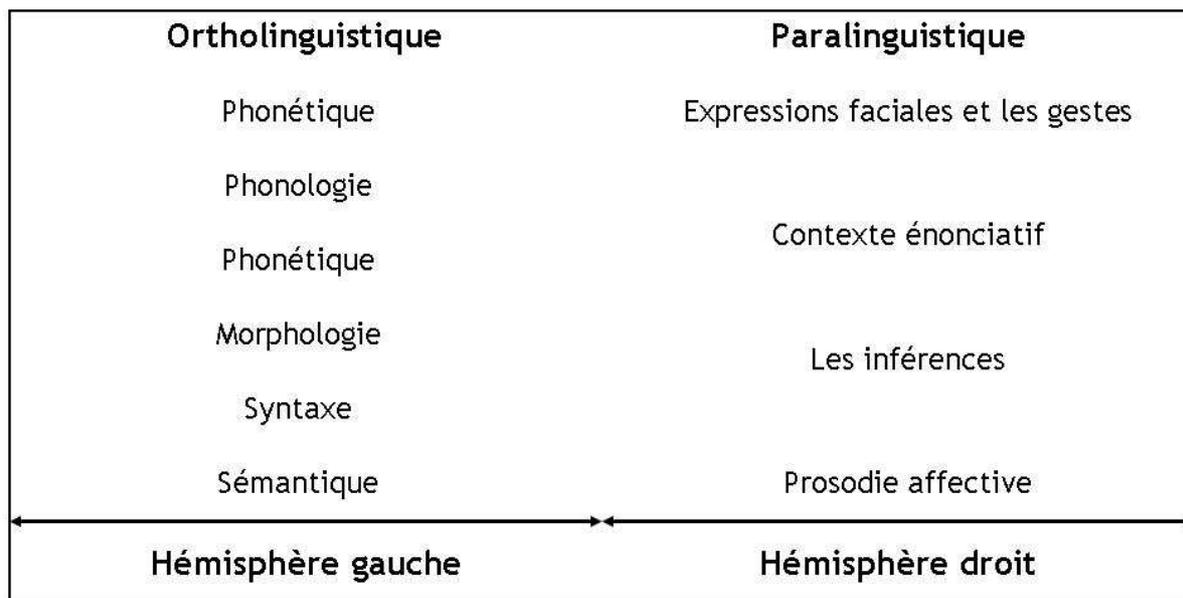


Figure 1. Modèle standard des niveaux et des éléments traités par le cerveau au cours de la communication humaine (adapté de Van Lancker Sidtis, 2006).

Sur ce schéma, en haut sont décrits les différents niveaux d'organisation du langage avec, en bas, leur corrélats neuraux. Notez la différence dans la complexité de la hiérarchisation entre les fonctions définies par la linguistique et les bases neurales correspondantes.

Dans le modèle de Diana Van Lancker Sidtis, si l'organisation des éléments constituant le message à transmettre est bien définie par la linguistique, l'organisation neurale est pour le moins sommaire (Figure 1). Les fonctions ortholinguistiques seraient traitées principalement par l'hémisphère gauche et l'implication de l'hémisphère droit serait liée au traitement des éléments paralinguistiques du langage, c'est-à-dire à la définition du contexte énonciatif, au traitement des gestes et expressions du visage, à la **prosodie affective**.

Par conséquent, une intégration au niveau neural de ces deux types d'informations est nécessaire pour comprendre le message. Comment se déroule l'interaction entre informations ortho- et paralinguistiques au niveau neural pour aboutir à la compréhension du message dans son ensemble ? Pour étudier ce type d'interaction, notre intérêt s'est porté sur l'étude des bases neurales de la compréhension de la phrase affective présentée auditivement. Ce type de traitement nécessite l'intégration des éléments ortholinguistiques de type phonologique, syntaxique et sémantique, (et le niveau morphologique qui a été peu étudié en neuroimagerie, Friederici *et al.*, 2000; si l'on exclut le niveau phonétique traité dans les aires auditives primaires, Boemio *et al.*, 2005) et d'un seul élément paralinguistique. En effet, l'aspect paralinguistique au niveau de la phrase est limité à la prosodie ou intonation affective, car l'effet du contexte énonciatif est restreint au niveau d'une phrase isolée. Dans la suite de chapitre nous allons donc montrer que ce type d'interaction au niveau de la phrase n'a jamais été étudié en neuroimagerie.

Peu d'études de neuroimagerie se sont intéressées au traitement lexical affectif. Seuls deux auteurs l'ont abordé à travers la lecture passive de mots émotionnels² (Beauregard *et al.*, 1997) ou la génération de mots émotionnels³ (Crosson *et al.*, 1999). Ces études ont uniquement abordé le langage affectif au niveau du mot. Or dans ce type de matériel, la dimension paralinguistique est réduite voir inexistante.

En réalité, la littérature de neuroimagerie sur la compréhension de la dimension affective du discours oral a porté essentiellement sur le traitement de l'élément paralinguistique qu'est la prosodie affective (Wildgruber *et al.*, 2002; Kotz *et al.*, 2003; Wildgruber *et al.*, 2004; Wildgruber *et al.*, 2005; Grandjean *et al.*, 2005). Cependant, les paradigmes utilisés dans ces études ont été construits afin de limiter le traitement ortholinguistique.

Ainsi, aucune étude de neuroimagerie n'a, à notre connaissance, exploré l'interaction neurale entre traitement ortho- et paralinguistique au niveau de la compréhension de la phrase. Nous avons choisi dans ce chapitre d'introduction de présenter les travaux de linguistique, de neuropsychologie et de neuroimagerie portant sur la prosodie affective, afin de comprendre en quoi l'étude des bases neurales de la compréhension de la phrase affective nécessite la prise en compte à la fois de l'aspect ortholinguistique et à la fois de l'aspect paralinguistique. Nous exposerons tout d'abord les données issues de la linguistique montrant les interactions de la prosodie avec les différents éléments ortholinguistiques au cours de la compréhension du langage. Nous verrons ensuite que l'exclusion du traitement ortholinguistique dans les paradigmes d'étude de neuroimagerie sur les bases neurales de la prosodie affective pose un certain nombre de problèmes quant à l'interprétation des résultats fonctionnels, et à leur cohérence vis à vis des données neuropsychologiques sur la question.

La description de ces données va permettre de mieux comprendre l'étroite relation entre élément ortholinguistique et prosodie affective, et montrer pourquoi il est important de prendre en compte des deux dimensions pour comprendre les bases neurales de la compréhension de la phrase affective.

² Exemples de mots émotionnels : sexe, meurtre, tristesse.

³ Exemples : génération de mots faisant référence aux jeux d'un parc public, aux desserts, à la maladie, à la mort.

I. LA PROSODIE AFFECTIVE

Dans le langage courant, la prosodie est définie par les termes « intonation » ou « mélodie du langage ». Le choix de présenter les travaux de la linguistique et des neurosciences portant sur la prosodie affective a été motivé par le fait qu'elle constitue, avec les fonctions ortholinguistiques du langage, le cœur de la communication orale affective. Pour débiter, nous verrons en quoi la prosodie affective est indispensable au langage en montrant qu'elle intervient dans la mise en place du langage très précocement, et qu'un trouble de la prosodie affective entraîne un handicap important pour la communication sociale. Puis nous ferons une revue de la littérature linguistique, neuropsychologique et de neuroimagerie sur cette fonction paralinguistique afin de mieux comprendre son interaction avec les fonctions ortholinguistiques au cours de la compréhension du langage.

1. L'IMPORTANCE DE LA PROSODIE AFFECTIVE DANS LA COMMUNICATION

La prosodie affective semble être présente chez l'enfant très tôt au **cours du développement**. En effet, dès le *3ième trimestre de grossesse*, le fœtus peut percevoir l'intonation qui est transmise parfaitement à travers le sac amniotique (pour une revue voir Querleu *et al.*, 1988).

Après la naissance, pour communiquer avec des tout-petits, les parents utilisent le *parlé bébé* (ou *motherese* en anglais). Cette manière de s'exprimer repose sur une accentuation très exagérée du discours par rapport au mode de communication entre adulte et permet d'individualiser les sons du langage. Elle s'apparenterait à une forme de prosodie affective (voir la réponse de Monnot à l'article de Falk, 2004). La compréhension du discours dirigé vers l'adulte a été comparé à celle du parlé bébé chez des adultes (Fernald, 1989). Afin de prendre en compte uniquement la dimension prosodique de ces deux modes de communication, une opération de filtrage du signal de parole permet d'enlever tous les éléments segmentaux du discours (contenu lexical). Ainsi traité, le discours donne l'impression d'être entendu à travers une porte. Lorsque l'on confronte des adultes à ces deux types de communication filtrée, ils ont plus de difficulté à reconnaître

l'intention communicative du discours filtré dirigé vers les adultes que celle du parlé bébé filtré (Fernald, 1989). Ces résultats montrent que l'intonation véhiculerait donc son propre sens plus particulièrement marqué dans le discours dirigé vers l'enfant. Ainsi le très jeune enfant peut accéder au sens d'un énoncé en s'appuyant sur la prosodie, avant d'être capable de bien décoder le contenu lexico-syntaxique vers l'âge de deux ans (Boysson-Bardies, 1996)

Cette notion de préséance de la prosodie sur le contenu lexical au cours du développement du langage peut être appliquée à *l'apparition phylogénétique du langage*. En effet, Dean Falk propose qu'au cours de la préhistoire, les femmes des tribus de chasseurs-cueilleurs étaient obligées de laisser leurs enfants à terre pendant la cueillette. Afin de calmer leurs pleurs, et de limiter la sensation d'abandon liée à la perte du contact physique avec la mère, ces femmes auraient développé une sorte de communication via des nuances intonatives (Falk, 2004). Ce mode de communication, reposant sur une forme proche de la prosodie affective, aurait évolué par la suite pour donner naissance au protolangage (qui n'est plus utilisé). Ce protolangage aurait compris un contenu phonologique, lexical et syntaxique simple. Toutefois, la prosodie aurait gardé une place essentielle voire majoritaire dans la compréhension de ce protolangage. Il avait sans doute une visée communicative simple et directe, ne nécessitant qu'une intervention minimale d'un contenu ortholinguistique élaboré. Ce protolangage aurait ensuite évolué vers le langage parlé que nous utilisons tous les jours. Ce langage parlé intégrerait une dimension syntaxique plus complexe permettant une communication plus élaborée (Falk, 2004). C'est à ce niveau de l'évolution du langage que les éléments ortholinguistiques auraient pris une place aussi importante que la prosodie dans la compréhension du langage.

Ainsi, au cours du développement et au cours de l'apparition du langage, le rôle de la prosodie affective aurait diminué dans la compréhension de l'intention communicative au profit des fonctions ortholinguistiques. Mais nous allons voir qu'elle joue toujours un rôle fondamental dans la **communication chez l'adulte**. Une atteinte de la production de la prosodie affective entraîne un handicap sérieux conduisant à l'incompréhension de l'entourage, à l'exclusion de la vie sociale. Ainsi a été relaté le cas d'une institutrice dont la lésion cérébrale gênait l'exercice de ses fonctions. Elle était en effet incapable de maintenir la discipline dans sa classe ne pouvant associer ses paroles à un ton congruent de colère et d'autorité. De même, un homme, suite à un accident vasculaire cérébral, parlait un langage dépourvu de toute intonation ne lui permettant pas de montrer son attachement à son épouse, ce qui a entraîné une rupture conjugale (Ross et Mesulam,

2000). Ainsi les informations ortholinguistiques seules ne suffisent pas à la compréhension et à la production verbale au cours des interactions sociales, la prosodie affective reste indispensable pour l'homme.

2. DONNEES DE LA LINGUISTIQUE, LA NEUROPSYCHOLOGIE ET LA NEUROIMAGERIE SUR LA PROSODIE AFFECTIVE

Même si elle joue un rôle fondamental dans la communication, la prosodie affective n'a fait l'objet que de peu d'études en neurosciences. Si le premier cas d'aphasie a été décrit au 19^{ième} siècle (pour une revue du point de vue historique des travaux de l'aphasiologie voir Etard, 2003), la notion de troubles de la compréhension ou de la production de la prosodie affective, désignés sous le terme d'**aprosodie**, n'a fait son apparition dans la littérature qu'après la seconde guerre mondiale (Ross et Mesulam, 2000).

La prosodie est également un parent pauvre de la linguistique : alors qu'il existe de nombreux modèles du traitement ortholinguistique, peu de travaux ont cherché à intégrer les paramètres acoustiques (fréquence fondamentale, durée, intensité, voir paragraphe I.2.A.a- , p11) afin de définir un modèle complet et uniforme de la prosodie vis à vis des autres fonctions ortholinguistiques (Lacheret-Dujour et Beaugendre, 1999).

Nous proposerons tout d'abord un modèle de la prosodie d'un point de vue linguistique. Dans la seconde partie, qui sera plus spécifiquement focalisée sur le traitement prosodique affectif au niveau de la phrase, seront présentés les résultats issus de la neuropsychologie et de la neuroimagerie. Si la linguistique s'est appliquée à comprendre les mécanismes aboutissant à la production et à la compréhension de la prosodie, la neuropsychologie s'est attachée à définir un symptôme : l'aprosodie et sa localisation cérébrale. Ces premières études de neuropsychologie se sont principalement intéressées à la spécialisation hémisphérique de la prosodie affective qui apparaissait différente de celles des fonctions ortholinguistiques. L'imagerie fonctionnelle a, à son actif, un nombre très restreint d'études portant sur la prosodie affective qui ont conduit à des résultats différents de ceux apportés par la neuropsychologie.

A. La prosodie du point de vue linguistique

La prosodie correspond à l'organisation suprasegmentale du message⁴, c'est-à-dire qu'elle organise et structure le discours oral et la communication. Nous allons décrire comment elle interagit avec les différents niveaux ortholinguistiques du langage : les niveaux phonétique, phonologique, syntaxique, sémantique et pragmatique (et Lacheret-Dujour et Beaugendre, 1999; pour une revue plus détaillée voir Beaucousin *et al.*, 2003).

a- La prosodie du point de vue phonétique

La prosodie est marquée dans le signal de parole par trois paramètres principaux (Figure 2) :

- La **fréquence fondamentale (F0)** qui dérive de la vibration des cordes vocales. Elle désigne donc l'estimation du son laryngien à partir du signal acoustique à un instant donné. Elle se situe autour de 130 Hz (hertz) pour un homme et de 200 Hz pour une femme (voix plus aigue).
- La **durée** qui correspond à la mesure d'un intervalle de temps nécessaire pour émettre le signal de parole. Elle concerne l'organisation temporelle du message et comprend le débit de parole (nombre de syllabes prononcées dans une unité de temps donnée) et le tempo (accélération ou ralentissement du débit à l'intérieur d'un groupe prosodique et les pauses).
- L'**intensité** qui est relative à l'énergie contenue dans le signal de parole. Elle est mesurée en décibel.

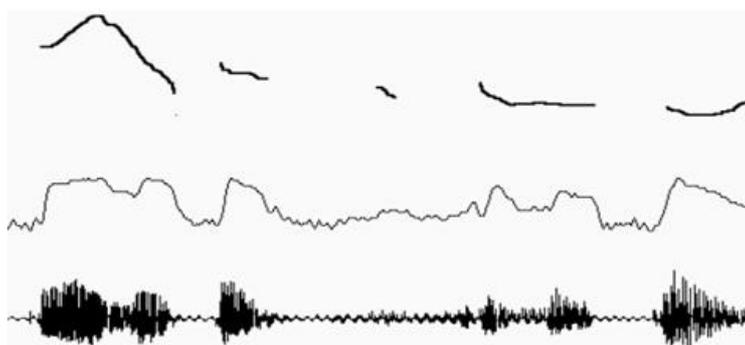


Figure 2. Représentation tridimensionnelle des paramètres prosodiques d'une phrase

Les paramètres acoustiques de la phrase « Paul est parti ce matin ». De bas en haut, sont représentés respectivement le signal acoustique, l'intensité en décibels et la fréquence fondamentale en hertz, au cours du temps (logiciel d'analyse WinPitch, Martin, 1996).

⁴ Par opposition aux éléments segmentaux, à savoir la suite des phonèmes qui se succèdent dans la chaîne parlée (pour discussion sur la pertinence de cette distinction, voir Rossi, 1999b).

b- La prosodie sous l'angle phonologique

Au niveau phonologique, abstrait, il s'agit de rendre compte de l'organisation prosodique en termes de structuration accentuelle, rythmique et intonative du message. La prosodie permet également de dégager des propriétés spécifiques à des types de langues mais également des invariants linguistiques que l'on pourra mettre ensuite en relation avec les contraintes fonctionnelles de nature syntaxique et communicative. Par exemple, elle permet d'identifier et d'individualiser les différents phonèmes du signal de parole. Par là même, elle définit le découpage des mots mais également des unités syntaxiques constituant l'énoncé (les syntagmes, voir paragraphe suivant).

c- Les fonctions syntaxiques de la prosodie

La fonction syntaxique de la prosodie correspond au rôle de la prosodie dans l'organisation grammaticale de la phrase. On peut définir quatre rôles de la prosodie dans ce domaine.

Au niveau de l'organisation globale de l'énoncé, l'intonation permet d'identifier différents types de phrases, c'est-à-dire des **modalités** spécifiques, telles que l'assertion ou l'interrogation. Avec la forme mélodique finale, mais également dès l'occurrence des premiers contours de la phrase, l'auditeur peut prédire la modalité de cette phrase (Aubergé, 1991).

Ces indices intonatifs entrent dans le cadre des universaux du langage (Fonagy, 1983). Ainsi, dans toute langue, une phrase à mélodie finale descendante présente une valeur conclusive. A l'inverse, une mélodie finale montante prend une valeur suspensive d'inachèvement.

Trois autres fonctions syntaxiques sont remplies par la prosodie : une fonction de démarcation, un rôle d'identification de catégories et de fonctions, et une fonction de hiérarchisation (Rossi, 1999a).

Concernant la **fonction démarcative**, l'intonation participe à la segmentation de l'énoncé qui assure la cohésion de la phrase en liant des syntagmes⁵. Ceci entraîne a priori une relation sémantique en marquant une séparation entre deux syntagmes sémantiquement non liés. Cette fonction facilite notamment le traitement des énoncés ambigus pour le locuteur.

Exemple : les constituants entre parenthèses représentent des groupes intonatifs.

(La petite) (brise la glace) / (La petite brise) (la glace)

⁵ Un syntagme est un ensemble de mots formant une unité syntaxique plus petite que la phrase.

(*Il a peint la femme*) (*en noir*) / (*Il a peint*) (*la femme en noir*)

La prosodie concourt à la compréhension du message contenu dans le signal de parole, et permet donc une modulation des énoncés.

La seconde fonction est l'**identification des catégories**. Les contours intonatifs permettent de repérer les différentes catégories syntagmatiques qui composent la phrase, chaque catégorie étant *a priori* ponctuée par un contour terminal spécifique (ex. contour montant pour le syntagme nominal et descendant pour le contour verbal dans « le rhinocéros a chargé le général »).

Enfin, la fonction de **hiérarchisation** de la prosodie revient à superposer à l'arrangement linéaire de l'énoncé une structure hiérarchique. Cette structure hiérarchique est censée correspondre aux degrés d'emboîtement dans l'arbre syntagmatique, c'est-à-dire à la segmentation en syntagme.

Exemple : Il existe une différence de construction intonative entre

(Il a acheté) (un pantalon à carreaux)

(Il a acheté un pantalon) (à Paris)

d- Prosodie et sémantique

L'interaction prosodie / sémantique reste peu explorée dans les langues accentuelles où la prosodie n'est pas convoquée pour la mise au jour de distinctions lexicales. Cela est sans doute dû à la complexité des phénomènes à décrire, de l'instabilité et de l'éparpillement des théories sémantiques développées par les linguistes, mais également parce qu'il n'existe pas encore de moyens automatiques pour la mettre au jour.

Elle a été cependant bien traitée dans les études des langues où elle joue un rôle lexical fondamental, à savoir les langues à ton dans lesquelles les variations de hauteur tonale sont sémantiquement distinctives. Ainsi, en mandarin, chinois, cantonais, les quatre configurations tonales portées par le monosyllabe /*ma*/ permettent d'opposer les paires minimales suivantes : *mère*, *chanvre*, *cheval*, *insulter*...

e- Prosodie et pragmatique

La structure prosodique s'articule autour de deux sous composantes : une structure informationnelle et une structure discursive.

La construction de la **structure informationnelle** repose sur le principe de quantité (Givon, 1995). Sur le plan prosodique, il s'agit de faire varier les proéminences accentuelles en fonction du degré informatif des différents segments de l'énoncé. En

effet, pour indiquer le thème que l'interlocuteur va aborder il doit informer le locuteur par une accentuation. Une fois le thème abordé, l'interlocuteur va fournir l'information nouvelle que l'on souhaite communiquer (le rhème) par une nouvelle proéminence accentuelle.

Exemple : *Sœur Thérèse (a), elle surfe très bien sur le web (b)* ; où (a) constitue le thème et (b) le rhème.

La **fonction discursive** essentielle de la prosodie conditionne les phénomènes de cohésion de l'énoncé, et donc les règles d'enchaînement discursif, les processus argumentatifs et la négociation de point de vue, ainsi que les phénomènes d'emphase comme la coloration affective. Ainsi l'intonation permet de grouper une suite d'unités en un ensemble discursif cohérent.

Par exemple dans la situation d'un *discours argumentatif*, les variations intonatives révèlent les mécanismes de régulation co-énonciative et l'engagement du locuteur par rapport au discours qu'il construit (Morel et Danon-Boileau, 1998). Ainsi, le registre aigu est associé à la fonction d'appel, le niveau moyen reflète la stabilisation d'un échange, le niveau grave indique un désir de clôture et une mise en retrait.

Les *processus de coloration affective* du discours, qui font partie des fonctions pragmatiques du discours, permettent de traduire attitudes et émotions. De ce point de vue, la prosodie est investie d'une double fonction : expressive et impressive.

La fonction impressive ou identificatrice permet à l'auditeur de se rendre compte de l'état émotionnel de son interlocuteur. Les paramètres qui régissent cette fonction sont inconscients, et ne peuvent être que difficilement contrôlables par le locuteur. La fonction expressive ou attitudinale reflète l'intention du locuteur. Il contrôle donc les paramètres régissant cette fonction, en faisant une fonction conventionnalisée pour les individus d'une même communauté linguistique.

f- Conclusion

L'objectif de ce travail étant de comprendre les bases neurales de la prosodie affective, nous nous placerons donc dans le cadre linguistique qui définit les deux processus pragmatiques de coloration affective de la prosodie. Cependant, il faut noter que la prosodie interagit de manière très importante avec les différents niveaux ortholinguistiques dans le message verbal. De ce fait, l'étude des bases neurales des fonctions pragmatiques de la prosodie nécessiterait la prise en compte de ces interactions.

Mais nous verrons par la suite que cela n'a pas toujours été le cas, notamment en neuroimagerie.

B. La prosodie du point de vue de la neuropsychologie et de la neuroimagerie

Comme nous venons de le voir, les interactions entre la prosodie et les éléments ortholinguistiques ont été bien définies en linguistique. Cependant, les travaux issus de la neuropsychologie et de l'imagerie fonctionnelle se sont appuyés sur une classification fonctionnelle beaucoup plus restreinte de ces interactions (voir paragraphe I.2.B.a- , p15). Pourtant, la question des interactions entre prosodie et contenu ortholinguistique est sous-jacente dans les travaux de neuropsychologie. Si le premier objectif des paradigmes utilisés en neuropsychologie a été de diminuer le traitement ortholinguistique du langage afin de mettre en exergue le traitement prosodique, l'importance de ce type de traitement dans la compréhension de la prosodie a, par la suite, été mis en évidence (voir paragraphe I.2.B.c- , p20). Cependant, cette dimension ortholinguistique n'a pas été prise en compte dans les études en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) conduisant à des résultats apparemment divergents avec ceux de la neuropsychologie (paragraphe I.2.B.c- , p20).

a- Définition de la prosodie sous l'angle de la neuropsychologie

La notion de prosodie a été évoquée en neuropsychologie pour la première fois en 1947, à travers l'étude de cas d'une femme dont l'accent avait été modifié suite à une lésion cérébrale. Cette lésion avait provoqué chez elle une altération de l'application des pauses et des accents dans la phrase (Monrad-Krohn, 1947).

A la suite de l'étude de ce cas, Monrad-Krohn a proposé une classification de la prosodie en trois types (Ross et Mesulam, 2000).

Le premier type est la **prosodie grammaticale ou linguistique** : elle permet de clarifier le sens d'une phrase grâce à la variation de l'intonation, de l'accentuation et des pauses. Ainsi, une phrase interrogative se distingue par une augmentation de l'intonation en fin de phrase. Par ailleurs, elle sert à lever les ambiguïtés lexico-syntaxique (Il peint « la femme en noir » ; ce qui signifie que la femme est habillée en noir/ Il peint la femme « en noir » ; ce qui signifie que le noir est la couleur utilisée par le sujet pour peindre la femme, voir paragraphe I.2.A.c- , p12). La prosodie grammaticale représente donc les

fonctions syntaxiques et sémantiques de la prosodie, du point de vue de la linguistique. Ce type de prosodie fait donc partie quasi intégrante des fonctions ortholinguistiques, et ne sera pas traitée indépendamment par la suite dans ce manuscrit (pour une revue de la littérature sur la prosodie grammaticale se référer à Beaucousin *et al.*, 2003).

Le deuxième type est la **prosodie affective**. Elle permet de faire varier le sens littéral d'un énoncé, et assure la fonction pragmatique de la prosodie (voir paragraphe I.2.A.e- , p13). Ce type de prosodie est composé de deux sous-types.

La *prosodie intellectuelle ou attitudinale* apporte une modulation de la sémantique afin d'en détourner le sens littéral (*e.g.* ironie, sarcasme). Elle définit la fonction expressive de la prosodie (voir paragraphe I.2.A.e- , p13) car elle représente les informations exprimées volontairement selon un code socioculturel donné (*e.g.* doute, ironie, évidence, affirmation).

La *prosodie émotionnelle* qui rend compte de l'état émotionnel du locuteur (*e.g.* peur, gaieté, tristesse) définit la fonction impulsive de la prosodie. Elle fournit des informations indépendamment de la volonté du locuteur par la contraction des muscles phonatoires qui induit une variation de timbre de la voix. Elle est donc sujette à plus de variabilité que la prosodie attitudinale.

Ce sont ces deux types de prosodies que nous étudierons précisément par la suite car elles appartiennent aux éléments paralinguistiques du langage.

Enfin, la **prosodie inarticulée** est véhiculée par les soupirs et les grognements qui étoffent le discours. Cette catégorie ne représente aucune des fonctions définies par la linguistique qui concerne uniquement un modèle fonctionnel de la communication verbale. Par ailleurs, à notre connaissance, il n'existe pas d'étude neuroscientifique sur ce type de prosodie.

b- Neuropsychologie et dominance hémisphérique de la compréhension de la prosodie affective

L'hypothèse selon laquelle les émotions seraient traitées par l'hémisphère droit⁶ (Hughlings-Jackson, 1915) a conduit à rechercher quelle était la dominance hémisphérique de la prosodie affective, élément paralinguistique à l'interface entre langage et émotion. Les travaux pionniers de neuropsychologie ont montré que **l'hémisphère droit serait**

⁶ Cette hypothèse est actuellement remise en cause, des données récentes montrant plutôt que chaque émotion serait traitée par un réseau neural particulier.

dominant pour le traitement prosodique, car des patients atteints de lésion de l'hémisphère droit présentaient des troubles de la compréhension (ou de la production) de la prosodie affective, troubles connus sous le nom d'*aprosodie* (Heilman *et al.*, 1975).

➤ **Modèle d'organisation du traitement de la prosodie affective dans l'hémisphère droit**

A la même époque, le premier modèle de l'organisation neurale de la prosodie affective a été proposé par Douglas Ross en 1981. Sur un groupe de dix sujets présentant différentes lésions de l'hémisphère droit (Ross, 1981), il constata que les trois patients présentant une lésion située au niveau de l'homologue de Broca à droite souffraient de troubles de la production et de la répétition de la prosodie affective, en dépit d'une bonne compréhension de la prosodie affective incluse dans une « phrase » ayant un contenu lexical neutre émotionnellement (« *Je vais au cinéma* »). Ces symptômes sont équivalents à ceux rencontrés chez des patients présentant une aphasie de production (ou aphasie de Broca), à savoir une bonne compréhension du contenu verbal d'un énoncé, mais une production du langage appauvrie. Ainsi, les déficits de ces patients présentant une lésion de l'hémisphère droit ont été définis sous le terme d'*aprosodie motrice* ou *aprosodie de production* (Figure 3.A).

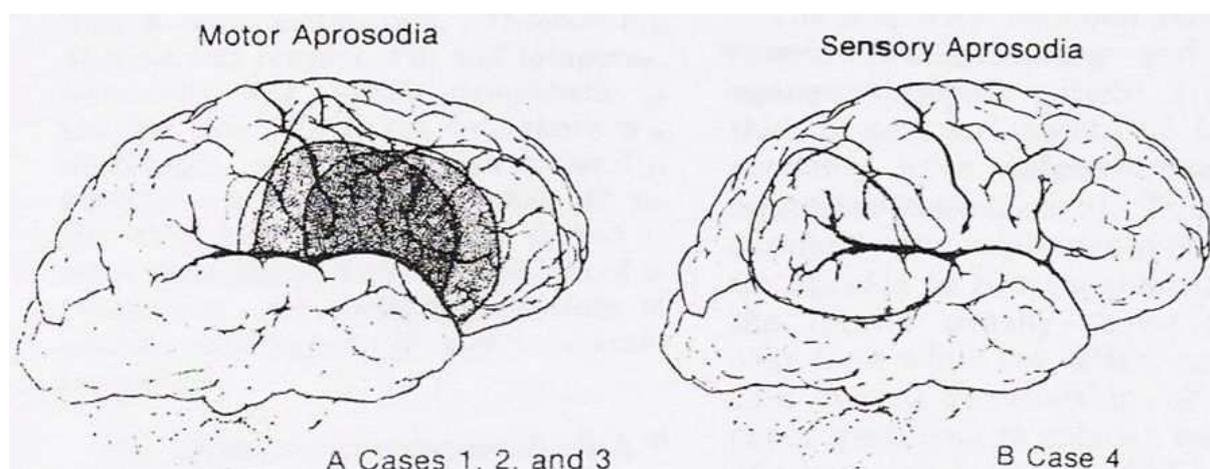


Figure 3. Les différents types d'aprosodie en fonction des sites de lésion corticale (extrait de Ross, 1981).
 A. Superposition des lésions dans la région frontale inférieure droite des patients 1, 2 et 3 qui a donné lieu à une aprosodie motrice ou aprosodie de production (Motor Aprasodia). B. Superposition des lésions dans la région temporale supérieure dans sa partie postérieure du patient 4 qui présente une aprosodie sensorielle ou aprosodie de compréhension (Sensory Aprasodia).

A l'inverse, le patient présentant une lésion de la région temporale supérieure dans sa partie postérieure était capable de produire spontanément la prosodie affective appropriée, mais incapable de comprendre la prosodie affective d'un énoncé. La symptomatologie similaire à celle des patients présentant une aphasie de compréhension

(aphasie de Wernicke) a conduit Douglas Ross à définir les troubles de ce patient sous le terme d'aprosodie sensorielle ou *aprosodie de compréhension* (Figure 3.B).

Ces travaux pionniers de neuropsychologie ont montré que les épices, ou aires essentielles, du traitement de la prosodie affective seraient localisés dans l'hémisphère droit. En faisant un parallèle entre aphasies et aprosodies, Douglas Ross a proposé que l'organisation neurale de la prosodie dans l'hémisphère droit reflète l'organisation des fonctions ortholinguistiques dans l'hémisphère gauche, c'est-à-dire une organisation en deux pôles ou épices : un pôle antérieur impliqué dans la production de la prosodie affective, et un pôle postérieur impliqué dans la compréhension.

➤ Impact du traitement ortholinguistique sur le traitement de la prosodie affective chez les patients présentant une lésion au sein de l'hémisphère droit

Les études de Douglas Ross ont utilisé des stimuli peu écologiques, puisque le contenu lexical des phrases n'était pas congruent avec le contenu prosodique. Or nous avons vu qu'outre la fonction impressive de la prosodie (prosodie émotionnelle), la linguistique attribue une fonction lexicale à la prosodie (voir paragraphe 1.2.A, p11). La **dissociation entre traitement lexical et traitement prosodique émotionnel** a donc pu conduire à la définition d'un modèle neurolinguistique incomplet.

Des travaux en neuropsychologie ont été entrepris pour comprendre les relations entre traitement lexical et traitement prosodique chez des patients présentant une lésion hémisphérique droite, ou gauche et sur des sujets contrôles n'ayant aucune lésion cérébrale. Une première étude a utilisé une tâche de discrimination de l'émotion contenue dans les phrases entendues (Lalande *et al.*, 1992). Dans ce travail, trois types de phrases étaient utilisés : 1- des phrases avec un contenu propositionnel émotionnel énoncées sur un ton neutre ; 2- une construction à partir de « hum » produite avec un ton émotionnel ; 3- des phrases dont le contenu propositionnel et le ton émotionnel étaient en congruence ou en conflit. La capacité à discriminer des émotions sur des phrases sans prosodie émotionnelle (type 1) était préservée chez les patients présentant une lésion dans l'hémisphère droit, mais perturbée chez les patients présentant une lésion de l'hémisphère gauche. Ainsi la compréhension des émotions transmises par le contenu ortholinguistique du discours ne serait pas traitée par l'hémisphère droit, mais par l'hémisphère gauche. Par contre, ces patients lésés au niveau de l'hémisphère droit présentaient un déficit dans la compréhension de la prosodie émotionnelle pure (problème de discrimination des émotions dans les phrases de type 2), confirmant le rôle de

l'hémisphère droit dans le traitement de la prosodie. Cependant, dans les conditions où contenu lexical et contenu prosodique sont congruents au niveau émotionnel (type 3), un déficit chez les patients du groupe présentant des lésions droites a été observé. Pourtant, ces patients ont montré de bonnes performances pour la compréhension de la prosodie émotionnelle seule, et ne devraient pas présenter de troubles majeurs dans une telle condition (Lalande *et al.*, 1992).

D'autres auteurs ont montré que les performances de sujets lésés à droite augmentaient lorsque le contenu lexical et prosodique étaient congruents, tandis que la discrimination des émotions sur des phrases aux contenu lexical et prosodique incongruents était plus difficile (Bowers *et al.*, 1987). Ces études mettent donc en évidence le **rôle important que joue le contenu lexical sur la compréhension de la prosodie affective** chez les patients présentant une lésion unilatérale. Même si le traitement du contenu lexical émotionnel est pris en charge par l'hémisphère gauche, le traitement de la prosodie émotionnelle par l'hémisphère droit semble dépendre de ce traitement lexical.

L'interaction entre informations prosodiques et lexicales semble donc essentielle pour la compréhension pleine et entière du message verbal. Ce résultat renforce donc l'idée d'intégrer le traitement des éléments ortholinguistiques au modèle d'organisation neurale du traitement de la prosodie affective proposé par Douglas Ross.

➤ **Réévaluation du modèle d'organisation neural du traitement de la prosodie affective**

En reprenant la tâche de catégorisation émotionnelle d'énoncés, Douglas Ross a montré que lorsque le contenu verbal des stimuli se complexifie (du simple « hum » aux mots), les performances des patients présentant une lésion de l'hémisphère gauche et des fibres calleuses (au-dessus de l'aire motrice supplémentaire) diminuaient malgré la présence de prosodie émotionnelle (Figure 4).

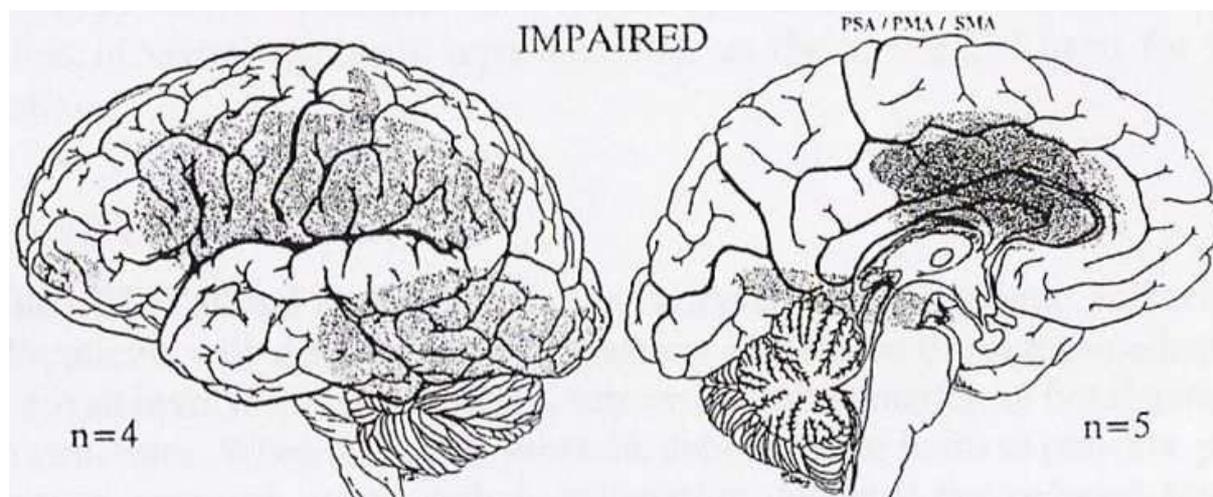


Figure 4. Autres sites de lésions qui ont donné lieu à une aprosodie de compréhension (extrait de Ross *et al.*, 1997).

Différents types de lésions ont entraîné chez des patients une aprosodie de compréhension : 4 patients présentaient une lésion des régions postérieures (à gauche) et 5 patients présentaient une lésion des régions médiales du cingulum antérieur et du corps calleux sous-jacent.

Pourtant, les études précédentes ont montré qu'une lésion de l'hémisphère gauche seule n'entraînait pas de difficulté de compréhension de la prosodie affective (Bowers *et al.*, 1987; Lalande *et al.*, 1992). Douglas Ross a donc fait l'hypothèse que les fibres blanches constituant le corps calleux permettraient l'échange d'informations ortholinguistiques et prosodiques entre hémisphère gauche et hémisphère droit. Ce transfert calleux serait indispensable à la compréhension du message émotionnel véhiculé non seulement par la prosodie mais aussi par le contenu lexical (Ross *et al.*, 1997). **Cette interaction entre informations ortholinguistiques et prosodiques, essentielle à la compréhension aboutie du message verbal émotionnel, est donc opérée via la communication inter-hémisphérique transcalleuse.**

Selon Douglas Ross, la compréhension du discours affectif repose sur l'intégration, via le corps calleux, des informations ortholinguistiques traitées par la région temporelle postérieure gauche avec les informations prosodiques affectives traitées par la région temporelle supérieure droite dans sa partie postérieure.

c- Études d'imagerie sur la prosodie affective

Les études de neuroimagerie portant sur *les bases neurales de la compréhension de la prosodie émotionnelle* au niveau de la phrase ont mis en évidence une activation des régions frontales et temporales droites (Mitchell *et al.*, 2003) et de leurs homologues gauches (Wildgruber *et al.*, 2002; Kotz *et al.*, 2003; Wildgruber *et al.*, 2004; Wildgruber *et*

al., 2005; Grandjean *et al.*, 2005). L'implication de ces régions temporales gauches et des régions frontales dans les deux hémisphères au cours du traitement de la prosodie émotionnelle (Figure 5) semble en apparence contradiction avec les résultats de neuropsychologie. Ces résultats ont, en fait, mis en évidence le rôle essentiel des régions temporales postérieures droites dans la compréhension de la prosodie émotionnelle, et des régions frontales droites dans la production de la prosodie affective (voir paragraphe 1.2.B.b- , p16).

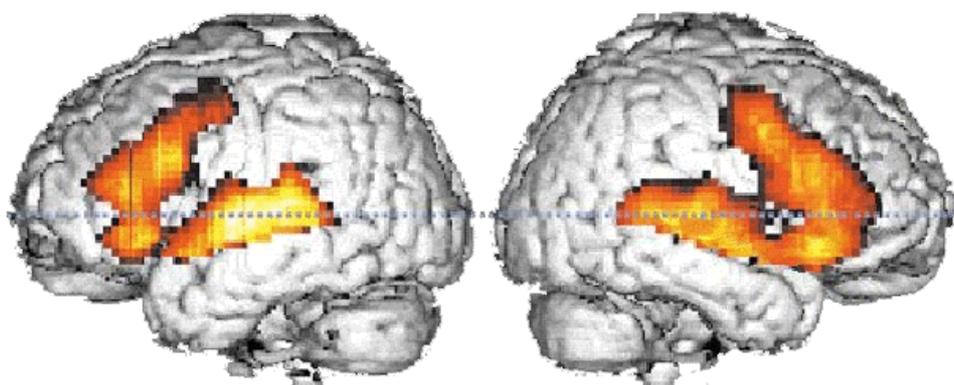


Figure 5. Régions fronto-temporales impliquées au cours de la classification émotionnelle des phrases à contenu lexical neutre énoncées avec une prosodie émotionnelle (repris de Wildgruber *et al.*, 2002).

Un examen approfondi des paradigmes utilisés dans les études de neuroimagerie pourrait éclairer cette différence de résultats avec la neuropsychologie. Les protocoles de neuroimagerie ont été construits sur le modèle des premiers paradigmes développés en neuropsychologie, c'est-à-dire des paradigmes excluant tout traitement du contenu lexical affectif. Dans ces protocoles de neuroimagerie, des stimuli auditifs, ayant un contenu lexical inexistant ou incongruent avec le contenu émotionnel prosodique, étaient présentés aux sujets. Ces protocoles reposaient sur l'utilisation de « phrases » produites avec une prosodie émotionnelle mais sans contenu lexical, donc inintelligibles (discours filtré Kotz *et al.*, 2003), de « phrases » construites à partir de pseudo-mots (les pseudo-mots sont des constructions qui respectent les règles phonologiques de la langue utilisée, ici l'allemand, mais qui sont dépourvues de sens, Grandjean *et al.*, 2005)⁷ ou de phrases avec un contenu lexical neutre répétées fréquemment⁸ (Wildgruber *et al.*, 2002; Wildgruber *et al.*, 2004; Wildgruber *et al.*, 2005).

⁷ Exemple : « *Fee gott laish jonkill gosters* »

⁸ Exemple de stimuli à contenu sémantique neutre émotionnellement : « *Die Anrufe werden automatisch beantwortet* » / « *Les appels téléphoniques sont pris automatiquement* »

Or les études de neuropsychologie, portant sur l'interaction entre contenu lexical et prosodique (voir paragraphe I.2.B.b- , p16), ont montré qu'une telle interaction existait aussi chez les sujets sains. En effet, les performances des sujets sains à une tâche de discrimination émotionnelle augmentaient lorsque les phrases à traiter présentaient un contenu lexical par rapport à la même tâche réalisée sur des stimuli dépourvus de contenu (Bowers *et al.*, 1987; Lakshminarayanan *et al.*, 2003). Ces performances pouvaient passer de 70% à 80 % de réussite avec l'adjonction d'un contenu lexical aux stimuli à discriminer (Pell, 2005). Par ailleurs, lorsque le contenu lexical et prosodique étaient discordants, les performances des sujets contrôles étaient moindres que celles obtenues lors de la présentation de phrases à contenu lexical et prosodique concordant (Bowers *et al.*, 1987; Lalande *et al.*, 1992). Les contenus lexicaux et prosodiques doivent être congruents pour permettre une compréhension optimale de la dimension émotionnelle des énoncés. Les traitements cognitifs opérés pour traiter des stimuli où le contenu lexical est discordant avec le contenu prosodique sont donc difficiles à interpréter.

Ces résultats laisseraient penser que le recrutement des régions fronto-temporales gauches dans les études de neuroimagerie peut ne pas être lié directement au traitement de la prosodie affective, mais plutôt à la difficulté à traiter des stimuli contenant de la prosodie affective, mais dépourvus de contenu lexical. Ce type de stimuli a pu paradoxalement produire une augmentation du traitement lexical chez les sujets et donc le recrutement des régions fronto-temporales gauches connues pour leur implication dans le traitement lexical. Cet effet a été effectivement observé dans une étude comprenant des stimuli inintelligibles. Les auteurs ont montré que plus le discours était inintelligible, donc discordant, plus l'activité dans les régions péri-sylviennes impliquées dans le traitement lexico-syntaxique était grande (Meyer *et al.*, 2002; Kotz *et al.*, 2003). En l'absence de contenu lexical, il semblerait donc que des régions dédiées aux traitements lexico-syntaxiques soient recrutées pendant le traitement de la prosodie émotionnelle, entraînant donc une implication forte de l'hémisphère gauche. Dès lors, la mise en évidence de la spécificité des régions temporales droites dans le traitement de la prosodie émotionnelle, observée chez les patients aprosodiques, serait masquée par ce recrutement des aires du traitement lexico-syntaxique pour traiter un matériel dépourvu de contenu lexical.

La compréhension optimale d'un énoncé affectif nécessiterait la présence de prosodie affective et d'un contenu lexical congruent. Une meilleure compréhension des bases neurales de la prosodie affective pourrait être apportée par la prise en compte de la dimension ortholinguistique du langage affectif.

II. OBJECTIFS ET PLAN DE LA THESE

L'objectif de ce travail de thèse était de définir les bases neurales de la compréhension de la phrase affective. Il fallait pour cela déterminer la contribution relative des réseaux neuraux des fonctions ortholinguistiques et paralinguistiques pour la compréhension de la phrase affective, car ces deux systèmes semblent fortement interagir. La séparation des éléments paralinguistiques des constructions lexico-syntaxiques dans les stimuli utilisés par les paradigmes de neuroimagerie apparaît peu « écologique » et peu adaptée à cette problématique. En effet, l'utilisation de stimuli présentant un contenu lexical incongruent, voire inexistant, entraîne une ambiguïté : les régions fronto-temporales gauches sont-elles réellement impliquées dans le traitement de la prosodie affective, ou sont-elles activées pour traiter des stimuli pourtant dépourvus de contenu lexical ?

Pour répondre à cette question, il fallait, dans un premier temps, connaître les réseaux neuraux des traitements phonologique, sémantique et syntaxique de l'hémisphère gauche ainsi que leurs interactions. Dans cette perspective, **une méta-analyse des études de neuroimagerie consacrées aux bases neurales du traitement de ces différents éléments ortholinguistiques du langage** a été menée et est décrite dans le chapitre 1 (p26).

Dans un deuxième temps, **trois types de matériel verbal ont été mis au point pour l'étude des trois types de traitements cognitifs réalisés au cours de la compréhension de phrases affectives** : le traitement ortholinguistique sans dimension affective, le traitement ortholinguistique avec une dimension affective, et le traitement

paralinguistique de la prosodie affective. La construction de ce matériel est présentée dans le chapitre 2, paragraphe I (p77).

Le premier type de matériel correspondait à des phrases à contenu lexical neutre affectivement. Le traitement d'un tel matériel met en jeu **les processus cognitifs permettant l'analyse des éléments ortholinguistiques phonologiques, lexicaux et syntaxiques, incluant l'analyse de la prosodie grammaticale sans dimension affective.**

Le deuxième type de matériel devait induire la mise en place du **seul traitement ortholinguistique avec une dimension affective** : il fallait donc construire des phrases à contenu lexical affectif, mais dépourvues de contenu paralinguistique affectif. Dans cette perspective, les phrases ont été produites par une voix de synthèse, Kali (Morel et Lacheret-Dujour, 2001), car elle permet d'inclure aux énoncés une prosodie grammaticale cohérente avec le contenu lexico-syntaxique, et ce sans prosodie affective.

Enfin, le troisième type de matériel correspondait à des phrases à contenu lexical et prosodique affectif dont le traitement nécessite l'analyse des éléments **paralinguistiques de la prosodie affective.** Le contenu lexical affectif de ces phrases a été construit pour être *équivalent* à celui des phrases produites par Kali afin que l'écoute et le traitement de ce type de matériel mettent en jeu le même type de processus ortholinguistique. Ces phrases ont été enregistrées par des acteurs qui ont produit la prosodie grammaticale adéquate (équivalente à celle produite par Kali), mais aussi la prosodie affective congruente avec le contenu lexical affectif.

Ensuite, sur le plan psycho-expérimental, nous avons vérifié l'impact cognitif de l'utilisation de ces différents matériels verbaux, afin de s'assurer que leur traitement n'engendrait pas d'ambiguïté comme pour les stimuli utilisés sans contenu lexical.

La **première étude psycholinguistique** qui a été menée dans le but de sélectionner les phrases provenant du corpus que nous avons construit avec un contenu lexical neutre ou affectif est présentée au chapitre 2, paragraphe I.2 (p84). Le critère de sélection choisi pour les phrases produites par Kali correspondait à une bonne compréhension des phrases, de façon à écarter tout problème d'intelligibilité des stimuli. Pour être sélectionnées, les phrases énoncées par les acteurs devaient être classées correctement par tous les sujets dans les différentes catégories neutre et affectives. Ainsi, les phrases affectives énoncées par les acteurs sont sélectionnées de manière à ne présenter aucune ambiguïté lexico-sémantique ou prosodique.

La **deuxième étude psycholinguistique** qui a été menée afin d'évaluer l'impact cognitif de la prosodie affective au cours d'une tâche de classification est également

présentée au cours du chapitre 2, paragraphe II (p86). Cet impact de la prosodie sur la compréhension des énoncés affectifs a été évalué en comparant les scores d'une classification affective des phrases énoncées avec la prosodie affective par les acteurs à ceux réalisés au cours de la même tâche mais réalisée sur des phrases affectives produites sans prosodie affective par Kali. Par ailleurs, nous avons mis en place une tâche de classification qui devait mettre en jeu le traitement ortholinguistique des phrases neutres : la tâche de classification consistait à trouver le sujet des phrases (classification grammaticale).

Enfin, les résultats de ces études psycholinguistiques nous ont permis de construire **un paradigme emboîté** (Posner *et al.*, 1987) pour l'étude en IRMf des bases neurales de la compréhension de la phrase affective présentée au cours du chapitre 2, paragraphe III (p 105). Ce type de paradigme nécessite la mise au point de tâches mettant en jeu une fonction cognitive supplémentaire par rapport à la tâche précédente, et par comparaison va permettre de distinguer les bases neurales de ces différentes fonctions cognitives. Ainsi, la classification des phrases à contenu lexical et prosodique affectif faisait donc appel : (1) au réseau neural du traitement ortholinguistique sans dimension affective mis en jeu au cours de la classification grammaticale des phrases neutres ; (2) au réseau neural du traitement du contenu lexical affectif mis en place au cours de la classification affective des phrases au contenu lexical affectif produites par Kali sans prosodie affective ; (3) enfin au réseau neural du traitement de la prosodie affective (uniquement activé au cours de la classification des phrases affectives énoncées par les acteurs). Par comparaison des régions corticales mises en place pour la réalisation de ces trois tâches, les bases neurales de ces trois types de traitement ont été mises en évidence.

Dans la dernière partie de ce manuscrit (p160), un modèle neurolinguistique de la compréhension de la phrase affective a été élaboré à partir de l'ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail de thèse. Ce modèle présente la distinction entre les bases neurales des différents traitements ortholinguistiques et paralinguistiques au cours de la compréhension de la phrase affective.

1

Les bases neurales du langage dans l'hémisphère gauche : une méta-analyse de la littérature

Ce travail a été publié dans : **Beaucousin, V., Vigneau, M., Hervé, P-Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. (2005) Meta-analysing left hemisphere language areas for phonology, semantics, and sentence processing. NeuroImage. 30(4)1414-1432.**

I. INTRODUCTION

Depuis l'avènement de la tomographie par émission de positons (TEP) et de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) à partir des années 1980 (Houdé *et al.*, 2002), la neuroimagerie a connu un essor fulgurant offrant à la communauté scientifique une quantité de données très importantes. Jusqu'alors, des revues de la littérature ont confronté un nombre restreint de travaux pour proposer une synthèse des résultats d'imagerie fonctionnelle. Ces revues étaient basées sur une analyse fine des paradigmes et fournissaient un aperçu de la représentation cérébrale du langage (Friederici et Alter, 2004; Hickok et Poeppel, 2004). Cependant, elles décrivaient le fonctionnement cérébral au niveau gyral ou au sein d'une seule région, laissant ouverte la question d'une localisation plus précise des différents processus (Poldrack *et al.*, 1999). Enfin la spécificité et les interactions possibles entre ces différents processus au niveau régional n'ont pas été abordées.

L'objectif de cette méta-analyse a été de définir avec précision le rôle des régions corticales de l'hémisphère gauche au cours du traitement des éléments ortholinguistiques du langage oral, et de proposer une vision plus intégrée de ces différents niveaux de traitement. Ainsi, la connaissance des bases neurales de ce type de processus devrait permettre une meilleure compréhension de leurs interactions avec le traitement paralinguistique.

A partir de nombreux résultats de la neuroimagerie, la méthodologie appliquée à cette étude offre une approche plus fine des activations cérébrales dépassant la localisation gyrale inhérente à la définition des différents modèles neurolinguistiques existants. Cette approche permettra de donner une vue d'ensemble des traitements phonologico-lexico-syntaxiques et des interactions entre ces trois composantes au niveau cérébral. Le choix de cette classification en trois composantes ne vient pas des modèles linguistiques du langage *per se*, mais plus pragmatiquement des designs expérimentaux des études d'imagerie fonctionnelle sélectionnées. Ces études comparaient en effet des

conditions avec une complexité croissante du matériel verbal : du phonème⁹ (traitement phonologique), au mot (traitement lexical), et jusqu'à la phrase (syntaxe). Ce découpage en trois composantes est donc assez grossier. Mais il offre l'avantage de pouvoir regrouper un nombre important d'études de neuroimagerie sous un même dénominateur commun et ainsi fournir un important poids statistique à notre analyse.

II. METHODE

Ce travail a débuté par l'analyse de 260 études en neuroimagerie, utilisant la tomographie par émission de positons (TEP) ou l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), publiées entre 1989 et 2004. Ces études rapportaient des tâches de compréhension portant sur du matériel verbal, visuel ou auditif, de complexité variable (syllabes, mots, phrases, textes), ainsi que des tâches de compréhension sur du matériel non verbal (objets, images). La sélection des différentes études jugées pertinentes pour notre méta-analyse reposait sur quatre critères que nous allons détailler.

1. CRITERES DE SELECTION

A. Sélection de la population d'intérêt

L'objectif de cette méta-analyse étant d'appréhender le fonctionnement normal du langage, nous avons exclu toutes les études portant sur des enfants ou des patients atteints de troubles divers du langage, pour ne garder que celles incluant des sujets adultes volontaires sains.

Nous avons de plus limité notre recueil de données aux témoins droitiers pour lesquels l'hémisphère gauche joue un rôle déterminant dans l'organisation cérébrale du

⁹ Plus petite unité de langage parlé

langage, et ainsi exclu les sujets gauchers pour lesquels la dominance hémisphérique pour le langage se révèle être plus variable¹⁰.

B. Sélection du type d'études

Les études pour lesquelles nous disposons de coordonnées stéréotaxiques (x, y, z) ont été inventoriées. Par ailleurs, les études utilisant une approche par régions d'intérêt¹¹ ont été exclues de notre base de données car elles ne fournissent pas les coordonnées stéréotaxiques correspondantes. Néanmoins les résultats de telles études pouvant s'avérer importants lors de l'interprétation du rôle fonctionnel des régions corticales, nous les avons intégrées dans notre discussion.

C. Sélection des contrastes d'intérêt

Un des objectifs de la neuroimagerie étant d'identifier les régions cérébrales dont l'activité covarie avec une tâche d'intérêt par rapport à une tâche de référence, un paradigme emboîté est utilisé (Posner *et al.*, 1987), qui consiste à comparer les valeurs de signal enregistrées pendant les deux tâches (cf. Annexe 1, paragraphe I.4, p206).

Deux types de comparaisons peuvent être utilisés dans les études d'imagerie, mettant en évidence un ou plusieurs traitements cognitifs. La première comparaison consiste à contraster l'activité de la tâche d'intérêt avec celle d'une tâche de référence de bas niveau (repos, écoute de sons). Lorsque la tâche d'intérêt utilisée est complexe, ce type de contraste permet d'identifier les variations d'activité liées à plusieurs traitements cognitifs. Par exemple, les variations, observées pour le contraste '*écoute de mots - appuyer sur un bouton*', seront liées à la perception du son (ou traitement phonétique), au traitement phonémique et au traitement lexical. La seconde approche consiste à contraster les activations plus importantes au cours de la tâche d'intérêt que de la tâche de référence de bas niveau avec les activations obtenues pendant une tâche de référence de plus haut niveau. Elle permet de définir plus précisément un type de traitement

¹⁰ Le concept de *dominance* ou *spécialisation* a été introduit par Dax et Broca en Neuropsychologie, et désigne la meilleure capacité d'un hémisphère par rapport à son homologue à prendre en charge une fonction cognitive donnée. Dans le cadre du langage, on considère que 90 % des sujets droitiers présentent une dominance hémisphérique gauche, contre 70% pour les gauchers.

¹¹ Par opposition aux études *voxel par voxel* qui permettent une approche sans *a priori* des régions activées lors d'une tâche donnée, l'analyse en régions d'intérêt permet de tester une hypothèse *a priori* concernant une région cérébrale particulière.

cognitif. Elle est donc plus contrainte que la précédente. Ainsi, les variations identifiées pour le contraste '*écoute de mots - écoute de syllabe*' seront liées uniquement aux aspects lexicaux du mot, les aspects phonémiques et perceptifs des sons du langage étant présent aussi bien dans les mots que dans les syllabes.

Les études de neuroimagerie offrent une certaine variabilité dans la définition des processus cognitifs identifiés suivant la référence utilisée. De manière à confronter les différentes études que nous avons sélectionnées, nous avons classé les contrastes en plusieurs composantes.

Sur la base de ces paradigmes, nous avons choisi de ne considérer que trois niveaux de traitement distincts, correspondant chacun aux trois niveaux d'une classification hiérarchique croissante en fonction de la complexité ortholinguistique du matériel verbal, allant du phonème au texte : le traitement phonologique, le traitement sémantique (sur des mots et des images) et le traitement de la phrase et du texte. Cette hiérarchisation se révèle conforme aux différentes étapes d'acquisition et de développement du langage telles qu'on peut les observer chez l'enfant, depuis le traitement de bas niveau des sons du langage jusqu'à la compréhension et l'élaboration de phrases (Damon, 2000).

a- La composante phonologique

Le traitement - ou encodage - phonologique représente une étape de la compréhension du langage au cours de laquelle les stimuli perçus vont être segmentés en unités monosyllabiques fondamentales, et associés à leur représentation phonologique, le tout produisant une séquence phonologique linéaire. Dans le cadre de la perception du langage oral, cet encodage va mettre en correspondance les sons perçus avec leurs phonèmes.

Pour cette composante du langage, seuls les contrastes dont les variations de signal BOLD étaient liées aux traitements phonologiques ont été conservés. Les différents contrastes sélectionnés ont été classés en plusieurs catégories, selon la nature du processus cognitif qu'ils permettent d'appréhender :

- *les tâches d'articulation ou de répétition à voix haute ou silencieuse de syllabes, contrastées avec le repos ou la fixation de croix.* De tels contrastes permettent d'identifier les régions liées à la récupération des commandes motrices associées aux codes phonologiques.
- *la lecture ou l'écoute passive de lettres ou de syllabes contrastée avec l'identification de sons ou symboles non verbaux.* La réalisation de la première tâche nécessite une analyse phonologique et acoustique, alors que la seconde

n'implique qu'une analyse acoustique ; les régions phonologiques identifiées pour de tels contrastes sont liées à la reconstruction phonémique.

- le jugement de rimes ou la détection de syllabes sur des pseudo-mots¹² ou des mots contrasté avec le jugement sémantique de mots. La première tâche nécessite une analyse phonologique (pour les mots et les pseudo-mots), et lexicale (pour les mots), la seconde une analyse lexicale ; les régions impliquées dans le traitement phonologique observées reflèteront la composante de reconstruction phonologique, ainsi qu'une composante exécutive de manipulation des phonèmes.
- des tâches durant lesquelles les sujets devaient maintenir en mémoire puis rappeler à voix haute une série de lettres présentées visuellement ou auditivement ; les régions identifiées pour de telles tâches seront liées à la composante de maintenance en mémoire des phonèmes.
- l'écoute passive de sons vocaux (rires, soupirs) contrastée avec l'écoute de sons non vocaux (sonnerie du téléphone, musique sans paroles, cris d'animaux). La comparaison entre les deux tâches permet d'identifier les régions qui sous-tendent l'analyse acoustique spécifique des sons de la voix humaine.

Le traitement **phonologique** a été étudié à partir de 45 études incluant 86 contrastes spécifiques (Table 1) qui ont abouti à l'obtention de 125 pics dans le lobe frontal et 122 dans le lobe pariéto-temporal. La répartition des contrastes entre le lobe frontal et lobe temporal est équivalente, hormis pour les contrastes sélectifs de la voix humaine qui ont donné lieu exclusivement à des pics temporaux. Les contrastes sur les mots sont deux fois plus nombreux dans le lobe frontal que dans le lobe temporal, tandis que les tâches réalisées sur les syllabes et les lettres sont plus représentées dans le lobe temporal. Un avantage pour le lobe frontal dans les tâches d'articulation et de répétition est également observé.

¹² Les pseudomots sont construits suivant les règles orthographiques de la langue utilisée dans le protocole mais sans signification.

Table 1. Liste des études de neuroimagerie et nombre de contrastes (entre parenthèse) inclus dans la méta-analyse rapportant des pics dans l'hémisphère gauche au cours de processus phonologiques. Parmi ces 45 études, 31 ont fourni 61 contrastes dans le lobe frontal gauche, et 35 ont rapporté 58 contrastes dans le lobe temporal et pariétal gauche.

LOBE FRONTAL GAUCHE Type de contrastes (nombre de contrastes)	LOBE TEMPORAL / PARIETAL GAUCHE Type de contrastes (nombre de contrastes)
Articulation, répétition (16) (McGuire <i>et al.</i> , 1996; Warburton <i>et al.</i> , 1996; Price <i>et al.</i> , 1996b; Braun <i>et al.</i> , 1997; Riecker <i>et al.</i> , 2000; Bookheimer <i>et al.</i> , 2000; Wildgruber <i>et al.</i> , 2001; Heim <i>et al.</i> , 2002)	Articulation, répétition (10) (Howard <i>et al.</i> , 1992; Warburton <i>et al.</i> , 1996; Price <i>et al.</i> , 1996b; Braun <i>et al.</i> , 1997; Calvert <i>et al.</i> , 1999; Bookheimer <i>et al.</i> , 2000; Wildgruber <i>et al.</i> , 2001)
Lecture, écoute, prêter attention à, discriminer des syllabes ou des lettres (13) (Zatorre <i>et al.</i> , 1992; Beaugregard <i>et al.</i> , 1997; Jessen <i>et al.</i> , 1999; Paulesu <i>et al.</i> , 2000; Jancke et Shah, 2002; Sekiyama <i>et al.</i> , 2003; Joanisse et Gati, 2003; Poeppel <i>et al.</i> , 2004)	Lecture, écoute, prêter attention à, discriminer des syllabes ou des lettres (20) (Zatorre <i>et al.</i> , 1992; Beaugregard <i>et al.</i> , 1997; Jessen <i>et al.</i> , 1999; Jancke <i>et al.</i> , 2002; Jancke et Shah, 2002; Belin et Zatorre, 2003; Sekiyama <i>et al.</i> , 2003; Joanisse et Gati, 2003; Hugdahl <i>et al.</i> , 2003; Poeppel <i>et al.</i> , 2004)
Lecture, comptage de syllabes dans des pseudo-mots (10) (Herbster <i>et al.</i> , 1997; Poldrack <i>et al.</i> , 1999; Mechelli <i>et al.</i> , 2000; Paulesu <i>et al.</i> , 2000; Meyer <i>et al.</i> , 2002; Kotz <i>et al.</i> , 2002)	Lecture, comptage de syllabes dans des pseudo-mots (11) (Fiez <i>et al.</i> , 1996; Herbster <i>et al.</i> , 1997; Cappa <i>et al.</i> , 1998; Binder <i>et al.</i> , 2000; Paulesu <i>et al.</i> , 2000; Meyer <i>et al.</i> , 2002; Hickok <i>et al.</i> , 2003; Hugdahl <i>et al.</i> , 2003)
Discrimination, comptage de syllabes et détection de rimes dans des mots (14) (Zatorre <i>et al.</i> , 1996; Price <i>et al.</i> , 1997; Poldrack <i>et al.</i> , 1999; Roskies <i>et al.</i> , 2001; Booth <i>et al.</i> , 2002; Heim et Friederici, 2003)	Discrimination, comptage de syllabes et détection de rimes dans des mots (8) (Zatorre <i>et al.</i> , 1996; Buchanan <i>et al.</i> , 2000; Booth <i>et al.</i> , 2002; Heim et Friederici, 2003; Scott et Johnsrude, 2003)
Mémoire de travail sur des lettres (8) (Paulesu <i>et al.</i> , 1993; Cohen <i>et al.</i> , 1997; Rypma <i>et al.</i> , 1999; Bunge <i>et al.</i> , 2001; Hautzel <i>et al.</i> , 2002)	Mémoire de travail sur des lettres (7) (Paulesu <i>et al.</i> , 1993; Cohen <i>et al.</i> , 1997; Rypma <i>et al.</i> , 1999; Bunge <i>et al.</i> , 2001; Hautzel <i>et al.</i> , 2002)
	Contraste sélectif de la voix humaine (2) (Belin <i>et al.</i> , 2000; Belin <i>et al.</i> , 2002)

b- La composante sémantique

Cette étape permet l'accès et la récupération des représentations sémantiques associées à un stimulus verbal reconnu comme étant signifiant. Pour étudier les bases neurales de cette composante, nous avons retenus les contrastes dont les variations de signal BOLD sont liées principalement à la composante de traitement sémantique. Les différents contrastes sélectionnés ont été classés selon le type de processus cognitif exploré (Table 2) :

- les tâches de lecture ou d'écoute passive de mots contrastées avec de la perception de non-mots. La première tâche implique une analyse lexicale et phonologique, alors que la seconde ne nécessite qu'une analyse phonologique ; les régions lexicales identifiées seront mises en évidence.
- les tâches de catégorisation sur des objets ou des mots durant lesquelles les sujets devaient classer, selon un critère déterminé, des objets ou des mots (juger par exemple si un objet est manufacturé ou non) ; cette catégorisation nécessite de

comparer des items sur leurs propriétés sémantiques, les régions ainsi identifiées sont liées à l'accès aux représentations sémantiques.

- les tâches de génération de mots ou de verbes sémantiquement liés à d'autres mots, et des tâches d'association pour lesquelles les sujets devaient associer entre eux des mots ou des objets sémantiquement reliés ; les régions observées pour de telles tâches sont liées à un accès aux représentations conceptuelles.
- les tâches de récupération sémantique pour lesquelles les sujets devaient rappeler certaines caractéristiques d'objets ou de mots perçus ; ces tâches permettent d'explorer les régions liées au stockage et au rappel en mémoire des représentations sémantiques.
- les tâches de sélection sémantique, consistant à comparer puis à sélectionner, parmi plusieurs stimuli, celui se rapprochant le plus d'une cible ; ces tâches sont destinées à identifier les régions impliquées dans la sélection des représentations sémantiques.
- les tâches d'amorçage sémantique durant lesquelles les sujets voyaient apparaître, à la suite l'un de l'autre, un mot amorce qui ne réclamait pas de réponse de leur part, puis un mot cible qui pouvait, ou non, entretenir une relation sémantique avec l'amorce. Ces tâches permettent d'explorer spécifiquement les régions sous-tendant la mémoire sémantique.

Les études portant sur le traitement **sémantique** au niveau du mot sont au nombre de 67. Ces études ont fourni 111 contrastes spécifiques se répartissant en 145 pics d'activation au sein du lobe frontal, et 177 pics dans les lobes temporal et pariétal (Table 2). Contrairement à la composante phonologique, le traitement sémantique est opéré principalement dans le lobe temporal gauche, exception faite des tâches de sélection qui sont plus représentées dans le lobe frontal. Notez que les tâches de catégorisation sémantique et de récupération en mémoire de travail sont représentées équitablement dans les deux lobes.

Table 2. Liste des études de neuroimagerie et nombre de contrastes (entre parenthèse) inclus dans la méta-analyse rapportant des pics dans l'hémisphère droit au cours de processus phonologiques. Parmi ces 67 études, 39 incluaient 61 contrastes dans le lobe frontal droit, et 57 ont rapporté 91 contrastes dans le lobe temporal et pariétal.

LOBE FRONTAL GAUCHE Type de contrastes (nombre de contrastes)	LOBE TEMPORAL / PARIETAL GAUCHE Type de contrastes (nombre de contrastes)
Lecture de mots (6)	Lecture et écoute de mots (27)
(Price <i>et al.</i> , 1996b; Herbster <i>et al.</i> , 1997; Hagoort <i>et al.</i> , 1999; Heun <i>et al.</i> , 2000; Cohen <i>et al.</i> , 2002)	(Howard <i>et al.</i> , 1992; Démonet <i>et al.</i> , 1994; Bookheimer <i>et al.</i> , 1995; Binder <i>et al.</i> , 1996; Small <i>et al.</i> , 1996; Menard <i>et al.</i> , 1996; Price <i>et al.</i> , 1996a; Price <i>et al.</i> , 1996b; Herbster <i>et al.</i> , 1997; Büchel <i>et al.</i> , 1998; Moore et Price, 1999; Fiez <i>et al.</i> , 1999; Hagoort <i>et al.</i> , 1999; Giraud <i>et al.</i> , 2000; Binder <i>et al.</i> , 2000; Wise <i>et al.</i> , 2001; Cohen <i>et al.</i> , 2002; Specht et Reul, 2003)
Catégorisation (17)	Catégorisation (18)
(Binder <i>et al.</i> , 1996; Jennings <i>et al.</i> , 1998; Poldrack <i>et al.</i> , 1999; Perani <i>et al.</i> , 1999; Buchanan <i>et al.</i> , 2000; Heim <i>et al.</i> , 2002; Braver et Bongiolatti, 2002; Binder <i>et al.</i> , 2003; Scott et Johnsrude, 2003; Noesselt <i>et al.</i> , 2003; Bright <i>et al.</i> , 2004)	(Binder <i>et al.</i> , 1996; Price <i>et al.</i> , 1997; Chee <i>et al.</i> , 1998; Jennings <i>et al.</i> , 1998; Cappa <i>et al.</i> , 1998; Perani <i>et al.</i> , 1999; Binder <i>et al.</i> , 1999; Heim <i>et al.</i> , 2002; Fiebach <i>et al.</i> , 2002; Cooke <i>et al.</i> , 2002; Binder <i>et al.</i> , 2003; Scott et Johnsrude, 2003; Hugdahl <i>et al.</i> , 2003; Bright <i>et al.</i> , 2004)
Association sémantique, génération de mots (17)	Association sémantique, génération de mots (31)
(Warburton <i>et al.</i> , 1996; Vandenberghe <i>et al.</i> , 1996; Martin <i>et al.</i> , 1996; Damasio <i>et al.</i> , 2001; Roskies <i>et al.</i> , 2001; Savage <i>et al.</i> , 2001; Kotz <i>et al.</i> , 2002; Adams et Janata, 2002; Booth <i>et al.</i> , 2002; Gurd <i>et al.</i> , 2002; McDermott <i>et al.</i> , 2003; Vingerhoets <i>et al.</i> , 2003; Noppeney et Price, 2004)	(Kosslyn <i>et al.</i> , 1994; Martin <i>et al.</i> , 1995; Warburton <i>et al.</i> , 1996; Fiez <i>et al.</i> , 1996; Vandenberghe <i>et al.</i> , 1996; Crosson <i>et al.</i> , 1999; Etard <i>et al.</i> , 1999; Buckner <i>et al.</i> , 2000; Chee <i>et al.</i> , 2000; Wise <i>et al.</i> , 2001; Damasio <i>et al.</i> , 2001; Roskies <i>et al.</i> , 2001; Adams et Janata, 2002; Booth <i>et al.</i> , 2002; McDermott <i>et al.</i> , 2003; Vingerhoets <i>et al.</i> , 2003; Noppeney et Price, 2004; Davis <i>et al.</i> , 2004)
Récupération en mémoire sémantique (11)	Récupération en mémoire sémantique (10)
(Thompson-Schill <i>et al.</i> , 1999; Wiggs <i>et al.</i> , 1999; Heun <i>et al.</i> , 2000; Kelley <i>et al.</i> , 2002; James et Gauthier, 2004; Ronnberg <i>et al.</i> , 2004)	(Thompson-Schill <i>et al.</i> , 1999; Wiggs <i>et al.</i> , 1999; Heun <i>et al.</i> , 2000; Sevostianov <i>et al.</i> , 2002; James et Gauthier, 2004)
Sélection (9)	Sélection (2)
(Thompson-Schill <i>et al.</i> , 1997; Wagner <i>et al.</i> , 2001)	(Thompson-Schill <i>et al.</i> , 1997)
Amorçage sémantique (1)	Amorçage sémantique (3)
(Wagner <i>et al.</i> , 2000)	(Wagner <i>et al.</i> , 2000; Kotz <i>et al.</i> , 2002)

c- La composante de traitement de la phrase

Les phrases constituent un niveau plus intégré du langage, car elles véhiculent des informations que des mots seuls ne peuvent exprimer. Ces informations sont d'ordre syntaxique (règles de formation des phrases, prosodie grammaticale), mais également paralinguistique (concerne la relation entre le contexte et le sens de la phrase, et la prosodie émotionnelle). De ce fait, la compréhension de mots perçus dans le contexte d'une phrase, ou présentés de façon isolée, diffère grandement, dans la mesure où ces mots doivent être insérés dans un cadre syntaxique particulier. Cela implique la mise en correspondance des représentations sémantiques avec les structures syntaxiques. Cette composante de traitement de la phrase peut-être dissociée en deux niveaux de traitement

prenant en charge des aspects différents : le niveau de traitement syntaxique et le niveau d'intégration sémantique.

➤ L'intégration sémantique

L'attribution d'une signification à une phrase exige non seulement une connaissance de la signification des mots qui la composent (niveau lexico-sémantique), mais également une connaissance de la manière dont ces significations doivent être combinées en conformité avec l'organisation syntaxique de la phrase. La signification associée au mot perçu va dépendre non seulement du contexte de la phrase dans laquelle il est intégré, mais également de son statut syntaxique (par exemple, le sens associé au signifiant « rose » sera différent selon qu'il sera utilisé comme adjectif ou comme nom). A cet égard, des traitements sémantiques complexes - intégration sémantique - auront à charge d'élaborer le sens de la phrase via la mise en correspondance des différentes informations sémantiques.

Pour cette composante, nous avons sélectionné les contrastes comparant une tâche d'intérêt nécessitant une analyse syntaxique, sémantique et phonologique, avec une tâche de référence impliquant des traitements phonologiques et syntaxiques équivalents, mais avec une moindre analyse sémantique. Les contrastes sélectionnés incluaient (Table 3) :

- de la lecture ou de l'écoute de phrases ou de textes simples contrastées avec de la lecture ou de l'écoute passive de pseudo-phrases ou pseudo-textes (construits avec des mots non liés). Ces contrastes permettent d'explorer plus particulièrement les régions liées à la compréhension.
- des tâches d'écoute de phrases durant lesquelles les sujets devaient porter leur attention sur certains éléments de la phrase.
- des tâches de compréhension de phrases hautement imageables, contrastées avec des phrases faiblement imageables permettent d'explorer la composante d'imagerie nécessaire à la représentation mentale de la situation décrite par la phrase
- du jugement de plausibilité sur la cohérence sémantique de phrases simples
- des tâches de complétion de phrases comparées à des tâches de lecture du mot final dans une phrase. Ces contrastes permettent d'explorer les régions liées à la compréhension et l'intégration du sens de la phrase.
- des tâches de mémoire de travail sur des phrases contrastées à des tâches de mémoire de travail sur des mots. La composante de manipulation en mémoire de matériel complexe est ainsi explorée.

➤ Le traitement syntaxique

La syntaxe exprime la manière dont les mots sont combinés à l'intérieur de la phrase en associant à cette dernière une structure interne. Elle met en évidence le fait qu'une phrase n'est pas une simple séquence linéaire de mots mais qu'elle possède une organisation dans laquelle les mots sont regroupés en unités syntaxiques de différents niveaux. Ces traitements syntaxiques reposent sur un accès aux représentations grammaticales associées aux éléments de la phrase (verbes, noms...). Pour ce niveau de traitement, nous avons sélectionné uniquement les contrastes comparant une tâche impliquant des traitements syntaxiques, sémantiques et phonologiques, avec une tâche nécessitant une analyse sémantique et phonologique équivalente, mais avec une moindre analyse syntaxique.

Ces contrastes incluaient des tâches de lecture passive, d'écoute passive ou de jugement de phrases syntaxiquement complexes, contrastées avec des phrases syntaxiquement simples (Table 3). La comparaison entre jugement de phrases complexes et jugement de phrases simples permet de mettre en évidence le « mouvement syntaxique ». Une phrase comporte un « mouvement syntaxique » lorsque sa structure de surface, c'est-à-dire de la manière dont elle est énoncée, est différente de sa structure profonde, c'est-à-dire la manière dont elle est organisée hiérarchiquement (Ben Shachar *et al.*, 2004). En français, un verbe doit être suivi à gauche par l'objet. Un exemple de contraste utilisé pour l'étude des mouvements syntaxiques est la comparaison de phrases objet-sujet, phrases qui comportent un mouvement syntaxique, à des phrases sujet-objet (Ben Shachar *et al.*, 2004).

Exemple de phrases objet-sujet / sujet-objet :

Le livre rouge que John donne à sa sœur / John donne le livre rouge à sa sœur

The red book John gave to his sister / John gave the red book to his sister

La phrase objet-sujet possède un mouvement syntaxique car le constituant 'le livre rouge' est placé avant le verbe 'donne'.

Il existe relativement moins d'étude concernant le **traitement de la phrase** par rapport aux deux autres composantes. Les 36 études recueillies ont donné 65 contrastes différents rapportant 59 pics frontaux et 102 pics temporo-pariétaux (Table 3). Par rapport aux autres composantes, le traitement de la phrase regroupe moins d'études, et seules les composantes de lecture et d'écoute passive présentent un déséquilibre entre nombres de contrastes frontaux et temporaux en faveur du lobe temporal.

Table 3. Liste des études de neuroimagerie et nombre de contrastes (entre parenthèse) inclus dans la méta-analyse rapportant des pics dans l'hémisphère droit au cours de processus phonologiques. Parmi ces 65 études, 22 ont inclus 32 contrastes dans le lobe frontal droit, et 28 ont rapporté 47 contrastes dans le lobe temporal et pariétal.

LOBE FRONTAL GAUCHE Type de contrastes (nombre de contrastes)	LOBE TEMPORAL / PARIÉTAL GAUCHE Type de contrastes (nombre de contrastes)
Compréhension de phrases ou de textes <i>Lecture ou écoute passive (3)</i>	Compréhension de phrases ou de textes <i>Lecture ou écoute passive (13)</i>
(Vingerhoets <i>et al.</i> , 2003; Meyer <i>et al.</i> , 2004)	(Fletcher <i>et al.</i> , 1995; Goel <i>et al.</i> , 1998; Scott <i>et al.</i> , 2000; Kansaku <i>et al.</i> , 2000; Goel <i>et al.</i> , 2000; Vingerhoets <i>et al.</i> , 2003; Crinion <i>et al.</i> , 2003; Meyer <i>et al.</i> , 2004)
<i>Mémoire de travail (1)</i>	
(Hashimoto et Sakai, 2002)	
<i>Attention (2)</i>	<i>Attention (5)</i>
(Homae <i>et al.</i> , 2002; Homae <i>et al.</i> , 2003)	(Homae <i>et al.</i> , 2002; Kriegstein <i>et al.</i> , 2003; Homae <i>et al.</i> , 2003)
<i>Compléter une phrase (3)</i>	<i>Compléter une phrase (3)</i>
(Kircher <i>et al.</i> , 2001; Nathaniel-James et Frith, 2002)	(Kircher <i>et al.</i> , 2001)
<i>Jugement sur le contenu sémantique (3)</i>	<i>Jugement sur le contenu sémantique (7)</i>
(Bottini <i>et al.</i> , 1994; Kuperberg <i>et al.</i> , 2000; Baumgaertner <i>et al.</i> , 2002)	(Bottini <i>et al.</i> , 1994; Kuperberg <i>et al.</i> , 2000; Zysset <i>et al.</i> , 2002; Baumgaertner <i>et al.</i> , 2002)
	<i>Imagerie mentale (2)</i>
<i>Jugement émotionnel (1)</i>	(Just <i>et al.</i> , 2004)
(Kotz <i>et al.</i> , 2003)	<i>Compréhension (3)</i>
	(Vogelely <i>et al.</i> , 2001; Ferstl et Von Cramon, 2002; Maguire et Frith, 2004)
Traitement syntaxique (19)	Traitement syntaxique (14)
(Stromswold <i>et al.</i> , 1996; Stowe <i>et al.</i> , 1998; Caplan <i>et al.</i> , 1999; Dapretto et Bookheimer, 1999; Embick <i>et al.</i> , 2002; Cooke <i>et al.</i> , 2002; Gandour <i>et al.</i> , 2003; Waters 2000; Caplan, 2001; Luke <i>et al.</i> , 2002; Cooke <i>et al.</i> , 2002; Waters <i>et al.</i> , 2003; Constable <i>et al.</i> , 2004; Ben Shachar <i>et al.</i> , 2004)	(Stowe <i>et al.</i> , 1998; Embick <i>et al.</i> , 2000; Luke <i>et al.</i> , 2003; Constable <i>et al.</i> , 2004; Ben Shachar <i>et al.</i> , 2004)

D. Sélection des régions d'intérêt

Nous avons choisi de nous intéresser aux régions de l'hémisphère gauche dont le rôle dans le traitement du langage est démontré en neuroimagerie fonctionnelle chez les sujets droitiers. Pour chaque étude, nous avons sélectionné tous les pics d'activation labellisés dans les régions d'intérêt suivantes: 1- les gyri frontaux inférieur et moyen, le gyrus précentral et l'insula, 2- les gyri temporaux inférieur, moyen et supérieur, et le gyrus fusiforme, 3- le gyrus supramarginal et le gyrus angulaire (Figure 6).

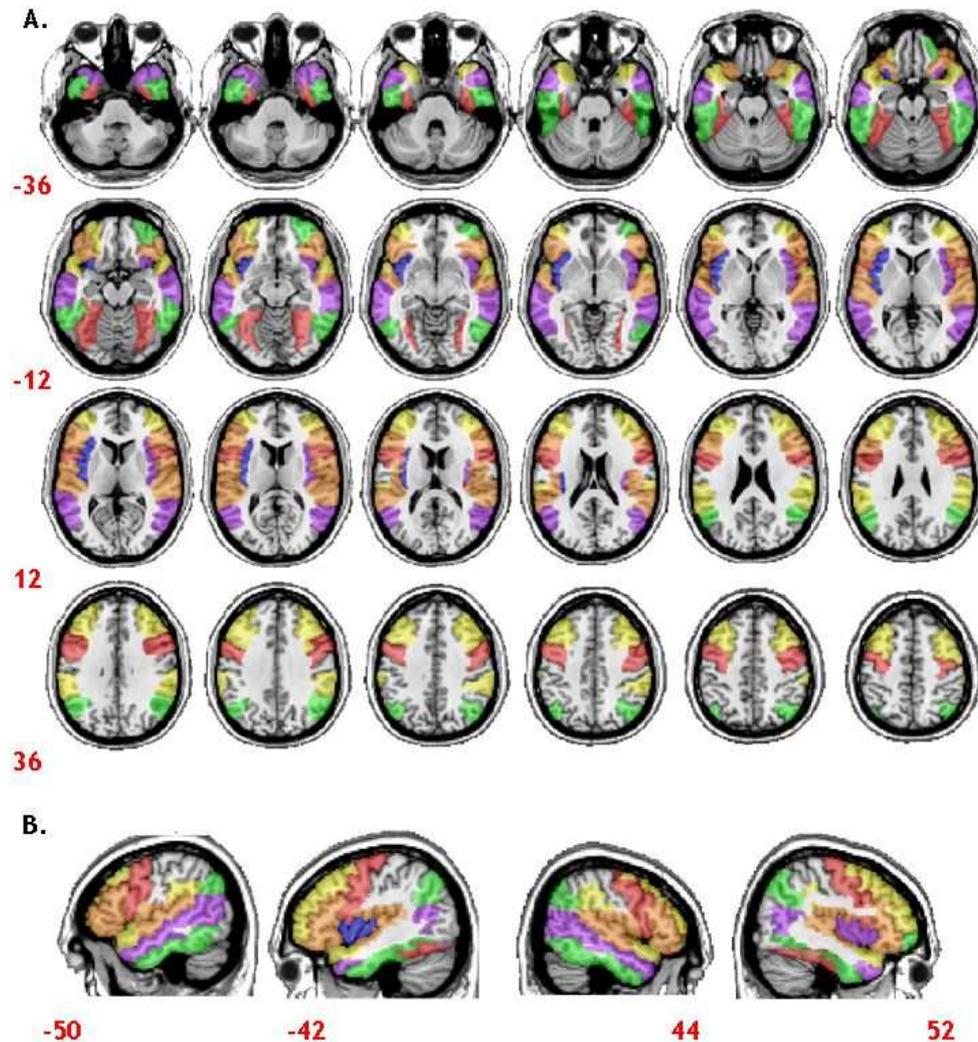


Figure 6. Atlas anatomique de la méta-analyse.

Coupes axiales (en haut, $-36 < z < 36$, pas de coupes = 4mm) et sagittales (en bas, -52, -42, 44, 52 en x) représentant les régions de l'atlas AAL (Automated Anatomical Labelling, Tzourio-Mazoyer *et al.*, 2002) sont superposées sur le patron MNI (Montreal Neurological Institute). Seules les régions utilisées pour la collecte de pics d'activation de la méta-analyse sont colorées : les gyri frontaux inférieurs (orange) et moyens (jaune) en incluant l'insula (bleue à gauche et violet à droite), le gyrus précentral (rouge), les gyri temporaux supérieur (orange), moyen (violet) et inférieur (vert), le pôle temporal (jaune), le gyrus angulaire (vert) et le gyrus fusiforme (rouge), ainsi que le gyrus pariétal inférieur (gyrus supramarginal en jaune).

E. Standardisation des données collectées

Bien que toutes les coordonnées des pics sélectionnés soient rapportées comme étant stéréotaxiques, quelques différences existent entre les différents laboratoires sur la manière dont les données sont transférées dans l'espace commun (Brett *et al.*, 2002; Chau et McIntosh, 2005). Ceci peut biaiser la comparaison de ces coordonnées.

La première différence est l'utilisation de différents algorithmes de normalisation spatiale¹³ (voir Annexe 1, paragraphe I.2.B, p199). Cependant, il a été démontré que cette source de variabilité avait un impact modéré sur les cartes fonctionnelles résultant de comparaison inter-sujet, et sur les coordonnées des pics d'activations (Crivello *et al.*, 2002).

La seconde différence, qui représente la source principale de variabilité, provient de la nature du *patron* cérébral utilisé lors de la procédure de normalisation spatiale (Annexe 1, paragraphe I.2.B.b- , p200). Les cerveaux de références peuvent ne pas avoir exactement la même morphologie, et de ce fait, il apparaît crucial de corriger ces différences si l'on désire comparer des pics d'activations issus d'études utilisant différents *patrons*. Deux *patrons* sont le plus communément utilisés en neuroimagerie : l'atlas stéréotaxique de Talairach (Talairach et Tournoux, 1988) et l'atlas MNI (Montreal Neurological Institute). Ces deux espaces stéréotaxiques ne sont pas strictement identiques, et présentent des différences morphologiques, l'espace MNI étant plus long, plus large et surtout plus haut que l'espace de Talairach.

Du fait de ces déformations, un même pic d'activation ne présentera pas les mêmes coordonnées stéréotaxiques selon qu'il sera normalisé dans l'un ou l'autre espace de référence. A cet égard, comparer des pics d'activation issus de deux espaces différents se traduira par une variabilité de localisation spatiale (Figure 7). De manière à bénéficier de la parcellisation anatomique macroscopique qui a été opérée dans notre laboratoire (Tzourio-Mazoyer *et al.*, 2002) sur le cerveau d'un sujet de la base de données MNI (voir Annexe 1, paragraphe I.4.C, p214), ce dernier espace de référence a été choisi comme espace de travail.

¹³ La normalisation spatiale consiste à placer un cerveau dans un espace commun après avoir pris en compte leurs différences de taille, forme, d'orientation.

2. SEGREGATION SPATIALE DES PICS

L'approche utilisée dans cette méta-analyse est basée sur la méthodologie développée par Gaël Jobard dans notre laboratoire afin d'identifier les différentes voies neurales de la lecture du mot. Cette approche quantitative s'est faite sur l'ensemble du cerveau en 3 dimensions (Jobard *et al.*, 2003).

Afin de constituer des groupes de pics d'activations proches spatialement - que nous appellerons **cluster**, il est nécessaire de déterminer les coordonnées qui pourront être rassemblées au sein d'un même groupe. Pour ce faire, nous avons procédé au calcul des distances euclidiennes séparant chacun des pics d'activation grâce au logiciel de statistique R (<http://www.r-project.org/>).

La distance euclidienne (ED) a été calculée à partir de la différence dans chaque incidence (x, y, z) des coordonnées du pic A avec celles du pic B, différence élevée ensuite au carré. La somme de ces trois différences au carré a été effectuée. La distance euclidienne entre les deux pics est la racine carrée de cette somme.

$$ED_{A-B} = \sqrt{[(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2]}$$

Ces distances euclidiennes ont été classées dans un arbre hiérarchique selon un **algorithme de classification** (nommé méthode « Ward ») dont le but est de minimiser l'écart-type intragroupe tout en assurant un écart-type intergroupe aussi élevé que possible, afin de produire différents groupes les plus éloignés possible les uns des autres. Le résultat de cette classification est un arbre hiérarchiquement organisé, au bas duquel chaque coordonnée est représentée. Un regroupement progressif des coordonnées s'opère si l'on remonte cet arbre hiérarchique (allant de N groupes tout au bas de cet arbre jusqu'à un seul groupe à son extrémité supérieure rassemblant l'ensemble des coordonnées : voir la Figure 8 pour exemple). Cet arbre hiérarchique est coupé à un certain niveau afin de déterminer la constitution des différents ensembles de coordonnées. Le résultat d'une telle section est un ensemble de groupes de points d'activation caractérisés par les coordonnées de leur centre de gravité, ainsi que par un écart-type exprimé en mm et s'étendant en x, y et z dans le cerveau commun à partir de ce point. Cet ensemble de points sera nommé cluster.

La **limite spatiale** a été fixée à 7 mm dans les trois directions x, y, z. Ce critère nous assurait que 95 % des pics étaient regroupés à moins de 14 mm du centre de masse du cluster. Cette distance correspond à la valeur moyenne de la résolution spatiale des analyses statistiques réalisées en TEP et en IRM (FWHM : full-width-at-half-maximum, largeur à mi-hauteur qui dépend du filtrage et de la valeur du signal dans les images). De plus, cette limite spatiale nous permettait par ailleurs d'obtenir un nombre suffisamment

élevé de clusters, tout en nous assurant une déviation standard intra-cluster faible (faible dispersion des pics au sein de chaque cluster), et une déviation standard inter-clusters suffisamment élevée (clusters éloignés les uns des autres).

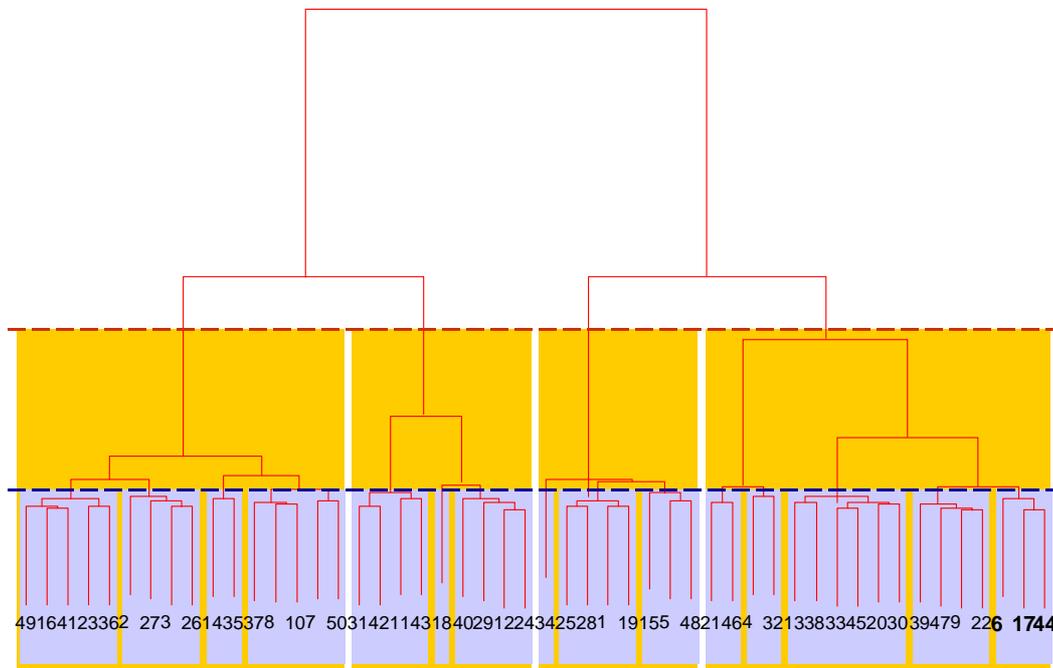


Figure 8. Exemple d'arbre hiérarchique obtenu suite à la procédure de ségrégation spatiale.

Cet arbre hiérarchique contient 50 pics d'activation. Chaque branche verticale au bas de l'arbre correspond à une coordonnée, et les branches horizontales correspondent à des groupements de points graduellement plus distants au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'arbre. Dans cet exemple, les points 17 et 44 (en bas à droite) sont très proches et peuvent être ensuite rapprochés du point 6. Sectionner l'arbre près du bas (ligne pointillée bleue) assurera un faible écart type au sein des groupes ($x = 2,59$, $y = 3,87$ et $z = 4,91$ en moyenne) tout en constituant un nombre élevé de groupes (15 dans cet exemple, indiqués par le fond bleu) avec le risque de séparer des activations en plusieurs groupes qui sont pourtant comparables en terme de localisation. Couper cet arbre plus haut par contre (ligne pointillée orange), réduira le nombre de groupes (à 4 ici, indiqués par le fond orange) et résultera en un écart-type plus important pour chacun des groupes ($x = 6,98$, $y = 6,87$ et $z = 8,38$ en moyenne).

Cette procédure de ségrégation spatiale a été effectuée pour chaque composante et par lobe (frontal et temporo-pariétal) indépendamment. Donc l'existence de clusters appartenant à différentes composantes qui ne pouvaient être **distingués spatialement**, a été recherchée. Un test de t de Student univarié a permis de tester si la distance euclidienne entre deux clusters était significativement différente de zéro (la variance associée à chaque ED est fonction du nombre de points par cluster et de la déviation standard de chaque cluster). Ainsi deux clusters situés à 7 mm et plus l'un de l'autre sont considérés comme significativement distincts ($p \leq 0,05$, voir partie résultats, Table 5, p50).

3. LIMITES DE L'APPROCHE

Le premier point concerne *la résolution* de cette approche assez grossière en terme de *composantes du langage* (phonologie, sémantique, traitement de la phrase). L'approche choisie permet de travailler à une résolution spatiale sans *a priori*, d'inclure un grand nombre d'études par catégorie mais de diminuer la résolution en terme de paradigme. Cependant, au cours de la discussion sur les rôles impartis à chaque région, nous fournirons au lecteur une analyse plus fine des tâches correspondant aux pics regroupées spatialement en cluster.

Par ailleurs il subsiste une *variabilité statistique importante inter études* (Brett *et al.*, 2002; Chau et McIntosh, 2005). Bien qu'une correction ait été appliquée pour minimiser les différences de patron, les facteurs tels que la taille des échantillons de la population étudiée ou bien les seuils statistiques auxquels étaient fournis les résultats n'ont pas été pris en compte.

Les résultats de cette méta-analyse ont été limités à la description des *régions corticales* appartenant au réseau du langage (voir paragraphe précédent II.1.D, p37) en excluant les régions sous-corticales (faible sensibilité du signal acquis dans ces régions) et les régions cérébelleuses (données souvent manquantes dans les résultats des études d'imagerie car le champ d'acquisition des images est souvent plus haut). Le résultat de ce travail doit être envisagé comme une revue de la littérature et un outil de travail pour comprendre les résultats obtenus dans l'étude d'imagerie fonctionnelle sur le traitement de la phrase affective auditive (chapitre 2, paragraphe III.3.A, p131), mais non comme une description de l'ensemble des aires corticales en jeu au cours de processus langagiers.

III. RESULTATS

A partir de 260 articles publiés entre 1989 et 2004, cette méta-analyse regroupe 129 études, comprenant 262 contrastes aboutissant à une activation dans l'hémisphère gauche. La sélection de ces 129 études a fourni au total 727 pics d'activation dans l'hémisphère gauche (Figure 9).

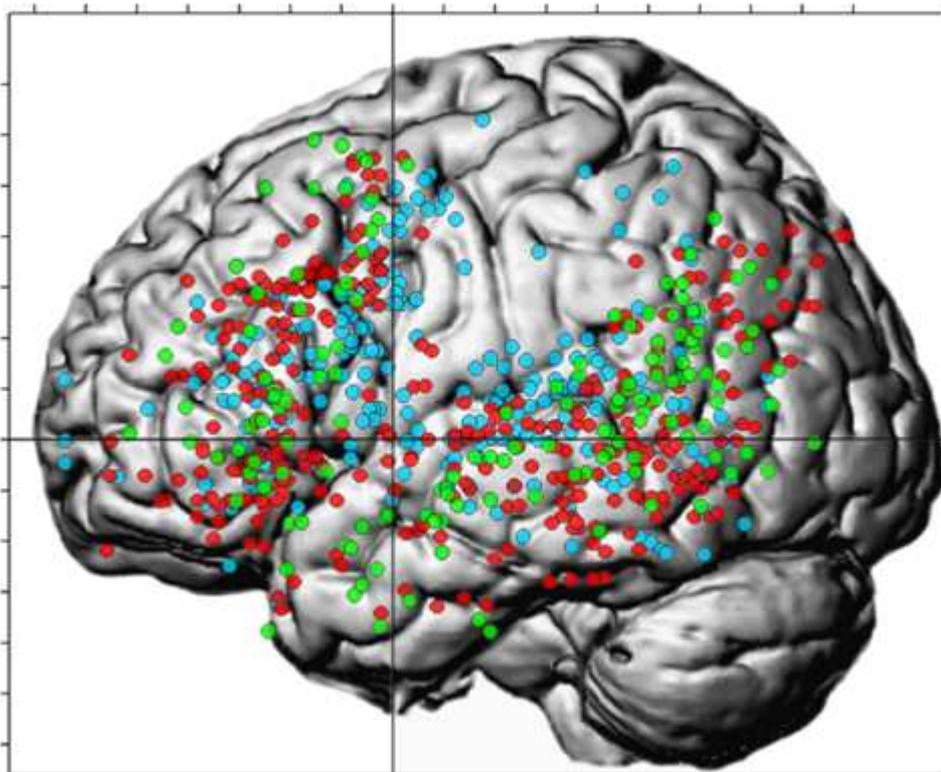


Figure 9. Vue d'ensemble des pics inclus dans la méta-analyse.

Projection sur une vue sagittale des 727 pics d'activation. La couleur des pics est codée suivant la composante d'appartenance : phonologie (bleu), sémantique (rouge), et traitement de la phrase (vert).

La ségrégation spatiale a abouti à la définition de 3 à 5 clusters suivant la composante dans le lobe frontal gauche et de 5 à 7 clusters dans les régions temporelle et pariétale (Figure 10.).

La déviation standard de ces différents clusters est comprise entre 8 et 19,5 mm (Table 4).

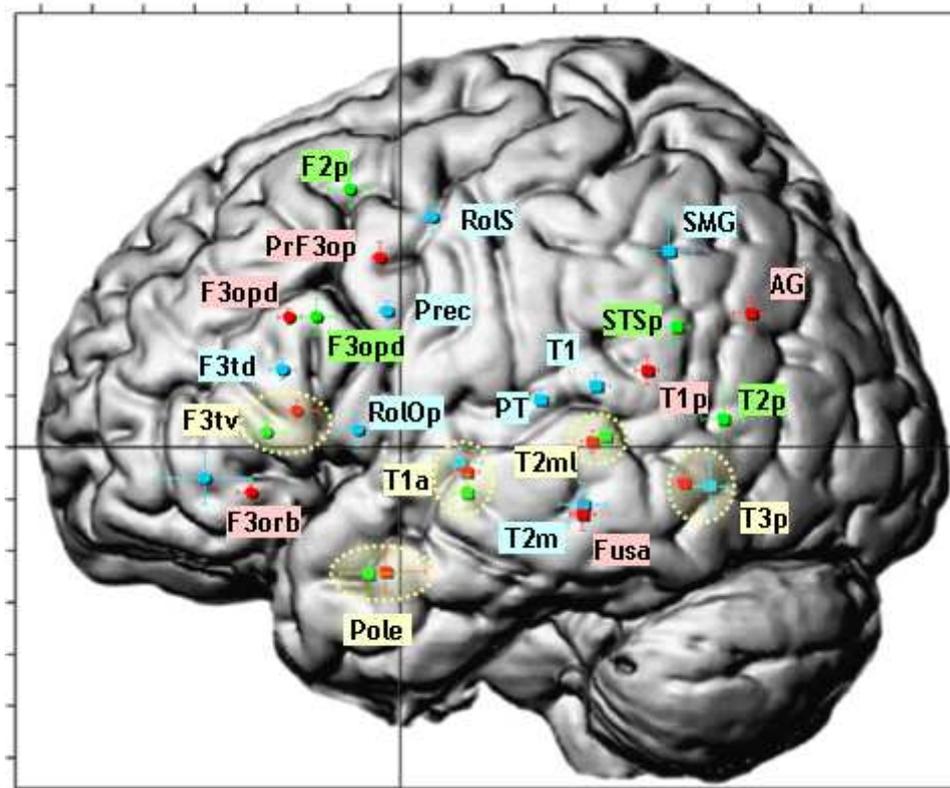


Figure 10. Vue d'ensemble des clusters issus de la ségrégation spatiale.

Les clusters identifiés pour le traitement phonologique (bleu), sémantique (rouge) et de la phrase (vert) ont été obtenus après la ségrégation des pics. Les clusters de différentes composantes qui ne sont pas distincts spatialement sont cerclés (jaune). Les barres d'erreurs correspondent à 2 fois l'erreur standard pour les coordonnées y et z. Le rendu de surface latérale de l'hémisphère gauche et la grille stéréotaxique correspondante sont fournis pour une référence anatomique. RolS, RolOp: sillon de Rolando et Opercule Rolandique, respectivement; F3t, F3op, et F3orb: pars triangularis, opercularis, et orbitaris du gyrus frontal inférieur, respectivement; SMG: gyrus supramarginal; PT: planum temporale; T1, T2, et T3: gyrus temporal supérieur, moyen, et inférieur, respectivement; Prec: gyrus précentral; F2: gyrus frontal moyen; PrF3op: jonction gyrus précentral /F3op; STS: sillon temporal supérieur; AG: gyrus angulaire; Fusa: gyrus fusiforme antérieur; a, p, l, m, d, v: antérieur, postérieur, latéral, moyen, dorsal, ventral.

Les contrastes phonologiques sont à l'origine d'autant d'activations frontales que temporales (125 et 122 respectivement). Le traitement sémantique inclus un nombre plus important d'activations temporales (145 frontales, 177 temporales). Comme le traitement sémantique, le traitement de la phrase engage plus le lobe temporal (102 pics) que le lobe frontal (59). Des tables en annexe fournissent le détail des pics inclus dans chacun des 30 clusters avec les références de l'article, une description des contrastes et les coordonnées transformées dans l'espace MNI (Annexe 2, p216).

Table 4. Centre de masse des clusters identifiés pour chaque composante dans les lobes frontal et temporo-pariétal.

	PHONOLOGIE						SEMANTIQUE						PHRASE					
	Label clusters	N pics	x	y	z	DS	Label clusters	N pics	x	y	z	DS	Label clusters	N pics	x	y	z	DS
FRONTAL	RolS	21	-47	-6	44	10,7	PrF3op	27	-42	4	36	11,4	F2p	14	-37	10	48	12,3
	Prec	36	-48	2	26	9,6	F3opd	41	-44	21	24	11,1	F3opd	14	-49	16	24	11,2
	F3td	38	-44	23	15	11,6	F3tv	38	-43	20	4	16,0	F3tv	30	-44	26	2	14,9
	RolOp	18	-48	8	3	14,2	F3orb	39	-37	31	-9	14,0						
	F3orb/F2	12	-33	37	-6	19,0												
Total pics	125						145						58					
TEMPORAL & PARIETAL	SMG	10	-42	-52	37	16,4	AG	27	-45	-68	26	14,1						
	T1	35	-50	-38	12	12,4	T1p	14	-55	-48	15	12,1	STSp	27	-49	-54	22	11,6
	PT	23	-60	-27	9	8,4												
	T1a	27	-56	-12	-3	14,7	T1a	30	-56	-13	-5	11,6	T1a	16	-57	-13	-8	10,1
	T3p	17	-50	-60	-7	14,5	T3p	38	-46	-55	-7	11,1	T2p	16	-40	-63	5	15,1
	T2m	10	-51	-35	-11	12,5	T2ml	20	-59	-37	1	8,0	T2ml	25	-57	-40	2	12,0
							Fusa	30	-38	-35	-13	13,6						
							Pole	16	-41	3	-24	19,5	Pole	18	-47	6	-24	15,7
Total pics	122						175						102					

Les clusters sont caractérisés par leur label anatomique abrégé, les coordonnées de leur centre de masse (x, y, z en mm) et leur déviation standard (DS calculée comme la racine carré de la moyenne élevée au carré des distances euclidiennes de chaque point à son centre de masse). Chaque cluster regroupe un certain nombre de pics d'activation issus de contrastes spécifiques de chaque composante. RolS, RolOp: sillon de Rolando, Opercule Rolandique, respectivement; F3t, F3op, et F3orb: pars triangularis, opercularis, et orbitaris du gyrus frontal inférieur, respectivement; SMG: gyrus supramarginal; PT: planum temporale; T1, T2, et T3: gyrus temporal supérieur, moyen, et inférieur, respectivement; Prec: gyrus précentral; F2: gyrus frontal moyen; PrF3op: jonction gyrus précentral /F3op; STS: sillon temporal supérieur; AG: gyrus angulaire; Fusa: gyrus fusiforme antérieur; a, p, l, m, d, v: antérieur, postérieur, latéral, moyen, dorsal, ventral.

A. Les clusters impliqués dans le traitement phonologique

Les pics activés au cours d'un traitement de type phonologique ont été regroupés en 5 clusters frontaux et 6 clusters pariéto-temporaux (Figure 11, Table 1). Les 3 clusters frontaux sont en position caudale, alignés verticalement et suivent l'anatomie du gyrus précentral. Le premier est situé au niveau de la partie haute du sillon de Rolando (RoIS), le second dans la partie basse du gyrus précentral (Prec), et le dernier est localisé dans l'opercule Rolandique (RoOp). Les deux derniers clusters sont plus antérieurs ; un cluster se situe dans la partie dorsale de la pars triangularis du gyrus frontal inférieur (F3td), et le second à la jonction de la partie orbitaire du gyrus frontal inférieur et du gyrus frontal moyen (F3orb/F2).

Quatre des six clusters temporaux sont localisés dans le gyrus temporal supérieur (T1) le long du sillon temporal supérieur, un à la partie la plus antérieure de T1 (T1a), un autre au niveau du *planum temporale* (PT), un à la partie moyenne de T1 (T1), et le dernier au niveau du gyrus supramarginal (SMG). Les deux autres clusters sont localisés près du sillon temporal moyen : l'un dans la partie moyenne du gyrus temporal moyen (T2m), l'autre dans la partie postérieure du gyrus temporal inférieur (T3p).

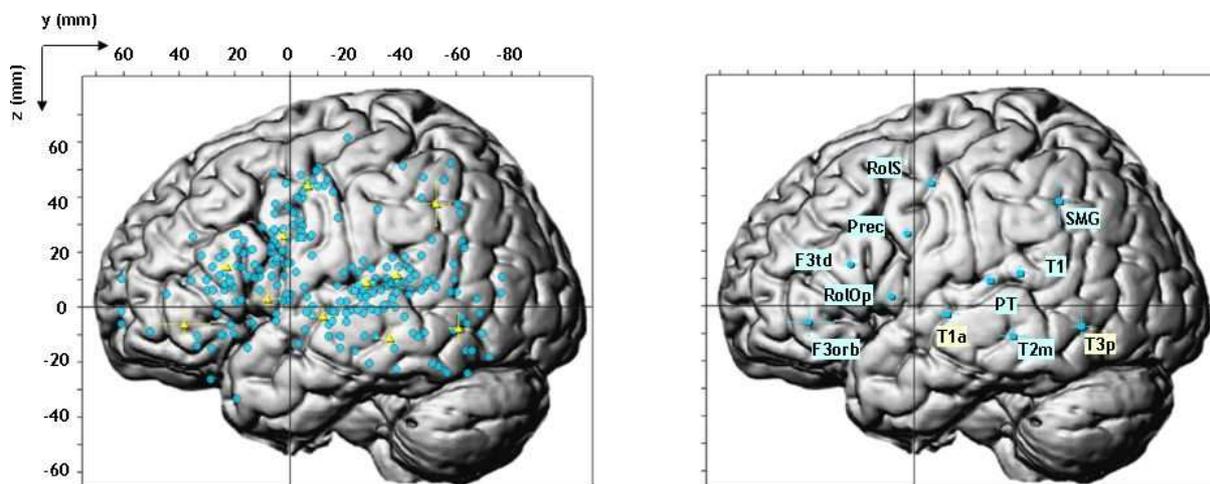


Figure 11. Les clusters impliqués dans le traitement phonologique

A gauche : projection sur une vue sagittale des 247 pics d'activation issus des études portant sur le traitement phonologique (bleu). A droite : Illustration des 5 clusters frontaux et des 6 clusters temporaux issus de la ségrégation des pics d'activation phonologiques (voir Figure 10. pour la légende).

B. Les clusters impliqués dans le traitement sémantique

Les pics impliqués dans le traitement sémantique se sont agrégés en 4 clusters frontaux et 7 clusters temporaux (Figure 12, Table 2). Les 4 clusters frontaux sont alignés verticalement dans le gyrus frontal inférieur gauche, un dans sa partie haute à la jonction avec le gyrus précentral (PrF3op), un autre dans la partie dorsale de la *pars opercularis* (F3opd), un dans la partie ventrale de la *pars triangularis* (F3tv), et enfin un dans la *pars orbitalis* (F3orb). La localisation de leur centre de masse diffère de celle des clusters phonologiques (Table 5).

Les 7 clusters temporaux recouvrent les gyri temporaux moyen et inférieur. Deux d'entre eux se superposent aux clusters T1a et T3p recrutés lors du traitement phonologique (ces clusters sémantiques ont reçu la même appellation abrégée). Les 5 autres clusters sont distants des clusters phonologiques : le plus rostral est situé au niveau du pôle temporal (Pole), le plus caudal est situé dans le gyrus angulaire (AG), les trois derniers sont localisés dans la partie antérieure du gyrus fusiforme (Fusa), la partie postérieure du gyrus temporal supérieur (T1p), et la partie latérale et moyenne du gyrus temporal moyen (T2ml).

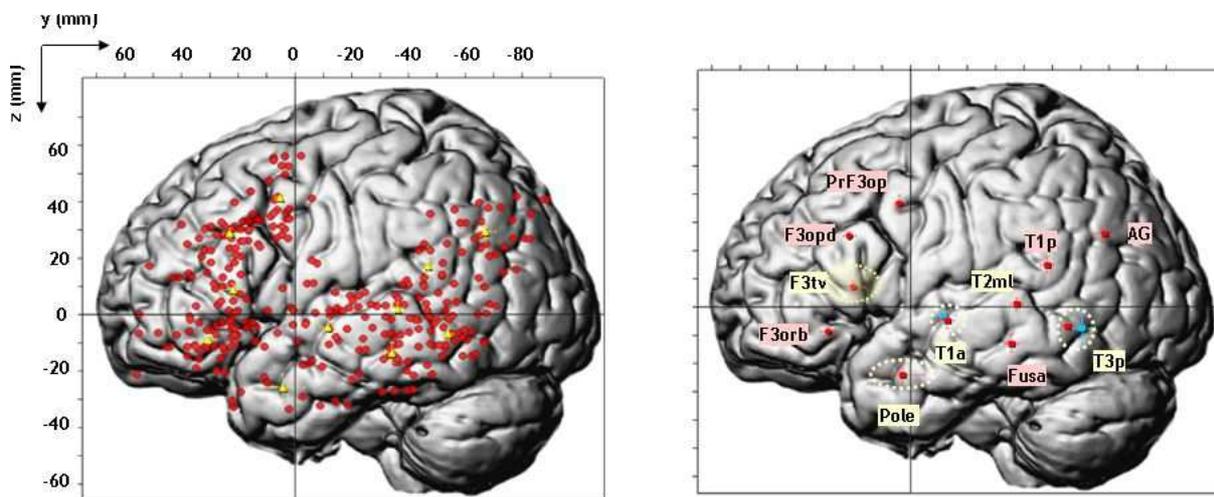


Figure 12. Les clusters impliqués au cours du traitement sémantique

A gauche : projection sur une vue sagittale des 337 pics d'activation issus des études portant sur le traitement sémantique (rouge). A droite : les réseaux neuraux sémantiques intègrent la partie dorsale et ventrale du lobe temporal. La partie ventrale est dédiée au traitement du matériel visuel et inclue T3p clusters à l'interface entre traitement phonologique et sémantique de matériel audio-visuel (jaune). La partie dorsale est dédiée au traitement de matériel auditif et inclue la région de la voix (T1a jaune), région à l'interface entre le traitement phonologique et sémantique. Dans le lobe frontal, les aires sémantiques sont localisées dans la partie antérieure du gyrus frontal inférieur (voir Figure 10. pour la légende).

C. Les clusters impliqués dans le traitement syntactico-sémantique de la phrase et du texte

Les 3 clusters frontaux et les 5 clusters temporaux sont dédiés au traitement de la phrase (Table 3, Figure 13). Dans le *lobe frontal*, F3opd et F3tv sont proches, voire confondus avec les clusters sémantiques (Table 5), tandis que le 3^{ième} situé dans la partie dorsale du gyrus frontal moyen (F2p) est significativement distant des clusters phonologiques et sémantiques.

Notons que les pics d'activations rapportés dans le lobe frontal pour le traitement syntaxique sont localisés dorsalement aux autres pics impliqués dans le traitement de la phrase (en vert clair Figure 13).

Au *niveau temporal*, 3 clusters sont aux mêmes coordonnées que les clusters sémantiques (Pole, T1a, T2ml), et 2 sont situés dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur (STSp), et dans la partie postérieure du gyrus temporal moyen (T2p) respectivement. Tous sont significativement à distance des clusters phonologiques et sémantiques. Aucune distribution spatiale particulière des pics impliqués dans le traitement syntaxique n'est observée dans le lobe temporal.

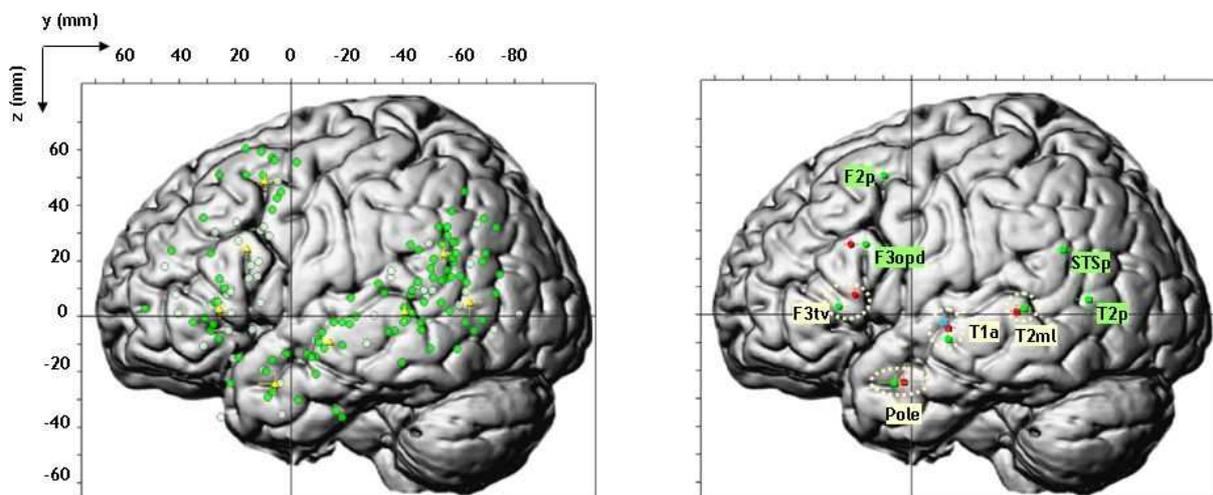


Figure 13. Les clusters impliqués dans le traitement syntactico-sémantique de la phrase et du texte

A gauche : projection sur une vue sagittale des 158 pics d'activation issus des études portant sur le traitement de la phrase (vert) et de la syntaxe (vert clair). Remarquez que dans le lobe frontal les pics issus des études sur la syntaxe sont localisés plus dorsalement. Dans le lobe temporal, la distribution des pics du traitement de la phrase et de la syntaxe est différente. A droite : 4 des clusters du traitement de la phrase sont proches des clusters sémantiques. Ces clusters sont cerclés en jaune. Les 4 autres clusters, différents des clusters sémantiques, sont localisés : un dans la partie postérieure du gyrus frontal moyen (F2p), un dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur (STSp), et le dernier dans la partie postérieure du gyrus temporal moyen (T2p) qui est probablement impliqué dans l'imagerie mentale du traitement de la phrase (voir Figure 10. pour la légende).

Table 5. Comparaison statistique des distances euclidiennes entre clusters de différentes composantes.

	Cluster 1	Cluster 2	ED (mm)	DS (mm)	p (t test)
FRONTAL	F3td _{phono}	F3opd _{sem}	10	2,56	< 0,001
	F3td _{phono}	F3opd _{phra}	12	3,50	< 0,001
	F3td _{phono}	F3tv _{sem}	11,4	3,20	< 0,001
	F3td _{phonO}	F3tv _{phra}	13	3,22	< 0,001
	F3tv _{sem}	F3tv _{phra}	6	3,80	0,10
	F3opd _{sem}	F3opd _{phra}	7	3,35	0,05
	PrF3op _{sem}	F2p _{phra}	14	3,87	< 0,001
	PrF3op _{sem}	RoLs _{phono}	14	3,24	< 0,001
	F2p _{phra}	RoLs _{phono}	20	3,92	< 0,001
TEMPORAL & PARIETAL	Pole _{sem}	Pole _{phra}	7	6,04	0,30
	T1p _{phono}	T1p _{sem}	12	4,09	< 0,01
	T1p _{phono}	T1p _{phra}	19	3,48	< 0,001
	T1p _{sem}	STSp _{phra}	11	3,86	< 0,01
	STSp _{phra}	AG _{sem}	15	3,61	< 0,001
	T2m _{pho}	Fusa _{sem}	13	4,89	< 0,05
	T2ml _{phra}	T2ml _{sem}	4	3,02	0,20
	T2p _{phra}	T3p _{phono}	16	3,09	<0,01
	T2p _{phra}	T3p _{sem}	15	4,20	< 0,001
	T3p _{phono}	T3p _{sem}	6	3,53	0,10
	T1a _{phono}	T1a _{sem}	2	3,48	0,60
	T1a _{sem}	T1a _{phra}	4	3,49	0,30
	T1a _{phra}	T1a _{phono}	6	4,13	0,20

Des tests de t appariés ont été calculés pour estimer si la distance euclidienne (ED) entre les paires de clusters issus de différentes composantes est significative. Phono : composante phonologique ; sem : composante sémantique ; phra : composante de traitement de la phrase ; F3t, F3op, et F3orb: pars triangularis, opercularis, et orbitaris du gyrus frontal inférieur, respectivement; F2: gyrus frontal moyen; PrF3op: jonction gyrus précentral /F3op; T1, T2, et T3: gyrus temporal supérieur, moyen, et inférieur, respectivement; STS: sillón temporal supérieur; AG: gyrus angulaire; a, p, l, m, d, v: antérieur, postérieur, latéral, moyen, dorsal, ventral, NS : non significatif.

D. Synthèse des résultats

La ségrégation spatiale des pics d'activations frontaux et temporo-pariétaux révèle une distribution des clusters phonologiques, sémantiques et de traitement de la phrase qui suit l'architecture gyrale. Nous avons vu que si certaines régions corticales hébergent un cluster appartenant à une seule composante, d'autres régions présentent un chevauchement pour deux ou trois composantes.

Les clusters phonologiques sont dans une position plus caudale dans le lobe frontal, suivant le gyrus précentral et dorsal dans le lobe temporal, à proximité des régions auditives primaires.

Dans la partie antérieure du sillon temporal supérieur, un gradient dorso-ventral regroupe les clusters T1a phonologique, sémantique et de traitement de la phrase. C'est la seule région cérébrale à disposer d'une intersection entre les trois composantes, formant une sorte de carrefour.

Les **composantes sémantiques et de traitement de la phrase** présentent un grand nombre de clusters très proches spatialement, laissant entrevoir une interaction forte entre ces deux composantes. Dans le lobe temporal, ces clusters s'organisent le long du sillon temporal supérieur, du pôle temporal au gyrus angulaire. Au niveau frontal, si la pars triangularis du gyrus frontal inférieur présente deux clusters sémantique et de traitement de la phrase, les autres clusters se répartissent en avant pour les clusters sémantiques tandis que les clusters du traitement de la phrase sont plus postérieurs et plus haut.

Le rôle de ces différents clusters sera discuté à partir d'une analyse fine des contrastes qui les composent (voir Annexe 2, p216).

IV. DISCUSSION

Afin de discuter les résultats obtenus de façon didactique, nous allons traiter les résultats de la ségrégation spatiale en terme de *réseau neural* du traitement phonologique, sémantique, et de la phrase intervenant uniquement au cours de la compréhension du discours oral lecture (pour une discussion complète des résultats, notamment concernant la lecture, voir Vigneau *et al.*, 2006). Nous aborderons également la question des *interactions* entre ces trois réseaux. Ce travail a permis de caractériser les régions cérébrales mises en jeu pour le traitement des éléments ortholinguistiques du discours oral, ce qui nous permettra d'analyser les résultats obtenus au cours de l'étude sur la compréhension de la phrase affective (chapitre 2, paragraphe III.3.A, p131).

Pour aborder ces différentes questions, le rôle de chaque cluster sera discuté grâce à une analyse des contrastes qui le composent. Par ailleurs, l'objectif de ce travail étant de mieux comprendre les bases neurales du langage, il apparaît important d'inclure dans la discussion du rôle fonctionnel des clusters des études qui ne fournissaient pas de résultats en terme de coordonnées stéréotaxiques mais qui étaient néanmoins cruciales pour la

compréhension du fonctionnement cérébral au cours de la perception du langage. C'est le cas des études qui utilisent une approche par régions d'intérêt (Friederici *et al.*, 2003), ou des études incluant des patients cérébrolésés (Saygin *et al.*, 2003; Dronkers *et al.*, 2004), les études de connectivité (Catani *et al.*, 2002; Duffau *et al.*, 2005) et les revues de la littérature (Hickok et Poeppel, 2000; Bookheimer, 2002; Friederici et Alter, 2004).

*A partir de cette discussion, un modèle neurolinguistique de la compréhension de la phrase, présentée auditivement, sera exposé sous la forme de différentes voies de traitement. Le relais entre chaque cluster le long de ces voies de traitement et entre chaque voie sera dans la mesure du possible étayé par la littérature sur la connectivité des réseaux neuraux (Catani *et al.*, 2005; Duffau *et al.*, 2005). Ce modèle demandera néanmoins à être vérifié par des études intra-groupes permettant une approche par modélisation des relations fonctionnelles entre les différentes régions (pour méthode voir Ethofer *et al.*, 2005). Cette approche permet de calculer les corrélations entre l'activité fonctionnelle de différentes régions pendant une tâche donnée, et de définir un ordre dans le recrutement des régions, ce que nous ne pouvons que proposer à partir des résultats de la neuroimagerie.*

Nous discuterons tout d'abord l'organisation du réseau phonologique, avant d'aborder la question de la relation entre le réseau sémantique et celui du traitement de la phrase.

A. Le réseau phonologique : rôle de la boucle audio-phonatoire dans la coordination audio-motrice

La boucle phonologique audio-phonatoire a été décrite par Gregory Hickok (Hickok *et al.*, 2003). Elle repose sur un réseau fronto-temporal activé à la fois pendant la *production* silencieuse du langage et *l'écoute* des sons du langage. Cette activation, au cours de la production et de l'écoute, a été démontrée dans des études intra-groupes qui n'ont pas été incluses dans la méta-analyse car elles reposaient sur une approche par région d'intérêt (Buchsbaum *et al.*, 2001; Hickok *et al.*, 2003; Okada *et al.*, 2003).

a- La composante motrice frontale

Elle est composée de trois clusters phonologiques : RolS, Prec, RolOp.

➤ La région motrice de la bouche

Les coordonnées du centre de masse de ce cluster (-47, -6, 44) sont proches de ceux de la région motrice primaire de la bouche (-46, -11, 35) définie dans une méta-analyse précédente (Fox *et al.*, 2001). En regardant les contrastes regroupés à l'intérieur de ce cluster, on constate que des tâches motrices y sont fortement représentées : articulation de phonèmes (Bookheimer *et al.*, 2000), de syllabes (Wildgruber *et al.*, 2001), de lettres (Jessen *et al.*, 1999), de pseudo-mots (Riecker *et al.*, 2000), ainsi que la répétition de mots (Price *et al.*, 1996b). Cette région est également impliquée dans la **répétition silencieuse** de lettres pendant une tâche de mémoire de travail (Cohen *et al.*, 1997; Rypma *et al.*, 1999). RolS correspond à la région motrice impliquée dans le contrôle des mouvements de la bouche.

Cette région présente une *asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche*, attestant de sa spécialisation pour le langage, ainsi qu'une corrélation entre son activité et le rythme de production de syllabes (Fox *et al.*, 2000). Son asymétrie gauche diminuant lorsque la fréquence de production de syllabes augmente (Wildgruber *et al.*, 2001), sa contribution est donc plutôt liée au contrôle d'aspects moteurs de bas niveau.

Cette région est également recrutée lors de la discrimination auditive de syllabes (Hickok et Poeppel, 2004). Le recrutement de cette région motrice au cours d'une tâche d'écoute indique que la perception des syllabes pourrait correspondre à la simulation de l'activité motrice correspondant à l'articulation de ces mêmes syllabes.

Cette hypothèse est confirmée par une étude indiquant que cette même région est recrutée par la production et l'écoute de syllabes chez les mêmes sujets (Wilson *et al.*, 2004). Par ailleurs une étude de stimulation transcrâniale (TMS) indique l'existence d'une activation des muscles articulatoires au cours de l'écoute du discours (Fadiga *et al.*, 2002). Ce résultat est un argument en faveur de la mise en jeu d'aires motrices impliquées dans les mouvements articulatoires au cours de la compréhension du langage.

RolS peut donc être considéré comme la région motrice impliquée dans le contrôle des mouvements de la bouche, notamment les mouvements articulatoires. Au cours de la perception du langage, cette région permet une simulation silencieuse de l'activité motrice buccale correspondant à l'articulation qui participerait à la compréhension du discours.

➤ **La région motrice de la langue et du pharynx**

Le cluster situé dans la partie plus basse du gyrus précentral (Prec) est composé de pics plus activés au cours de tâches phonologiques que sémantiques, comme lors de la comparaison de la lecture de pseudo-mots avec la détection de mots (Herbster *et al.*, 1997). En effet, les pseudo-mots sont construits de manière à être prononçables, c'est-à-dire « décomposables » en phonèmes, permettant ainsi un traitement de nature phonologique. Mais ces stimuli sont dépourvus de sens et ne nécessitent pas, par conséquent, l'accès au réseau sémantique. On trouve également dans ce cluster des contrastes du type : détection de rimes (phonèmes identiques en fin de mots) comparée à la détection de synonymes (Roskies *et al.*, 2001) ; détection d'un phonème comparée à l'écoute passive de mots et de pseudo-mots (Zatorre *et al.*, 1992) ; comptage des syllabes d'un mot par rapport à la catégorisation sémantique de ces mots (Poldrack *et al.*, 1999). Par ailleurs, cette région est recrutée par les mouvements de la langue (Riecker *et al.*, 2000), et par des mouvements complexes orolaryngés (Braun *et al.*, 1997). Le recrutement de cette région motrice de la langue et du larynx au cours de tâches phonologiques reflète probablement la composante de répétition silencieuse nécessaire à toutes les tâches que nous venons de décrire.

Cette composante de répétition silencieuse est également nécessaire au cours de tâches de mémoire de travail, expliquant le recrutement de Prec au cours de la réalisation de telles tâches (Paulesu *et al.*, 1993; Cohen *et al.*, 1997; Rypma *et al.*, 1999; Bunge *et al.*, 2001; Hautzel *et al.*, 2002).

Prec est une région en charge des mouvements de la langue et du larynx. Cette partie basse du gyrus précentral participerait, avec RolS, à la composante de répétition silencieuse du langage.

➤ **L'opercule Rolandique : contrôle des ajustements sensori-moteurs de la prononciation**

Le dernier cluster localisé au niveau de l'opercule Rolandique allant jusqu'au gyrus postcentral de l'insula (RolOp) est activé au cours de l'articulation silencieuse ou non de

syllabes (Heim *et al.*, 2002), de l'articulation silencieuse de pseudo-mots (Warburton *et al.*, 1996; Herbster *et al.*, 1997) ou de la répétition de mots (Price *et al.*, 1996b). Cette région fait partie des régions d'intégration sensorielle, plaidant en faveur d'un rôle pour le contrôle des ajustements sensori-moteurs pendant l'articulation du langage (Mesulam, 2000).

Cette région est également recrutée au cours de la présentation auditive de stimuli comme lors de tâche d'écoute de syllabes (Zatorre *et al.*, 1992), d'attention sélective à une syllabe présentée à l'oreille droite (Jancke et Shah, 2002), lors de tâche de rimes (Zatorre *et al.*, 1996). Ainsi, RolOp n'est pas seulement impliqué par la production mais également dans la compréhension de matériel verbal présenté auditivement.

L'*asymétrie* de cette région dépend de la nature du matériel contrairement à la région motrice de la bouche : une asymétrie gauche est observée pour la restitution des mots de l'année, mais lorsque que les sujets chantent silencieusement l'*asymétrie* est en faveur de l'hémisphère droit (Wildgruber *et al.*, 1996).

RolOp contrôlerait les ajustements sensori-moteurs pendant l'articulation du langage, nécessaire à la fois au cours de la production du langage, mais également pour la compréhension.

b- La composante auditive temporelle

Les régions temporelles composant la boucle audio-phonatoire sont localisées à proximité des régions auditives primaires. Ce sont le *planum temporale* (PT) et la partie latérale du gyrus temporal supérieur située juste en arrière de PT (T1). Cette région T1 inclut la région auditive primaire de Heschl.

Le *planum temporale* est plus impliqué au cours de tâches phonologiques qu'au cours de tâches sémantiques. Par exemple, l'activité du *planum temporale* est plus importante pendant la tâche de détection de pseudo-mots que pendant la tâche de détection de mots au cours d'une tâche d'attention auditive sélective (Hugdahl *et al.*, 2003). Le *planum temporale* est également recruté durant la perception de syllabes et l'écoute de syllabes avec une consonne de départ non voisée¹⁴ (Jancke *et al.*, 2002). Cette région est également engagée dans le traitement des caractéristiques temporelles rapides du signal auditif de sons ou de consonnes (Joanisse et Gati, 2003).

¹⁴ Le signal acoustique d'une consonne non voisée montre qu'il n'y a pas de temps entre la vibration des cordes vocales et la sortie du son contrairement aux consonnes voisées, en anglais Voice Onset Time ou VOT.

Ce rôle dans le traitement des propriétés temporelles rapides est confirmé par sa *spécialisation hémisphérique gauche*. En effet, David Poeppel a montré que les régions temporales gauches seraient préférentiellement recrutées au cours du traitement des fenêtres acoustiques temporelles courtes (Poeppel, 2003). Par ailleurs, un avantage de l'oreille droite au cours d'une présentation dichotique de syllabes se refléterait au niveau fonctionnel par une plus grande activité du *planum temporale* (Jancke et Shah, 2002). De plus, cette région montre une plus grande surface dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit (Geschwind et Levitsky, 1968). Cette asymétrie anatomique pourrait être liée à l'asymétrie fonctionnelle perceptive.

Notez que cette région gauche est également activée au cours de tâches intégrant du matériel présenté visuellement comme la perception de lettres écrites (Jessen *et al.*, 1999; Rypma *et al.*, 1999; Paulesu *et al.*, 2000). Cette participation du *planum temporale* en l'absence de stimulation auditive a été démontrée par Gregory Hickok et collaborateurs. Ils signalent, avec d'autres, que PT est activé aussi bien par l'écoute que par la production du langage. La région juste postérieure du **gyrus temporal supérieur (T1)** est elle-même activée dans les deux cas (Buchsbaum *et al.*, 2001; Hickok *et al.*, 2003; Okada *et al.*, 2003). Ces auteurs ont également montré que ces activations temporales sont accompagnées d'une coactivation des régions motrices précentrales et de l'opercule Rolandique, confirmant ainsi l'existence d'une **boucle audio-phonatoire**.

Le traitement des éléments acoustiques temporels rapides comme le signal auditif des sons du langage serait réalisé au niveau du PT gauche. Cette région est non seulement impliquée dans le traitement de matériel verbal présenté auditivement, mais également au cours de la production de ce type de matériel.

c- Le rôle de la boucle audio-phonatoire

Les régions motrices et auditives forment un réseau grâce à une connexion de fibres blanches qui relie le gyrus précentral et la pars opercularis du gyrus frontal inférieur à la partie postérieure du gyrus temporal supérieur qui inclut le *planum temporale* et la partie latérale du gyrus temporal supérieur : c'est le **faisceau arqué** ou faisceau longitudinal supérieur (Dejerine, 1980; Nieuwenhuys *et al.*, 1988; Parker *et al.*, 2005).

Ce réseau a été décrit par Gregory Hickok et David Poeppel comme formant la **boucle audio-phonatoire** (Figure 14). Cette boucle audio-phonatoire permet une représentation sonore mais également motrice des phonèmes aussi bien au cours de la production du langage qu'au cours de la compréhension du langage oral. La perception des phonèmes passe par une simulation motrice des sons perçus (Hickok et Poeppel, 2000).

Selon la théorie motrice du langage, la compréhension repose donc sur la mise en jeu de cette boucle audio-phonatoire (Lieberman et Whalen, 2000), prémisses à l'accès au réseau sémantique. Les gestes articulatoires sont donc communs mais également à l'origine tant de la production que de la perception du langage (Lieberman et Whalen, 2000; Lieberman, 2002). Ce processus est crucial pour le développement du langage, et continue à l'être plus tard (Lieberman et Whalen, 2000).

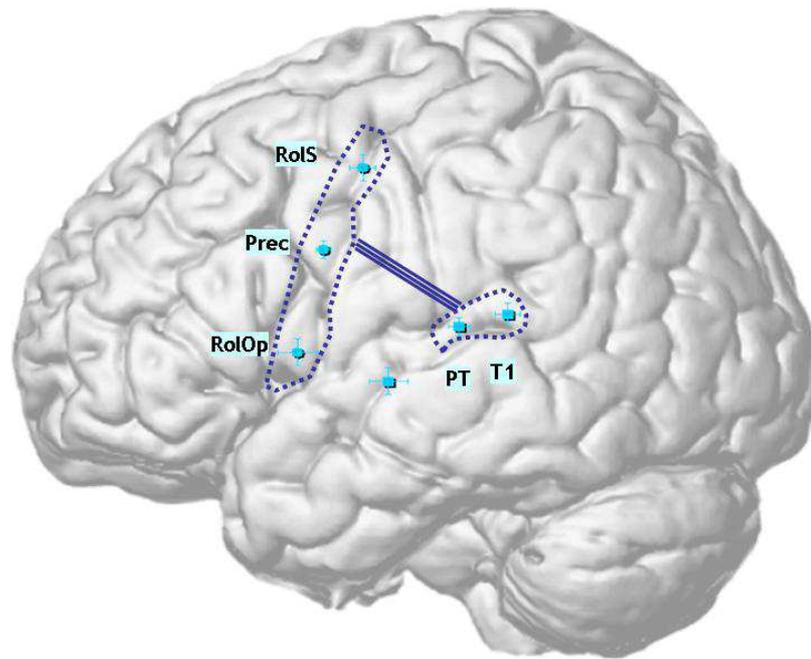


Figure 14. La boucle phonologique de coordination audio-motrice

Elle inclut les clusters moteurs et prémoteurs organisés le long du sillon central du lobe frontal qui sont reliés aux régions unimodales auditives PT et T1 du lobe temporal par le faisceau arqué (symbolisé par les trois lignes pleines bleues, voir Figure 10. pour la légende).

B. Une région « carrefour » entre traitement phonologique, sémantique et traitement de la phrase : la région T1a

La partie antérieure du gyrus temporal supérieur, T1a, est la seule région où les clusters phonologique, sémantique et de traitement de la phrase sont proches. La mise en évidence d'un **gradient dorso-ventral des trois composantes au niveau de T1a** est au-delà de la résolution spatiale de la présente analyse. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse qu'elle puisse servir de **point de carrefour** des trois composantes et qu'elle serait dédiée au traitement des informations de nature auditive.

Cette position particulière ferait de T1a une région cruciale au cours du *développement du langage*. En effet, la compréhension du langage nécessite que toutes les informations ortholinguistiques soient effectivement traitées, et intégrées. Cette

intégration pourrait avoir lieu dans ce type de région carrefour. D'un point de vue *phylogénétique*, elle apparaît comme un élément important de la communication puisqu'une étude récente montre que la partie antérieure du sillon temporal supérieur du singe est impliquée dans le traitement des cris spécifiques de l'espèce (Gil-da-Costa *et al.*, 2004). Cette région présente en outre, chez le primate, une *asymétrie* en faveur de la gauche et pourrait potentiellement correspondre à un **précurseur des régions corticales qui sont impliquées dans le traitement du langage chez l'homme** (Poremba *et al.*, 2004).

Détaillons tout d'abord les contrastes qui constituent chacun des trois clusters.

Le cluster phonologique T1a inclut **l'aire sélective de la voix humaine**, région qui répond préférentiellement à la voix humaine par rapport aux sons de l'environnement (Belin *et al.*, 2002). Contrairement aux clusters PT et T1 phonologiques, ce cluster regroupe des pics activés durant des tâches dépourvues de composantes motrices ou de mémoire de travail comme l'écoute passive de syllabes (Zatorre *et al.*, 1992; Sekiyama *et al.*, 2003; Poeppel *et al.*, 2004), de pseudo-mots (Binder *et al.*, 2000; Belin *et al.*, 2002) et de détection de rimes (Booth *et al.*, 2002).

Il n'est pas possible de dissocier le cluster phonologique du cluster sémantique avec cette approche par ségrégation spatiale, mais des études intragroupes ont permis une ségrégation fonctionnelle de T1a en une partie dorsale (incluant la région sélective de la voix humaine) dédiée à la phonologie et une partie ventrale impliquée plutôt dans le **traitement des mots intelligibles** (Binder *et al.*, 1997; Scott *et al.*, 2000; Vouloumanos *et al.*, 2001). Cette partie ventrale sémantique est recrutée dans des tâches d'écoute passive ou de lecture de mots (Bookheimer *et al.*, 1995; Binder *et al.*, 1996; Herbster *et al.*, 1997; Hagoort *et al.*, 1999; Giraud *et al.*, 2000; Wagner *et al.*, 2000; Wise *et al.*, 2001; Sevostianov *et al.*, 2002; Specht et Reul, 2003) et des tâches d'écoute dichotique de mots (Hugdahl *et al.*, 2003). Cette région semble **impliquée dans le traitement de la voix énonçant un discours intelligible**.

Le cluster T1a du traitement de la phrase se trouve à 6 mm sur l'axe des z par rapport au cluster sémantique. Dans une position plus ventrale il est indissociable du cluster sémantique par notre approche. Les contrastes agrégés dans ce cluster correspondent à des tâches d'écoute de phrases et de textes, incluant la comparaison de stimuli porteurs de sens à des stimuli inintelligibles (Scott *et al.*, 2000; Kansaku *et al.*, 2000; Vingerhoets *et al.*, 2003; Crinion *et al.*, 2003; Meyer *et al.*, 2004). T1a est également recruté pendant des tâches grammaticales basées sur la lecture silencieuse (Bottini *et al.*, 1994; Luke *et al.*, 2002; Vingerhoets *et al.*, 2003).

Une hypothèse peut être envisagée concernant l'implication de cette région dans le traitement des éléments acoustiques caractéristiques de la prosodie. Nous avons vu que les éléments acoustiques de la prosodie permettait de regrouper les sons pour former des mots, les mots en syntagmes et les syntagmes en phrase (voir paragraphe 1.2.A, p11). C'est pourquoi la colocalisation des clusters des trois composantes dans cette région en fait une candidate idéale pour le traitement de la prosodie. Par ailleurs, la prosodie est un élément acoustique spécifique de la voix humaine, argument en faveur du rôle de cette région sélective de la voix humaine dans le traitement de la prosodie. De plus, l'implication de cette région dans le traitement d'élément spécifique de la voix humaine est confortée par le fait qu'elle est recrutée lorsque l'attention est portée sur la voix du locuteur au cours de l'écoute de phrases (Kriegstein *et al.*, 2003).

Un premier point à soulever contre cette hypothèse est l'implication de cette région au cours de la lecture. Cependant, il a été montré qu'au cours de la lecture à voix haute la *prosodie grammaticale* est correctement ajoutée et permet la décomposition du message verbal en unité de sens (Koriat *et al.*, 2002). Ce résultat permet d'envisager qu'au cours de la lecture silencieuse cette prosodie grammaticale soit également mise en place.

Le point suivant est de savoir si les études portant sur les bases neurales de la prosodie ont déjà mis en évidence l'implication de cette région. Les études ou les contrastes permettant de mettre en évidence les bases neurales de la prosodie grammaticale et/ou affective n'ont pas été incluses dans la méta-analyse, étant donné le peu d'études qui ont abordé cette question (voir introduction, paragraphe 1.2.B.c- , p20). La mise en place d'une catégorie correspondant à une composante de cet élément paralinguistique du langage a été rendue impossible car la ségrégation d'un nombre de pics trop faibles aurait fourni des résultats difficilement interprétables. En effet, les clusters auraient présenté une trop grande déviation standard par rapport aux clusters des trois autres composantes. Une solution aurait pu consister à inclure les études sur la prosodie dans une des autres composantes issues de la classification adoptée dans la méta-analyse. Cependant, nous avons vu que la prosodie possédait différentes fonctions : des fonctions phonologiques, sémantiques, syntaxiques et pragmatiques (voir introduction, paragraphe 1.2.A, p11). Et malgré l'existence d'une distinction entre prosodie grammaticale assurant les fonctions phonologiques, sémantiques et syntaxiques et prosodie émotionnelle assurant les fonctions pragmatiques, il apparaît impossible de faire entrer les résultats de telles études dans notre classification. Pour résoudre cette difficulté méthodologique, il apparaît essentiel d'intégrer ces études au cours de la discussion, et de vérifier la localisation des

pics rapportés avec la position des clusters T1a. Cette étape de vérification de localisation montre que des tâches de discrimination de la prosodie grammaticale (Wildgruber *et al.*, 2004)¹⁵ ou de discrimination émotionnelle sur des « phrases » sans contenu lexical (Mitchell *et al.*, 2003; Kotz *et al.*, 2003) comparées à des tâches de repos recrutent la région T1a. Lorsque ces mêmes tâches incluant de la prosodie émotionnelle sont comparées à l'écoute de stimuli contenant une prosodie neutre (uniquement grammaticale), la différence d'activité n'est pas significative dans cette région.

Mais T1a traiterait-elle tous les éléments acoustiques de la prosodie à savoir la durée, la fréquence et l'intensité ? Selon la théorie sur la latéralisation des traitements acoustiques (ou cued-lateralized theory), le traitement des informations spectrales, correspondant à la fréquence fondamentale de la prosodie, serait opéré principalement par les régions temporales droites tandis que le traitement des informations temporelles, tel que la durée et l'intensité, serait réalisé de manière optimale par les régions temporales gauches (Zatorre et Belin, 2001; Zatorre *et al.*, 2002; Tervaniemi et Hugdahl, 2003). Ainsi, nous pouvons postuler que T1a à gauche opérerait principalement l'analyse des informations acoustiques temporelles de la prosodie que celle-ci soit grammaticale ou affective (pour une discussion plus approfondie sur le rôle de T1a dans le traitement prosodique voir chapitre 2, paragraphe III.3.C.c- , p149).

|| *T1a gauche pourrait être impliquée dans le traitement des éléments acoustiques temporels de la prosodie grammaticale et émotionnelle.*

C. L'intégration syntactico-sémantique au niveau de la phrase

Si la distinction entre réseau phonologique et sémantique est claire, *le réseau sémantique et celui du traitement de la phrase semblent en grande partie intriqués*. En effet, deux clusters frontaux (F3opd, F3tv) et trois clusters temporaux (Pole, T2ml, et T1a) apparaissent indissociables en regard de la composante à laquelle ils appartiennent. La difficulté à dissocier ces deux éléments est renforcée, dans notre étude, par l'inclusion de contrastes qui n'étaient pas destinés à séparer fonction sémantique et syntaxique au cours de la compréhension de phrases (comme la comparaison d'écoute passive de phrase avec l'écoute de discours inintelligible, Scott *et al.*, 2000). Cette difficulté pourrait également

¹⁵ Le sujet devait choisir parmi deux phrases celle qui répondait le mieux à la question, en fonction de l'accentuation des mots à l'intérieur de la phrase. Par exemple, choisir si la phrase « le foulard est dans le coffre » répond mieux à la question « Où est le foulard ? » lorsque l'accentuation est portée sur le mot 'foulard' ou le mot 'coffre'.

être liée au fait que même pour les études portant sur les bases neurales de la syntaxe, les auteurs comparent habituellement des phrases syntaxiquement complexes à des phrases simples ou à des phrases dépourvues de sens. L'interprétation d'activations résultant de tels contrastes apparaît difficile puisque l'on ne peut pas savoir si elles sont liées à l'augmentation du traitement sémantique ou du traitement syntaxique. Une étude sur les bases neurales des composantes sémantiques et syntaxiques au cours de la compréhension de phrases a montré l'existence d'un considérable recouvrement spatial des fonctions sémantiques et syntaxiques dans les régions péri-sylviennes (Roder *et al.*, 2002). Nous avons donc choisi de discuter les différents clusters comme composant un réseau intégré plutôt qu'en terme de réseau sémantique et syntaxique distinct.

Un modèle descriptif va être proposé pour intégrer les différents rôles des clusters, rôles suggérés par l'analyse des tâches cognitives incluses. Ce modèle est à envisager comme une proposition qui permet d'organiser les résultats en deux voies d'intégration syntactico-sémantique, au *niveau temporal*. Ces deux voies sont impliquées dans la compréhension de phrases présentées auditivement : la **voie dorsale antérieure** qui va de T1 au Pole en passant par T1a et qui pourrait être le support de l'encodage ou de la restitution en mémoire à long terme, et la **voie dorsale postérieure** qui part de PT en allant vers AG en passant par T2ml et STSp, qui débiterait avec le traitement des sons du langage, se poursuivrait par l'intégration du sens des mots au niveau de la phrase et finirait par une conceptualisation des informations traitées (Tzourio-Mazoyer, 2003).

La connexion entre les différents éléments de ce réseau est réalisée dans le lobe temporal par l'intermédiaire du **faisceau longitudinal inférieur** (ou faisceau occipito-temporal) qui relie la partie postérieure du sillon temporal supérieur et le gyrus angulaire à l'aire basale du langage et au pôle temporal comme le montre une étude d'imagerie in vivo des facteurs de diffusions de matière blanche (DTI: Diffusion Tensor Imaging, Catani *et al.*, 2002). La connexion entre lobe frontal et temporal se fait par le faisceau unciné qui connecte le pôle temporal à la partie orbitaire du gyrus frontal inférieur (Dejerine, 1980; Nieuwenhuys *et al.*, 1988; Catani *et al.*, 2002).

Cette hypothèse de connexion fronto-temporale est étayée par deux études en *sus* de la méta-analyse portant sur le réseau sémantique. La première étude de connectivité fonctionnelle révèle un lien fort entre la partie ventrale du gyrus frontal inférieur, la partie postérieure gauche du sillon temporal supérieur, et la voie ventrale (incluant l'aire basale du langage) pendant la lecture de mots. Ce lien disparaît pendant le traitement de fausses polices de caractères, c'est-à-dire en l'absence de traitement de message verbal (Horwitz *et al.*, 1998). Un argument supplémentaire vient de l'observation d'erreurs

sémantiques au cours de la production de phrases lorsque le cortex est stimulé électriquement, ainsi que les fibres blanches profondes, au niveau de la partie postérieure du sillon temporal supérieur et la partie orbitaire du gyrus frontal inférieur (Duffau *et al.*, 2005).

Les régions temporales sont connectées aux régions frontales pour former un réseau fronto-temporal d'intégration syntactico-sémantique. Ce réseau peut être considéré comme le fondateur d'un sens global donné au message véhiculé par le langage sur la base d'une association de connaissances intégrées issues de messages extérieurs (audition et vision) et internes (émotion et mémoire à long terme). Cette construction du sens forme les fondements de la communication langagière.

a- La voie temporelle dorsale postérieure d'intégration du sens au niveau de la phrase

Les clusters PT, T2ml, STSp et AG sont alignés le long du sillon temporal supérieur, et formeraient une chaîne de processus allant du traitement des sons (PT, que nous avons déjà discuté), à l'intégration du sens des mots dans T2ml, puis à l'intégration du sens au niveau de la phrase (STSp) pour finir par une intégration des concepts présents dans les stimuli dans AG (Figure 15). Nous allons successivement discuter le rôle de ces trois derniers clusters (pour la discussion de PT voir paragraphe IV.A, p52).

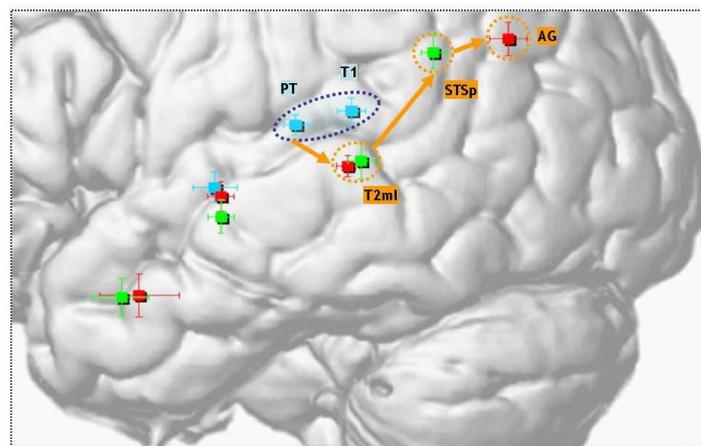


Figure 15. Voie temporelle postérieure d'intégration du matériel verbal le long du gyrus temporal supérieur.

Le flux antéro-postérieur de processus commence par une analyse phonologique au niveau du planum temporelle (PT) et du gyrus temporal supérieur (T1). Ensuite les stimuli sont traités dans une région corticale impliquée dans le traitement lexical auditif (T2ml) pour être convertis dans un format amodal. A ce format le stimulus entre dans une analyse syntaxique dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur (STSp), puis une analyse conceptuelle est réalisée dans le gyrus angulaire (AG) pour aboutir à une compréhension complète du message véhiculé par le stimulus auditif.

➤ T2ml : accès aux connaissances lexicales pour la compréhension des mots

Le cluster juste en arrière et en bas de PT en regard du sillon temporal supérieur est T2ml. Bien que T2ml regroupe un cluster sémantique et un cluster de traitement de la phrase, cette région pourrait être dédiée à **l'accès aux connaissances verbales**. Rappelons que l'accès au sens d'un mot sera nommé accès lexical, et l'accès au sens d'une image fait partie de l'accès sémantique.

Cette région est recrutée par des tâches quasi exclusivement lexicales, car celles-ci sont basées sur la présentation auditive de mots, comparées à des tâches d'écoute de sons (Warburton *et al.*, 1996; Binder *et al.*, 2000; Wise *et al.*, 2001; Specht et Reul, 2003), des tâches d'écoute passive de mots (Chee *et al.*, 1998) ou des tâches de la lecture de mot (Vandenberghe *et al.*, 1996). Elle est également recrutée par la génération de verbes (Fiez *et al.*, 1996). La spécificité du traitement lexical dans cette région est confirmée par ailleurs. Cette région est plus recrutée pour l'accès aux connaissances lexicales lors de la présentation visuelle de mots qu'au cours de la présentation d'images ou de scènes (accès sémantique, Vandenberghe *et al.*, 1996; Moore et Price, 1999; Davis *et al.*, 2004). De même, son activité est plus importante pour la catégorisation sémantique de mots que d'images (Vandenberghe *et al.*, 1996). Par ailleurs, son activité est corrélée au nombre de mots qui sont entendus et qui doivent être mémorisés (Wise *et al.*, 2001). Une telle corrélation entre activité cérébrale et fréquence de présentation de mots est perdue chez des patients présentant une aphasie de Wernicke, mais elle est toujours présente pour la présentation de bruit (Mummery *et al.*, 1999).

Le cluster du traitement de la phrase situé au niveau de T2ml est localisé à 4 mm en arrière du cluster sémantique. Il comprend des tâches variées de traitement de la phrase, incluant la compréhension de phrases simples (Kansaku *et al.*, 2000; Vingerhoets *et al.*, 2003), ou complexes (Bottini *et al.*, 1994; Ben Shachar *et al.*, 2004), le jugement d'incohérence de phrases au niveau pragmatique (Kuperberg *et al.*, 2000), de la syntaxe ou de la sémantique (Luke *et al.*, 2002), et d'attention au contenu sémantique de phrases (Kriegstein *et al.*, 2003). Son rôle dans le traitement de la phrase apparaît crucial lorsque les mots deviennent essentiels pour la compréhension de phrases, comme dans une tâche de raisonnement syllogistique sur des phrases¹⁶ comparée à la compréhension de symboles abstraits¹⁷ (Goel *et al.*, 2000). Cette région est particulièrement sensible à l'effet du contexte : T2ml est plus activée lorsque les mots qui terminent une phrase sont cohérents mais inattendus (« Le pilote fait voler le *cerf-volant* ») que lorsque ces mots sont attendus

¹⁶ « Tous les caniches sont des animaux de compagnie. Tous les animaux de compagnie ont des noms. Tous les caniches ont des noms. »

¹⁷ « Tous les P sont des B. Tous les B sont des C. Tous les P sont des C »

(« Le pilote fait voler l'avion »). Par contre, elle n'est pas activée lorsque la fin de la phrase est composée de non-mots (Baumgaertner *et al.*, 2002).

T2ml serait impliquée dans le traitement lexical en vu de l'intégration du sens au niveau de la phrase. Cette hypothèse est corroborée par les travaux de l'équipe de Dronkers. En utilisant la cartographie voxel par voxel des lésions et des symptômes (VLSM : Voxel-based Lesion Symptoms Mapping), elle montre que les patients aphasiques présentant une lésion dans cette région constituent un sous-groupe particulier d'aphasiques caractérisés par un profond déficit dans la compréhension des mots (Dronkers *et al.*, 2004).

T2ml permettrait l'accès aux connaissances lexicales afin de préparer l'intégration de ces informations pour une construction du sens des énoncés plus complexes (phrases ou textes)

➤ STSp : la construction du sens de la phrase

Une fois le sens des mots traité, la compréhension d'un énoncé plus complexe doit être réalisée en combinant les informations lexicales. Ceci est réalisé dans le cluster situé en arrière de T2ml sur le sillon temporal supérieur (STSp).

STSp est un cluster regroupant des contrastes de traitement de la phrase, et n'est proche d'aucun cluster sémantique. Bien que STSp soit impliqué dans une étude traitant de la complexité syntaxique (Constable *et al.*, 2004), et semblerait plus activé lors de jugements d'erreurs grammaticales (Embick *et al.*, 2000), il jouerait plutôt un rôle dans l'intégration sémantique de matériel verbal complexe. De fait, cette région est recrutée lorsque des sujets écoutent des phrases cohérentes plutôt qu'incohérentes au niveau pragmatique ou syntaxique (Kuperberg *et al.*, 2000; Luke *et al.*, 2002). Elle est également activée lorsqu'il s'agit de choisir un mot parmi deux pour compléter une phrase ou lorsque l'on doit générer le mot final d'une phrase (Kircher *et al.*, 2001), tâches qui requièrent l'intégration du sens de la phrase pour être résolue. Cette région est plus recrutée au cours de la compréhension de texte comparée à un discours inversé (Kansaku *et al.*, 2000; Crinion *et al.*, 2003) ou de mots présentés auditivement (Jobard *et al.*, sous presse), et aussi au cours d'une présentation visuelle de textes comparée à la lecture de listes de mots (Jobard *et al.*, sous presse) ou de pseudo-mots (Vingerhoets *et al.*, 2003). Elle est particulièrement recrutée quand il est nécessaire de lier la structure syntaxique des stimuli au sens car elle est plus activée par des phrases formant un dialogue (Homae *et al.*, 2002) ou par des syllogismes (Goel *et al.*, 1998) que lorsque les phrases ne sont pas liées. Ce rôle de STSp dans l'intégration de haut niveau de matériel verbal est aussi renforcé par

son implication plus large pendant la compréhension d'histoire nécessitant l'inférence des états mentaux des personnages (Fletcher *et al.*, 1995; Gallagher *et al.*, 2000) ou par des histoires requérant la compréhension de la conséquence d'un incident physique (Saxe et Kanwisher, 2003) (voir chapitre 2, paragraphe III.3.B.b- , p138).

|| *STSp semblerait impliqué dans l'intégration des informations verbales pour aboutir à la compréhension de phrase voire de texte.*

➤ **AG : aire supramodale de la conceptualisation**

Enfin pour aboutir à une compréhension subtile des énoncés, il est important de pouvoir y inclure les concepts plus intégrés qu'ils évoquent, ce qui est réalisé par le cluster situé à l'extrémité du sillon temporal supérieur, AG.

Selon Marcel Mesulam, le cortex présente trois types de régions (Mesulam, 2000). Tout d'abord les régions primaires interviennent dans le traitement des informations issues d'une seule modalité (par exemple, la calcarine traite uniquement les informations visuelles). Le cortex associatif unimodal permet l'intégration des informations unimodales traitées dans les aires primaires. Enfin, le cortex associatif hétéromodal intègre les informations multimodales. Or le cluster AG contient des pics issus de contrastes de haut niveau portant à la fois sur des mots et des images présentés visuellement et auditivement (9 contrastes avec une présentation visuelle de mots, 7 avec la présentation auditive de mots, 11 avec la présentation d'images d'objets ou de scènes). AG fait donc partie du cortex associatif hétéromodal de haut niveau. Cette région pourrait donc correspondre à un routeur supramodal qui coordonnerait l'interaction réciproque entre représentation sensorielle des mots et des objets et l'association symbolique qui donne accès au sens. Ainsi elle serait impliquée dans la conceptualisation des connaissances. Cette définition a été proposée par Mesulam pour l'aire de Wernicke qui est mal définie anatomiquement mais qui pourrait inclure AG (Mesulam, 1990).

La cartographie corticale préchirurgicale confirme le rôle d'intégration sémantique de cette région : des interférences électriques au niveau de la partie postérieure des gyri temporaux supérieur et moyen provoquent l'émergence d'une aphasie de Wernicke transitoire. Ces symptômes ressemblent notamment aux symptômes définissant l'aphasie de Wernicke, au sens où aucun déficit des processus phonologiques de décodage des syllabes n'est présent, mais uniquement des déficits de compréhension du sens des énoncés (Boatman *et al.*, 2000). De récentes études lésionnelles convergent vers des conclusions similaires : la lésion de cette région d'intégration multimodale déclenche l'apparition de problèmes sémantiques manifestes sans altération des performances lors de

tâches phonologiques (Hart Jr et Gordon, 1990). De plus, des patients aphasiques avec une lésion de la partie postérieure du sillon temporal supérieur présentent des déficits similaires dans le domaine verbal et non-verbal : ils manifestent des difficultés à associer une image ou un son à une phrase correspondante. Par exemple, ils trouvent aussi difficile d'associer l'image d'une vache avec la phrase « une vache meugle » qu'avec le son d'un meuglement (Saygin *et al.*, 2003).

AG interviendrait dans l'association entre représentation sensorielle des mots et des objets avec leur représentation symbolique. Cette région constitue donc un routeur supramodal d'intégration sémantique.

b- La voie temporale dorsale antérieure d'intégration du sens au niveau de la phrase

L'intégration le long du sillon temporal supérieur se propage également en avant à partir de T1 qui analyse les sons du langage (p55, paragraphe IV.A.b-). Après l'analyse phonologique, les stimuli verbaux sont traités par la région sélective de la voix humaine (T1a) : une analyse de la voix du locuteur et probablement de la prosodie du mot à la phrase est alors réalisée suivant un gradient dorso-ventral (paragraphe IV.B, p57). Cette intégration se poursuit au niveau du pôle temporal (Pole) qui permet le rappel et l'encodage des informations en mémoire à long terme, comme nous allons le voir (Figure 16).

L'implication du pôle temporal dans la *compréhension de phrases et de textes* est maintenant bien reconnue. Elle a tout d'abord été mise en évidence par une étude sur l'écoute de phrases et de textes qui montre une forte activation du pôle (Mazoyer *et al.*, 1993). Les pics agrégés dans le cluster Pole sont issus d'études sur la compréhension de phrases ou de textes plutôt que d'études sur la syntaxe. En effet, le pôle est recruté au cours du jugement sémantique ou syntaxique de phrases (Bottini *et al.*, 1994; Luke *et al.*, 2002), mais présente une activation plus importante durant la lecture de phrases formées de mots plutôt que par la lecture de phrases composées de pseudo-mots (Vingerhoets *et al.*, 2003) ou se terminant par un pseudo-mot (Baumgaertner *et al.*, 2002). Ce cluster inclus des contrastes qui comparent des phrases ou des textes (présentés oralement ou visuellement) à des mots (Stowe *et al.*, 1998), ou à la présentation de discours inintelligible (Scott *et al.*, 2000; Crinion *et al.*, 2003) : ces contrastes mettent en avant un traitement sémantique. De fait, le cluster Pole est composé de contrastes nécessitant l'accès aux connaissances sémantiques sur des mots ou des objets comme pour la

catégorisation sémantique (Vandenberghe *et al.*, 1996; Damasio *et al.*, 2001; Scott et Johnsrude, 2003; Bright *et al.*, 2004).

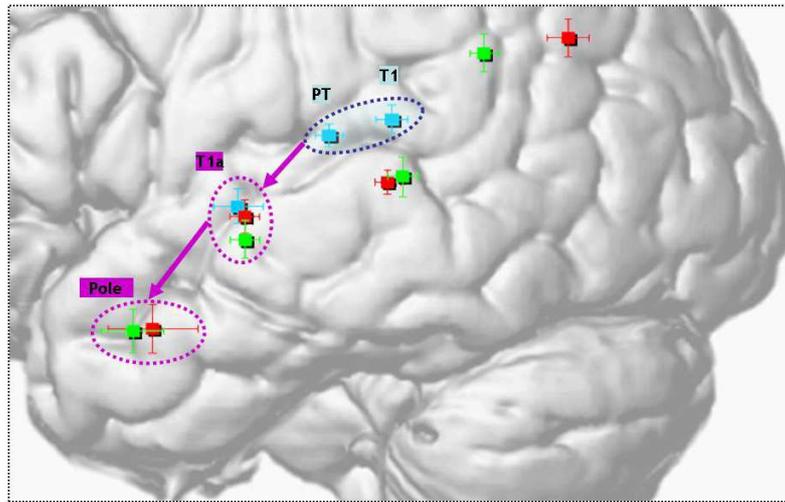


Figure 16. Voie antérieure d'intégration du matériel verbal le long du gyrus temporal supérieur.

La voie temporelle antérieure s'étend des régions phonologiques vers la région de la voix (T1a) et le pôle temporal (pole), permettant un accès aux régions limbiques pour le traitement émotionnel et l'accès en mémoire à long terme. La région de la voix est la seule région pour laquelle les clusters phonologique, sémantique et de traitement de la phrase sont proches spatialement et peuvent être confondus (gauche).

Les patients lésés au niveau du pôle temporal présentent une altération de la compréhension uniquement des phrases complexes. A partir de ces travaux, Dronkers et son équipe ont proposé l'hypothèse suivante : **cette région jouerait un rôle très basique dans les processus syntaxiques plutôt qu'un rôle plus spécifique dans le traitement de structures complexes** (Dronkers *et al.*, 2004).

Par ailleurs, le Pole est recruté durant le rappel en mémoire épisodique (un sous-type de mémoire à long terme) d'attributs d'objet (Wiggs *et al.*, 1999) et le rappel d'histoire (Andreasen *et al.*, 1995). De plus, l'activité de cette région augmente avec la complexité verbale du matériel (Mazoyer *et al.*, 1993; Fletcher *et al.*, 1995). L'observation d'un déficit dans la compréhension d'un texte chez des patients ayant subi une lobectomie temporelle antérieure (Milner, 1958) confirme l'idée selon laquelle le pôle temporal ferait parti du réseau de la mémoire à long terme intervenant dans la compréhension de matériel verbal complexe. Sa proximité avec l'hippocampe, qui fait partie intégrante du réseau de mémoire à long terme, renforce cette hypothèse.

Le Pole serait dévolu à l'encodage et au rappel de matériel verbal complexe en mémoire à long terme.

c- Le rôle des régions frontales dans l'intégration syntactico-sémantique au niveau de la phrase

➤ F3orb : contrôle de l'accès aux connaissances sémantiques

Le cluster directement relié aux voies d'intégration temporelle est F3orb (Figure 18). Il est situé dans la partie orbitaire du gyrus frontal inférieur et s'étend jusqu'à l'insula antérieure. C'est une région exclusivement dédiée au traitement sémantique : ce cluster est impliqué dans le *rappel en temps réel d'informations sémantiques* (Demb *et al.*, 1995; Badre *et al.*, 2005). Ce rôle est confirmé ici puisque F3orb est recruté durant le rappel sémantique à la fois en langue des signes et en langue orale (Ronnberg *et al.*, 2004) et est plus activé au cours du rappel sémantique que du rappel épisodique (Wiggs *et al.*, 1999). Un tel rôle permet d'expliquer pourquoi F3orb est également recruté pendant des tâches de catégorisation sémantique (Jennings *et al.*, 1998; Poldrack *et al.*, 1999; Perani *et al.*, 1999; Buchanan *et al.*, 2000; Adams et Janata, 2002; Braver et Bongiolatti, 2002; Binder *et al.*, 2003; Noesselt *et al.*, 2003; Bright *et al.*, 2004; Noppeney et Price, 2004), des tâches d'association sémantique entre deux mots (Booth *et al.*, 2002), et des tâches de génération de mots (Martin *et al.*, 1995; Damasio *et al.*, 2001; Gurd *et al.*, 2002). De plus, l'activité de cette région est fonction du degré de contrôle requis pour le rappel sémantique (Wagner *et al.*, 2001). Des travaux de la même équipe ont par ailleurs montré que ce rappel des informations sémantiques n'était pas seulement automatique mais pouvait également guider l'accès aux connaissances sémantiques (Badre *et al.*, 2005).

|| Cette région serait impliquée dans le rappel des informations stockées en mémoire sémantique.

➤ F3opd : traitement sémantique et / ou traitement syntaxique ?

En remontant dorsalement, nous rencontrons le cluster sémantique F3opd qui regroupe des tâches faisant appel à la récupération et à la sélection sémantique. Ces tâches incluent la catégorisation sémantique (Noesselt *et al.*, 2003), la décision lexicale (Poldrack *et al.*, 1999; Perani *et al.*, 1999; Binder *et al.*, 2003), la génération d'adjectifs (Kelley *et al.*, 2002), de couleurs (Martin *et al.*, 1995), et d'actions (Martin *et al.*, 1995; Damasio *et al.*, 2001; Adams et Janata, 2002), et la génération du genre du stimuli (Heim *et al.*, 2002). Toutes ces tâches étaient comparées à des tâches phonologiques ou des tâches de décisions sur critères visuels. Cette région regroupe également des pics d'activation issus de tâches de génération avec une forte sélection à opérer (Thompson-Schill *et al.*, 1997; Wagner *et al.*, 2001). Ces études avaient pour objectif de mettre en

évidence le **centre de sélection du rappel sémantique** (Badre *et al.*, 2005). Remarquez que ces résultats sont concordants avec ceux de d'Angela Friederici (qui n'ont pas été inclus dans la méta-analyse car utilisant une approche par région d'intérêt) qui propose un rôle sémantique à une région proche (-46, 21, 25) de F3opd (-49, 16, 24). Cette région présente une augmentation d'activité pendant une tâche de jugement sémantique (Friederici *et al.*, 2000).

Le cluster du traitement de la phrase se situe à 7mm (en distance euclidienne, Table 5) en arrière et plus latéralement de celui sur le traitement sémantique, et se trouve à la limite de résolution de la présente méta-analyse ($p = 0,05$ pour la significativité de la distance euclidienne, Figure 17).

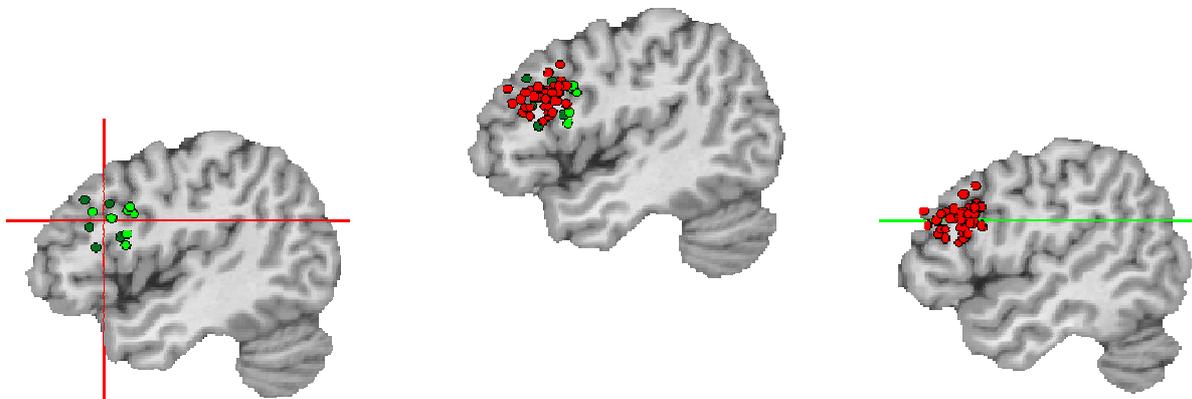


Figure 17. Les clusters F3opd impliqués dans le traitement sémantique et de la phrase.

Les clusters F3opd impliqués dans le traitement sémantique ($x = -44$, $y = 21$, $z = 24$, ronds rouges pour les pics inclus dans le cluster, la croix rouge symbolise le centre de masse du cluster) et de la phrase ($x = -49$, $y = 16$, $z = 24$, ronds vert clair pour les pics correspondant à l'activation au cours de tâche syntaxique, et ronds vert foncé pour les pics correspondant aux activations au cours de tâche de traitement de la phrase, la croix verte symbolise le centre de masse du cluster) sont superposés sur des coupes sagittales du cerveau de référence MNI ($x = -44$ à gauche et au milieu et $x = -49$ à droite). Ces deux clusters sont partiellement overlappant, et leurs centres de masse sont distants de 7 mm.

Parmi les 14 pics inclus dans ce cluster, 10 sont issus de contrastes mettant en évidence les processus syntaxiques : la compréhension de phrases complexes au niveau syntaxique comparée à des phrases simples comme les études sur le mouvement syntaxique (Ben Shachar *et al.*, 2004), incluant des phrases objet-sujet (Stromswold *et al.*, 1996; Caplan *et al.*, 1999; Caplan, 2001; Constable *et al.*, 2004), mais également des tâches de détection d'erreurs grammaticales (Embick *et al.*, 2000). Le fait que cette région soit plus recrutée par une tâche de décision syntaxique que par une tâche de mémoire de travail indique que la composante de mémoire de travail liée à la compréhension de matériel complexe n'est pas à l'origine de son activité (Hashimoto et Sakai, 2002; Luke *et al.*, 2002). De plus, les pics, activés par des tâches syntaxiques, inclus dans ce cluster sont plus dorsaux (Figure 13).

La partie haute et postérieure de la pars opercularis du gyrus frontal inférieur inclue deux régions adjacentes aux rôles fonctionnels qui pourraient être différents : une région dédiée au traitement sémantique et l'autre plus caudale impliquée dans le traitement syntaxique.

➤ F2p : manipulation des informations syntaxiques pour construire les phrases

La seule région frontale à distance des clusters sémantiques et agrégeant des tâches de traitement de la phrase est F2p. Le nombre de pics (14) inclus dans ce cluster est limité à 7 études qui ne sont pas particulièrement tournées vers les processus syntaxiques sauf en ce qui concerne l'étude des phrases objet-sujet (Constable *et al.*, 2004). Les autres études portent sur la lecture de phrases (Bottini *et al.*, 1994; Baumgaertner *et al.*, 2002) ou de textes (Vingerhoets *et al.*, 2003). Le fait que cette région soit impliquée pendant une tâche de décision syntaxique et de mémoire de travail sur des mots et des phrases (Hashimoto et Sakai, 2002; Luke *et al.*, 2002) suggère qu'elle joue un rôle dans les **processus de mémoire de travail dans la compréhension de matériel verbal complexe.**

➤ F3tv : intégration du sens des mots pour la compréhension syntaxique des énoncés

Le cluster situé juste au dessus de F3orb est F3tv. Il regroupe à la fois des contrastes lexicaux (38 pics) et de traitement de la phrase (30 pics). Dans ce cluster 14 pics sur 30 portant sur le traitement de la phrase sont issus d'études examinant la *syntaxe* ; les contrastes comprennent des tâches de référence de haut niveau avec des phrases à contenu sémantique (Stromswold *et al.*, 1996; Stowe *et al.*, 1998; Caplan, 2001; Cooke *et al.*, 2002; Waters *et al.*, 2003; Constable *et al.*, 2004; Ben Shachar *et al.*, 2004) : ceci diminue donc la composante sémantique dans l'interprétation de ces activations. De plus certains contrastes sémantiques comportent une dimension syntaxique comme la catégorisation lexicale (choisir si l'item présenté est un mot ou un pseudo-mot, Binder *et al.*, 1996; Perani *et al.*, 1999; Hagoort *et al.*, 1999; Adams et Janata, 2002; Bright *et al.*, 2004), la catégorisation lexicale incluant des verbes (Buchanan *et al.*, 2000), la catégorisation du genre des mots (Heim *et al.*, 2002) et l'organisation en listes de mots par association sémantique (Savage *et al.*, 2001).

Le *cluster sémantique* est à 7mm en arrière du cluster du traitement de la phrase et ne diffère pas en terme de localisation, car cette distance euclidienne qui les sépare se trouve à la limite de la résolution spatiale de la méta-analyse. Il inclut des tâches

sémantiques comme la génération de mots (Vingerhoets *et al.*, 2003) ou d'actions (Martin *et al.*, 1995), l'association sémantique (Booth *et al.*, 2002), empêchant de définir un rôle purement syntaxique à cette région.

Par ailleurs, une récente étude de l'équipe de Anthony Wagner explorant la dissociation entre les fonctions de rappel et de sélection en mémoire sémantique montre que cette partie triangulaire du gyrus frontal inférieur serait plutôt impliquée dans la partie sélection du matériel sémantique (Badre *et al.*, 2005). De plus, elle participerait activement à l'accès aux connaissances sémantiques et pas seulement à la sélection automatique des différentes représentations rappelées en mémoire de travail par la région F3orb.

F3tv est donc impliqué à la fois dans des tâches de traitement syntaxique et dans des tâches de traitement lexical. Elle jouerait un rôle dans l'accès aux connaissances sémantiques en sélectionnant la représentation lexicale des mots adéquate pour la compréhension de la structure syntaxique. Ainsi elle opérerait une intégration lexico-syntaxique.

➤ Les voies frontales d'intégration syntactico-sémantique

A partir des différents rôles des régions frontales nous proposons un modèle d'organisation qui repose sur les fonctions exécutives de ces régions. En effet, elles pourraient servir de lieu de contrôle et de manipulation des informations stockées dans les voies temporales d'intégration syntactico-sémantique (Figure 18).

Le contrôle de l'accès aux connaissances lexico-sémantiques et la sélection des informations sémantiques seraient opérés par une voie plus antérieure au sein du lobe frontal le long de l'axe F3orb / F3opd. Tandis que la manipulation des informations sémantiques et syntaxiques contenues dans le message verbal serait réalisée par une voie plus caudale F2p / F3opd. Ces deux voies interagiraient au niveau de F3tv qui contrôle l'intégration des informations sémantiques et syntaxiques au cours de la compréhension du message verbal.

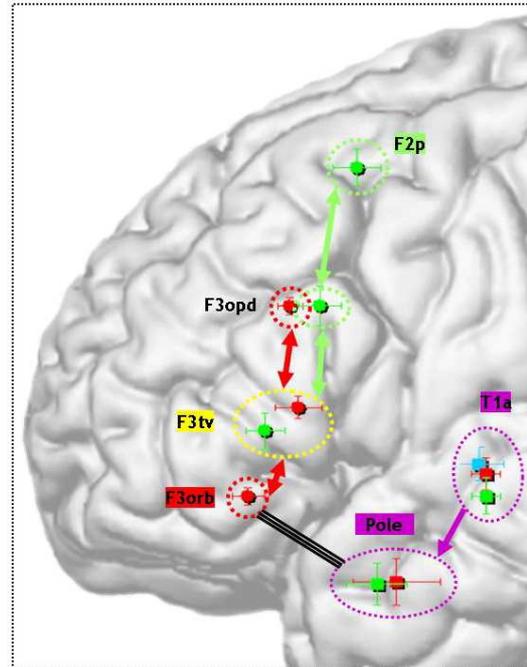


Figure 18. Intégration syntactico-sémantique dans les régions frontales.

Le contrôle et la manipulation des informations sémantiques auraient lieu dans une **voie antérieure** allant de F3opd à F3orb en passant par F3tv. Ces régions sont connectées par l'intermédiaire du faisceau unciné avec les voies d'intégration temporales. La **seconde** voie impliquée dans le contrôle de l'accès aux informations syntaxiques et dans la manipulation de ces informations pour la construction du sens du matériel verbal complexe se situe en arrière et plus en haut que la voie antérieure : Allant de F2p à F3opd en passant par F3tv. Ces deux voies interagissent au niveau de F3tv qui contrôle l'intégration des informations sémantiques et syntaxiques dans la compréhension du message verbal.

D. Conclusion

Le traitement des informations phonologiques, sémantiques et syntaxiques au cours de la compréhension du langage oral serait organisé en deux réseaux fronto-temporaux parallèles (Figure 19). Le premier réseau est en charge de l'analyse phonologique des sons du langage et constitue la *boucle audio-phonatoire* : la compréhension du langage passe donc par une simulation motrice des sons du langage.

Le second réseau gère *l'intégration syntactico-sémantique* pour le traitement de matériel verbal complexe comme la phrase ou le texte. Au niveau temporel deux voies sont mises en jeu. La première qui va des régions phonologiques proches des régions auditives primaires vers l'arrière et permet *le décodage du sens allant de la syllabe au mot puis à la phrase*. Elle se termine par l'intégration d'information sémantique conceptuelle pour compléter la compréhension du message verbal. La seconde voie qui part vers l'avant des régions phonologiques permet *le traitement des informations contenues dans la voix du locuteur et l'intégration d'informations stockées en mémoire à long terme*.

Ces deux voies temporales sont sous le contrôle des régions frontales exécutives, elles aussi organisées en deux voies. Une voie antérieure de manipulation des informations en mémoire sémantique, et une voie dorsale impliquée dans le maintien des informations syntaxiques et sémantiques pour la construction d'un énoncé cohérent.

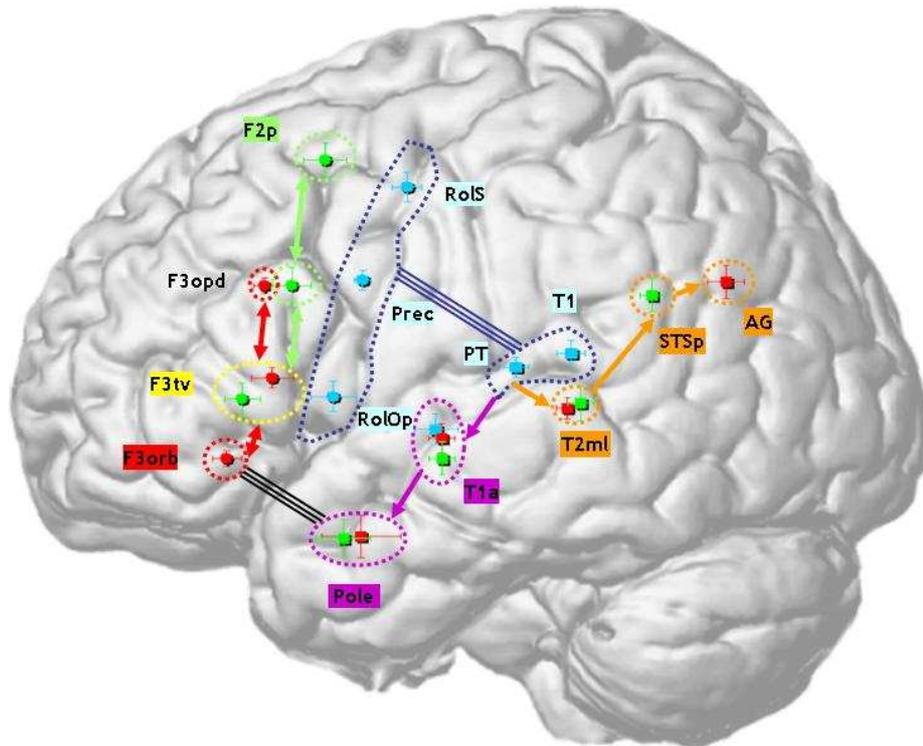


Figure 19. Réseaux phonologiques et d'intégration syntactico-sémantique au cours de la compréhension du discours oral.

Le traitement phonologique est réalisé dans la boucle audio-phonatoire (bleu foncé). Puis ces informations phonologiques vont entrer dans les voies d'intégration syntactico-sémantique. Deux voies temporales vont permettre l'analyse des informations phonologiques : la voie antérieure va traiter les éléments acoustiques spécifiques de la prosodie, avant d'intégrer les informations en mémoire à long terme (violet) ; la voie postérieure analyse le contenu lexical des mots avant de reconstruire le sens de l'énoncé dans son ensemble, puis d'intégrer les connaissances sémantiques (orange). Toutes ces chaînes de traitement sont sous le contrôle des régions frontales (jaune, vert, rouge) via le faisceau unciné (noir) et le faisceau longitudinal (non représenté ici).

Ces résultats doivent être envisagés comme un outil de travail et seront utilisés de deux manières pour mieux analyser les résultats de l'étude en IRMf menée sur la compréhension de la phrase affective. La première, consiste à utiliser la localisation précise des clusters. En superposant ces clusters sur une carte d'activation, on peut alors proposer un rôle fonctionnel de ce réseau de régions activées. Ainsi, nous pourrions analyser le rôle fonctionnel du réseau neural du traitement ortholinguistique mis en jeu au cours de la classification grammaticale des phrases neutres (chapitre 2, paragraphe III.3.A, p131).

La deuxième méthode consiste à utiliser cette méta-analyse comme une base de données. Si les régions obtenues sur une carte de contraste ne correspondent pas exactement au cluster de la méta-analyse, il est possible de sélectionner les pics inclus dans ce cluster. En analysant les contrastes qui ont donné lieu à ces pics, on peut interpréter le rôle de cette région en modulant le rôle attribué au cluster la chevauchant. Cette méthode devrait permettre de comprendre le rôle des régions impliquées dans le traitement ortholinguistique affectif au cours de la classification affective (chapitre 2, paragraphe III.3.B.a- , p136).

2

Etudes de la compréhension de la phrase affective

Ce travail a été publié dans Cerebral Cortex : **Beaucousin, V., Lacheret, A., Turbelin, M-R, Morel, M., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N.** fMRI study of emotional speech comprehension (sous presse, accessible en ligne depuis le 8 Mars 2006).

Nous venons de définir les bases neurales de la compréhension des éléments ortholinguistiques du langage grâce à la méta-analyse de la littérature de neuroimagerie. Ce travail va nous servir de base pour tenter de distinguer ce réseau neural de celui de la prosodie affective. Ces deux éléments ortholinguistiques et paralinguistiques étroitement intriqués sont essentiels à la compréhension du langage oral et pourtant ils ont été étudiés séparément, conduisant à des divergences de résultats entre la neuropsychologie et la neuroimagerie (voir introduction, paragraphe I.2.B, p15).

Rappelons que si la neuropsychologie a mis en évidence les épices de la prosodie affective (ou aires indispensables) au niveau de la partie postérieure du gyrus temporal supérieur avec une communication transcalleuse indispensable à l'intégration des informations ortholinguistiques pour la compréhension du discours affectif (Ross *et al.*, 1997), les études de neuroimagerie ont montré une activation des régions frontales et temporales droites (Mitchell *et al.*, 2003) et de leurs homologues gauches (Wildgruber *et al.*, 2002; Kotz *et al.*, 2003; Wildgruber *et al.*, 2004; Wildgruber *et al.*, 2005; Grandjean *et al.*, 2005). Cette apparente divergence semble lier à l'utilisation de stimuli auditifs, ayant un contenu lexical inexistant ou incongruent avec le contenu émotionnel prosodique. Ces stimuli devaient permettre de diminuer le traitement du contenu lexical affectif, mais paradoxalement ils ont produit une augmentation du traitement lexical, en témoigne le recrutement des régions fronto-temporales gauches qui sont impliquées dans le traitement ortholinguistique du langage, comme nous venons de le voir dans la méta-analyse (voir paragraphe III.3.A, p 131, pour une discussion détaillée).

A partir de ces observations, nous avons élaboré un paradigme constitué d'un matériel à contenu verbal congruent avec la prosodie affective. La tâche choisie consistait en une classification d'énoncés à contenu lexical affectif clair. Ces énoncés étaient soit produits par une voix de synthèse, Kali (Morel et Lacheret-Dujour, 2001), dénuée de prosodie affective mais contenant une prosodie grammaticale cohérente, soit par des acteurs énonçant les phrases avec une prosodie affective congruente avec leur contenu lexical. Le choix de Kali a été motivé par son intelligibilité liée au fait que ce logiciel permettait de générer des phrases à partir d'un corpus de syllabes produites naturellement. Ces deux conditions nous ont permis de mettre en évidence les régions impliquées dans le traitement de la prosodie affective. Une condition supplémentaire de classification du sujet de phrases à contenu lexical neutre nous a permis de mettre en évidence les régions impliquées dans le traitement global des éléments ortholinguistiques du langage.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter les études psycholinguistiques qui nous ont permis de construire ce protocole de neuroimagerie et de vérifier qu'il puisse

mettre en évidence les bases neurales de la compréhension de phrases à contenu lexical et prosodique affectif. La première étude psycholinguistique a été menée dans le but de sélectionner les phrases intelligibles et sans ambiguïté lexicale (voir paragraphe I, p77). Après cette étude de sélection, une seconde étude psycholinguistique nous a permis d'évaluer le rôle de la prosodie affective au cours de la classification affective des phrases sélectionnées (voir paragraphe II, p86). Ces deux études ont permis de mettre au point un paradigme qui puisse mettre en évidence les bases neurales de la compréhension de phrases à contenu lexical et prosodique affectif que nous présenterons dans le paragraphe III (p105).

I. MISE AU POINT D'UN CORPUS DE PHRASES

La première partie de ce paragraphe sera consacrée à l'exposé de la construction d'un corpus de phrases à contenu lexical affectif et d'un corpus composé de phrases à contenu lexical neutre (voir paragraphe I.1.A, p78). Enfin, l'étude psycholinguistique qui a permis de valider ce corpus sera exposée (voir paragraphe I.2, p84). Cette étude avait pour objectif de sélectionner les phrases sur la base de deux critères suivant la voix qui les avaient produites. Le premier critère concerne le choix de l'utilisation d'un logiciel de synthèse de parole, afin de disposer de **conditions exemptes de prosodie affective**. Ce logiciel de synthèse de parole, **Kali**, respecte la prosodie grammaticale -pause dans la phrase, intonation descendante pour une phrase déclarative- mais est *dépourvu de tout patron prosodique affectif*. Ce logiciel a été choisi pour sa **grande intelligibilité** à vitesse de locution élevée (voir paragraphe 1.B.a- , p82). Pour s'affranchir d'une inintelligibilité résiduelle de Kali, seules les phrases dont le contenu lexical était bien compris par tous les sujets ont été sélectionnées. Ainsi une difficulté supplémentaire liée au traitement par les sujets de stimuli difficiles à comprendre a été évincée. Cette sélection a ainsi permis de cibler plus facilement l'effet de l'absence de prosodie dans les phrases produites par la voix de synthèse, et de ne pas le confondre avec une difficulté liée à l'inintelligibilité des phrases produites par Kali.

Le second critère de sélection concernait les phrases énoncées par les acteurs avec la prosodie affective. Les phrases correctement classées ont été retenues pour s'affranchir des ambiguïtés lexicales et / ou prosodiques¹⁸.

Grâce à cette sélection, une étude psycholinguistique a pu évaluer l'impact de la prosodie affective sur la compréhension de phrases affectives (voir paragraphe II, p86), préalable à la réalisation du protocole de neuroimagerie sur les bases neurales de la compréhension de la phrase affectif (voir paragraphe III, p105).

1. CONSTRUCTION DU CORPUS DE PHRASES

A. Structure ortholinguistique des phrases du corpus

Pour répondre aux objectifs fixés pour la construction du paradigme de neuroimagerie, différentes phrases avec un contenu lexico-syntaxique équivalent ont été construites. Un corpus de 320 phrases a été conçu (Annexe 3, p278). Parmi ces 320 phrases, 120 phrases présentaient un contenu propositionnel émotionnel et 120 phrases, un contenu propositionnel attitudinal. Ces phrases constituaient le matériel destiné à la tâche de classification affective qui devait permettre dans l'étude de neuroimagerie de mettre en évidence le réseau neural impliqué dans la compréhension d'énoncé véhiculant une dimension affective. 80 phrases ont également été construites avec un contenu lexical neutre émotionnellement. Ces phrases ont été utilisées pour la tâche de classification grammaticale qui devait permettre d'évaluer les bases neurales du traitement ortholinguistique du langage.

a- Catégories émotionnelles et attitudinales choisies pour le corpus

Au delà du champ restreint de la prosodie (voir intro), la distinction *a priori* entre émotions et attitudes est retrouvée chez le phonéticien Pierre Léon (Léon, 1993). Il distingue les émotions primaires, non contrôlées par le locuteur (*e.g.* joie, gaieté, colère, tristesse), que nous appellerons les émotions, des attitudes qui sont des émotions secondaires mieux canalisées, (*e.g.* la surprise, l'évidence, l'incrédulité ou doute et l'ironie, Aubergé *et al.*, 1997), avec un marquage ortholinguistique plus conventionnel (Léon, 1993). Décrivons plus précisément ces deux catégories.

¹⁸ Exemple : « J'ai encore retrouvé ma voiture neuve toute rayée, c'est inadmissible ». Tous les sujets ont classé cette phrase énoncée par la voix de l'acteur dans la catégorie de la colère.

➤ La distinction entre attitudes et émotions

« Les *attitudes* sont des signaux, associés à la fonction expressive qui est devenue stylisée ou si l'on veut, conventionnalisée, au point d'être reconnaissable sans problème par les sujets d'une même communauté. L'attitude suppose une maîtrise de soi qui échappe à l'émotion, elle a quelque chose de théâtral, de composé, même dans les cas où elle est inconsciente (par exemple une personne qui raconte une histoire) » (Léon, 1993). En ce qui concerne le versant prosodique, la *prosodie attitudinale* est définie comme apportant une modulation au contenu lexical afin d'en détourner le sens littéral (e.g. ironie, sarcasme, Monrad-Krohn, 1947), et correspond à la fonction expressive définie par la linguistique (Lacheret-Dujour et Beaugendre, 1999). Elle représente donc les informations exprimées volontairement selon un code socioculturel donné et dépend des règles grammaticales, comme le mode d'énonciation d'une phrase. En effet l'exclamation et l'interrogation sont des constructions qui véhiculent souvent des attitudes. Par exemple, l'exclamation « Va ranger ta chambre ! » exprime l'ordre ; et l'interrogation « Est ce que tu as fermé la porte avant de partir ? » exprime le doute.

Les *émotions* sont décrites à partir de la combinaison unique de six traits prosodiques qui constituent un patron spécifique à chacune d'elles (e.g. la joie, la gaieté, le bonheur, l'allégresse, la colère, la haine, Scherer, 1986). Cependant, aucun consensus n'a abouti aussi bien en phonétique qu'en psycho-acoustique, et cette classification dépend des auteurs et des paramètres acoustiques pris en compte (Léon, 1993). La *prosodie émotionnelle* rend compte de l'état émotionnel du locuteur, et correspond à la fonction impulsive définie par la linguistique (Lacheret-Dujour et Beaugendre, 1999). Elle donne des informations indépendamment de la volonté du locuteur ce qui se traduit par la contraction involontaire des muscles phonatoires qui induit des variations de timbre et de hauteur de la voix.

Donc les attitudes sont contrôlées par le locuteur, et dépendent de codes socioculturels bien définis qui permettent l'interprétation du message oral. Au contraire, les émotions reflètent des sentiments aux marquages ortholinguistiques et prosodiques beaucoup plus aléatoires.

➤ Les émotions choisies pour le protocole

Pour notre protocole, les *émotions* retenues correspondaient à trois émotions primaires : la colère, la gaieté et la tristesse. Ces trois émotions ont été très couramment utilisées dans les études de neuroimagerie (Wildgruber *et al.*, 2002; Kotz *et al.*, 2003), ce qui a permis la comparaison des résultats obtenus au cours de ce travail de thèse avec les études antérieures.

La première catégorie représentait la **colère**, mais également la fureur, la révolte, la désapprobation, comme dans la phrase : « *Il a anéanti notre projet pour me provoquer, c'est réussi* ». La deuxième catégorie correspondait à la **gaieté**, la joie. C'est l'émotion positive par excellence. Par exemple : « *Il a passé tous ses examens avec succès* ». La catégorie **tristesse** regroupait également le chagrin. C'est une émotion négative par opposition à la gaieté. Par exemple : « *Je suis triste à l'idée de nous quitter* ».

➤ Les attitudes choisies pour le protocole

Le doute, l'évidence et l'ironie ont été sélectionnés. Notre choix s'est basé sur une étude psycholinguistique montrant que ces catégories étaient identifiées plus rapidement que une injonction d'ordre (Aubergé et Bailly, 1995). Il était important de choisir des catégories facilement identifiables pour favoriser la résolution de la tâche de classification.

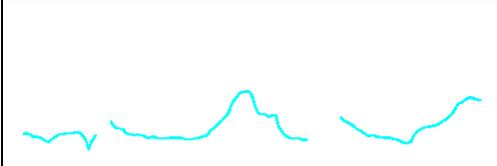
La catégorie du **doute** regroupait également la surprise, l'étonnement par rapport à ce qui aurait pu être dit dans une conversation : « *Il entend des voix dans la maison ?* ». L'**évidence** représentait une affirmation qui ne pouvait être remise en question, qui allait de soi, une action de tous les jours que l'on fait pour ne pas être sanctionné : « *J'ai pris mon passeport pour prendre l'avion* ». La dernière catégorie était l'**ironie**, la moquerie, ce que l'on tourne en dérision : « *J'ai l'air très menaçant avec mon pistolet à eau* ».

➤ Caractérisation des différentes catégories

Ces six catégories (émotions et attitudes) présentaient un patron intonatif distinct entre elles et distinct d'un patron affirmatif, neutre. La Table 6 fournit succinctement les exemples du contour intonatif de quelques phrases du corpus (Morel et Bänziger, 2004)¹⁹.

¹⁹ Des travaux portant sur la détermination de patron intonatif prototypique des émotions et des attitudes du corpus sont en cours de réalisation par Michel Morel.

Table 6. Patrons intonatifs de phrases neutres (1^{ière} colonne), des émotions (haut) et des attitudes (bas).

Neutre : « J'ai rangé mes vêtements dans le placard »	Gaie : « Moi, j'ai eu tous mes partiels en juin. »	Triste : « J'ai finalement compris que je ne la reverrais plus. »	Colère : « J'ai encore retrouvé ma voiture neuve toute rayée, c'est inadmissible. »
			
	Doute : « Moi, je n't'ai pas aidé quand tu en avais besoin ? »	Evidence : « Avant de prendre l'avion, j'ai acheté les billets. »	Ironie : « J'ai dévalé l'escalier sur les fesses avec élégance. »
			

Toutes les catégories génèrent un patron intonatif distinct les unes des autres. Le patron intonatif des phrases neutres est donné dans la 1^{ière} colonne. Les phrases émotionnelles font partie de la moitié supérieure de la table, tandis que les phrases attitudinales sont incluses dans la moitié inférieure. En bleu est représenté le décours de la fréquence fondamentale (Hz). L'abscisse représente le décours temporel (sec).

b- Les patrons syntaxiques

La construction de 213 phrases suivait une structure syntaxique simple de type canonique : sujet / verbe / complément.

Ex : *J'ai senti des larmes couler sur mon visage.*

Les 107 phrases restantes du corpus comprenaient un constituant supplémentaire détaché soit à gauche soit à droite, ce qui correspond à 5% des phrases par catégorie. Ce détachement de constituant a permis de rendre les stimuli plus écologiques, c'est-à-dire à construire des phrases se rapprochant le plus possible de celles employées dans la vie quotidienne au cours d'une conversation.

Ex : *Ma sœur, elle a rangé ses chaussettes de sport dans son sac / Tu as vu, j'ai garé la voiture / Super, j'ai gagné au loto.*

La même proportion des différentes structures syntaxiques a été respectée pour les différents types de catégories affectives.

Pour chaque catégorie, une même proportion de sujet à la 1^{ière} personne (37,5%), 2^{ième} personne (12,5%), ou 3^{ième} personne (et noms propres, 50%) a été respectée.

Chaque phrase comptait en moyenne 10 mots, mots fonctionnels compris. Cette proportion était équivalente entre les différentes catégories, à savoir: 9,2 ± 2 pour les phrases neutres; 10 ± 2 pour la gaieté; 10,4 ± 2 pour la tristesse; 11,4 ± 3 pour la colère; 9,1 ± 2 pour le doute; 10,2 ± 2 pour l'évidence; 10,7 ± 2 pour l'ironie.

c- Le contenu lexical

Des mots appartenant à des champs lexicaux²⁰ rattachés à chaque catégorie ont été choisis à partir de la base de données Brulex (e.g. tristesse, larme, content, Content *et al.*, 1990). Les mots sélectionnés contenaient 2 ou 3 syllabes, étaient de haute fréquence lexicale (2000 occurrences pour 100 millions sur un échantillon de texte de la seconde moitié du 20^{ième} siècle) et de haute valence d'imagerie (5/6).

B. La préparation des stimuli auditifs

a- Phrases produites par le logiciel de synthèse de parole

Afin de disposer de conditions exemptes de prosodie affective, le logiciel de synthèse de parole Kali a été utilisé. Celui-ci respecte la prosodie grammaticale -pause

²⁰ Le champ lexical est un groupement de termes exprimant une même idée.

dans la phrase, intonation descendante pour une phrase déclarative- mais est *dépourvu de tout patron prosodique affectif*. La qualité de ce logiciel est sa **grande intelligibilité** à vitesse de locution élevée. Cette qualité est requise pour faire de ce logiciel un outil idéal pour assister les personnes non voyantes lors de l'utilisation de matériel informatique (Morel et Lacheret-Dujour, 2001).

Pour produire les 320 phrases produites par Kali, le texte était fourni au logiciel KaliDev® qui le transformait en un fichier informatique de type audio (fichier WAV). Les paramètres appliqués par défaut concernant le débit de parole et le niveau de prosodie grammaticale, considérés comme représentatif du discours naturel, ont été conservés. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 44 100 Hz et l'enregistrement, en mono, à 16 bits.

La moitié des phrases a été produite par une *voix masculine* accentuée dans les graves, et l'autre moitié par une *voix féminine* plus aiguë. Ainsi les voix masculine et féminine étaient bien distinctes l'une de l'autre n'entraînant pas d'ambiguïté quant au genre du locuteur. Ainsi, un effet possible du genre du locuteur sur les réseaux neuraux engagés lors de l'écoute de phrases a été contrebalancé par l'enregistrement du même nombre de phrases par l'une ou l'autre des deux voix (Wildgruber *et al.*, 2002; Sokhi *et al.*, 2005) dans l'optique d'utiliser ces stimuli dans un protocole d'imagerie fonctionnelle. En effet, il a récemment été montré, au niveau comportemental, que le genre du locuteur pouvait avoir un effet de facilitation sur la discrimination de vocalisations non verbales (rires, gémissements, cris...) : les voix féminines sont plus rapidement discriminées que les voix masculines après avoir été déjà perçues une première fois (Fecteau *et al.*, 2004b).

b- Phrases produites par les acteurs

Les 320 phrases ont été enregistrées par des acteurs dans une salle isolée acoustiquement, à l'aide d'une table de mixage, d'une carte son, et d'un micro multidirectionnel. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 44 100 Hz. L'enregistrement était effectué en mono, à 16 bits. Un acteur et une actrice ont produit chacun la moitié des phrases du corpus. Les phrases enregistrées par l'acteur sont les mêmes que celles produites par la voix masculine de Kali, de même pour les phrases enregistrées par l'actrice.

2. VALIDATION PSYCHOLINGUISTIQUE DU CORPUS

A. Méthode

L'étude de validation expérimentale du corpus a été menée sur 16 sujets dont 9 hommes et 7 femmes, droitiers, âgés de 27 ± 5 ans (moyenne \pm écart-type).

L'expérimentation s'est déroulée en *deux temps*. Tous les sujets ont débuté par la session des 320 phrases produites par Kali. Environ un mois plus tard, ils revenaient pour passer la session des 320 mêmes phrases enregistrées par les acteurs. Nous voulions éviter que les sujets se souviennent des phrases d'une session à l'autre. Cet ordre de passation a été choisi afin d'éviter que les sujets utilisent la prosodie affective contenue dans les phrases énoncées par les acteurs au cours de la tâche de classification des phrases produites par Kali.

La durée de chaque session était d'environ 45 minutes. La *tâche* des sujets consistait à classer les phrases entendues parmi sept catégories : gaieté, colère, tristesse, doute, évidence, ironie, neutre. Une touche supplémentaire permettait d'indiquer les phrases « mal comprises ». Leur temps de réponses n'était pas limité, et à chaque session, les temps de réponses et les réponses des sujets ont été enregistrés par le logiciel SuperLabtm Pro version 2.0²¹ (CEDRUS®, <http://www.superlab.com/papers/>).

B. Résultats

93% des **phrases produites par Kali** ont été bien comprises par tous les sujets. Seules 23 phrases ont été mal comprises par au moins 1 sujet. Par catégorie, nous avons donc retenu 94% des phrases neutres, 95% des phrases émotionnelles (35 phrases exprimant la colère, 39 la gaieté, et 40 la tristesse), et 90% des phrases attitudinales (31 phrases exprimant l'ironie, 39 le doute, et 38 l'évidence).

Concernant les **phrases énoncées par les acteurs**, seules les phrases correctement classées par tous les sujets devaient être sélectionnées. En appliquant ce critère de sélection, seules 58% des phrases ont été retenues. En effet, seulement 26% des phrases neutres ont été correctement classées par nos 16 sujets, contre 87% des phrases

²¹ Ce logiciel permet d'organiser la présentation des stimuli (ordre de présentation, déterminer le temps de réponses maximum...), et de définir les touches du clavier correspondant aux réponses correctes pour chaque stimuli. Il enregistre les temps de réponses et les réponses des sujets, qu'il classe en réponse correcte, incorrecte et en non-réponse.

émotionnelles. Par catégorie, 95% des phrases exprimant la colère, 85% la gaieté, et 80% la tristesse ont été retenues. Enfin, seules 59% des phrases attitudinales ont été correctement classées par tous les sujets dont 65% des phrases exprimant l'ironie, 70% le doute, et 20% l'évidence.

Les résultats faibles obtenus pour les *catégories neutre et évidence* laissent penser que les deux catégories ont été confondues. Une phrase contenant de l'évidence pouvait être classée aussi bien dans la catégorie neutre que dans la catégorie évidence, et de même une phrase neutre pouvait être incluse dans l'une ou l'autre des deux catégories.

Par exemple, la phrase exprimant l'évidence « Elle a toujours été à l'écoute de ces enfants » a été classées par 9 sujets sur 16 dans la catégorie neutre, soit 56% des sujets. La phrase neutre « Le cerisier fleurit au printemps » a été classée dans la catégorie évidence par 12 sujets sur 16, soit 75% des sujets.

Ceci nous a conduit à réviser notre critère de sélection : les réponses aux phrases neutres et aux phrases exprimant de l'évidence ont été considérées comme correctes si elles indiquaient la catégorie neutre ou la catégorie évidence. Le sujet pouvait donc classer une phrase neutre dans la catégorie neutre ou dans la catégorie évidence indifféremment. Ce critère a permis de sélectionner 82% de phrases neutres et 42% de phrases exprimant l'évidence.

Ces résultats ont mis en évidence la nécessité de séparer la classification des phrases neutres et des phrases exprimant l'évidence.

3. CONCLUSION

Cette étude a permis de **sélectionner un corpus** de 296 phrases produites par Kali et 285 phrases énoncées par les acteurs. Cette sélection a permis de construire le protocole expérimental permettant la mise en évidence de l'effet comportemental puis neural de la présence de prosodie affective sur la compréhension de phrase affective. Cet effet ne pouvait pas être confondu avec un problème de compréhension des énoncés lié à des ambiguïtés lexicales ou à un problème d'intelligibilité des phrases.

Cette expérience a également permis de vérifier que la classification affective des phrases était une tâche facilement réalisable avec les phrases énoncées par les acteurs. En effet, le taux de réponses correctes était bon pour l'ensemble des catégories : entre 99,5 et 95,6% pour les phrases énoncées par les acteurs, et entre 96,1 et 76,1% pour les phrases produites par Kali. Ces résultats ne prennent pas en compte les catégories « évidence » et « neutre » qui ont été confondues (de 66 à 70% pour les phrases produites par Kali). Par la

suite, les phrases neutres constitueront à elles seules une condition expérimentale. En effet, la classification grammaticale de ces phrases neutre permettra de mettre en évidence le traitement ortholinguistique du langage.

II. ETUDE PSYCHOLINGUISTIQUE DE L'IMPACT DE LA PROSODIE AFFECTIVE SUR LA COMPREHENSION DE PHRASE A CONTENU LEXICAL AFFECTIF

La sélection précédente des phrases a permis d'éviter les problèmes d'intelligibilité des phrases produites par Kali et les problèmes d'ambiguïté lexico-syntaxique des phrases énoncées par les acteurs (voir paragraphe 1.2, p84). Ainsi la comparaison de la classification affective de ces deux types de stimuli mettra en évidence **l'impact de la présence de prosodie affective, seul élément variant entre les deux types de phrases**. Par ailleurs, cette étude a permis de poser la question de l'impact de la catégorie affective et l'effet du genre de l'interlocuteur sur la classification des phrases à contenu lexical et prosodique affectif.

Pourquoi évaluer l'impact de la catégorie affective sur la compréhension de la phrase affective ? Si les attitudes sont contrôlées par le locuteur, et dépendent de codes socioculturels bien définis qui permettent l'interprétation du message oral, les émotions, au contraire, reflètent des sentiments aux marquages ortholinguistiques et prosodiques beaucoup plus aléatoires (voir paragraphe 1.1.A.a- , p78). L'objectif de ce travail de thèse étant de comprendre les relations entre traitement ortholinguistique et paralinguistique au cours de la compréhension de la phrase affective, il apparaît donc important d'évaluer, si il y a, la différence entre émotions et attitudes.

Un autre facteur, pouvant influencer la compréhension de la phrase affective, est le **genre de l'interlocuteur**, c'est-à-dire du sujet qui effectue l'expérience²² (Besson *et al.*, 2002). Des études menées par Annett Schirmer et collaborateurs ont montré que hommes et femmes ne traitaient pas la prosodie émotionnelle de la même manière

²² Kali et les acteurs qui ont produits les phrases entendues par nos sujets représentaient ici le « locuteur ».

(Schirmer *et al.*, 2002; Schirmer et Kotz, 2003; Schirmer *et al.*, 2004; Schirmer *et al.*, 2005a; Schirmer *et al.*, 2005b). Ces auteurs ont montré que les femmes intégreraient la prosodie émotionnelle dans la compréhension du contenu lexical plus précocement que les hommes, qui eux, traiteraient le contenu lexical de manière indépendante de la prosodie émotionnelle (Schirmer *et al.*, 2002). La même équipe a également montré que les femmes traiteraient de manière plus automatique la prosodie que les hommes (Schirmer *et al.*, 2005a). Avant de mener une étude en neuroimagerie sur l'impact de la prosodie, il convenait de vérifier au cours d'une étude psycholinguistique si un effet du genre de l'interlocuteur pouvait affecter les performances dans notre tâche de classification affective.

1. SUJETS ET PROTOCOLE

Cette étude expérimentale a été menée sur un groupe de 16 sujets âgés en moyenne de 26 ans \pm 5, avec un niveau culturel de 15 ans \pm 3. Ce groupe était composé de 8 hommes et 8 femmes qui ne différaient ni par l'âge (femmes = 23 \pm 5 ans ; hommes = 28 \pm 4 ans, test t non apparié $t_{16} = -1,7$, $p = 0,1$), ni par le niveau culturel (femmes = 14 \pm 3 ans ; hommes = 16 \pm 3 ans, test t non apparié $t_{16} = -1,7$, $p = 0,1$).

Ce protocole était composé de quatre sessions consécutives : deux sessions incluaient les phrases neutres, deux sessions les phrases affectives sélectionnées dans l'étude psycholinguistique de validation du corpus (voir paragraphe I, p77).

a- Les conditions expérimentales

Les sessions composées de **phrases à contenu lexical neutre** contenaient chacune 15 phrases. Une session comportait les 15 phrases énoncées par les acteurs et l'autre, les *mêmes* phrases, produites par Kali. Au cours de ces sessions, les sujets devaient donner le sujet de la phrase entendue en choisissant entre 1^{ière}, 2^{ième} ou 3^{ième} personne (les noms propres font partie de la 3^{ième} catégorie). Cette tâche sera nommée, par la suite, tâche de classification grammaticale. Pour des raisons techniques, seuls 13 sujets sur 16 ont passé ces sessions. L'ordre de passation était contrebalancé entre les sujets : 7 sujets ont débuté par la session de phrases produites par Kali, les 6 autres sujets par la session de phrases énoncées par les acteurs.

Les deux sessions incluant des **phrases à contenu lexical affectif** incluaient 90 phrases chacune. La tâche des sujets consistait à classer les phrases entendues parmi six catégories : gaieté, colère, tristesse, doute, évidence, ironie (15 phrases par catégories).

Ces sessions correspondaient aux tâches de classification affective. Une session de classification affective comportait les phrases enregistrées par les acteurs et l'autre session les phrases produites par Kali. Le contenu ortholinguistique était *identique* pour les phrases utilisées dans la session acteur et la session contenant les phrases produites par Kali. L'ordre de passation a été contrebalancé entre les 16 sujets. Cette randomisation a permis d'étudier l'effet de l'ordre de passation et son influence sur l'effet de la présence de prosodie affective. 8 sujets ont débuté par la session de phrases énoncées par les acteurs, les 8 autres par la session de phrases produites par Kali (Figure 20).

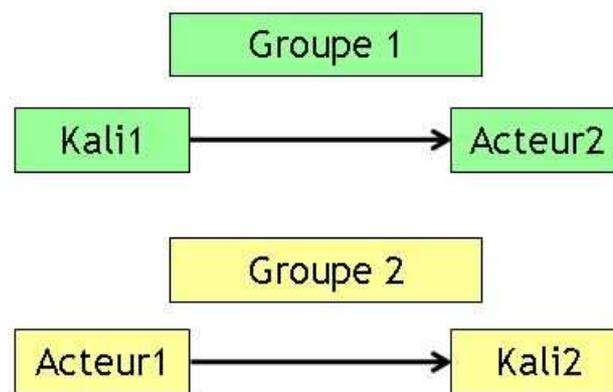


Figure 20. Ordre de passation des tâches de classification affective pour les deux groupes de sujets.

Le premier groupe de 8 sujets a passé la classification des phrases produites par Kali (Kali1) en premier, puis la classification des phrases énoncées par les acteurs (Acteur2, en vert). Le deuxième groupe de 8 sujets a débuté par la classification des phrases énoncées par les acteurs (Acteur1) puis par la classification des phrases enregistrées par Kali (Kali2, en jaune).

Le temps de réponses était limité à 1100 ms. La limitation du temps de réponses permettait de restreindre les opérations cognitives réalisées par les sujets. A chaque session, les temps de réponses et les réponses des sujets étaient enregistrés avec le logiciel SuperLabtm Pro version 2.0 (CEDRUS®, <http://www.superlab.com/papers/>) grâce à un boîtier électronique.

b- Entraînement des sujets aux conditions expérimentales

Avant de commencer les tâches de classification, les sujets se familiarisaient avec la voix de synthèse en écoutant deux textes. Ces textes avaient un contenu lexical neutre, chacun d'une durée d'une minute environ, l'un lu par la voix de synthèse masculine et l'autre par la voix de synthèse féminine. Suivait un **entraînement** à la tâche de classification affective des phrases enregistrées par les acteurs et produites par Kali. Ces deux sessions d'entraînement incluaient chacune deux phrases par catégories affectives différentes. Ces sessions permettaient de pallier un effet d'apprentissage des touches.

L'expérimentation débutait uniquement lorsque les sujets se sentaient à l'aise avec les touches réponses.

c- Le questionnaire post-expérimental

A la fin de la passation des quatre sessions, les sujets répondaient à un **questionnaire post-expérimental**. Une question portait sur la difficulté des différentes sessions les unes par rapport aux autres, puis des questions plus spécifiques sur les stratégies employées au cours de la tâche de classification affective étaient posées. Les sujets devaient décrire les stratégies utilisées pour résoudre les différentes sessions, stratégies basées sur le contenu lexical des phrases et / ou sur l'intonation. Les réponses ont permis de déterminer si les stratégies de résolution étaient ou non identiques en fonction du mode d'enregistrement des phrases (acteurs ou Kali) et ainsi si la présence de prosodie affective pouvait les modifier.

Les phrases étant identiques entre celles prononcées par les acteurs et celles produites par Kali, les sujets étaient interrogés sur la facilitation ou non de la tâche au cours de la deuxième session de classification affective. Cette question a permis d'éclairer la nature d'un effet d'ordre de passation.

Enfin, on demandait au sujet s'il s'était mis à la place du locuteur pour résoudre la tâche. A partir de cette question, il était possible de savoir si les sujets faisaient appel à la théorie de l'esprit²³ et se représentaient en situation de communication pour résoudre la tâche.

2. ANALYSE

Le nombre de réponses correctes par catégorie (RC, un point attribué par phrase bien classée) et le temps de réponses (TR) des phrases convenablement classées ont été analysés.

L'analyse des résultats aux tâches de classification affective et grammaticale a été effectuée séparément. Pour la **tâche de classification grammaticale** nous avons cherché s'il existait une influence du genre sur les performances des sujets. Une ANOVA à mesures répétées nous a permis d'évaluer cet effet et les interactions avec la Voix du locuteur (Kali versus Acteur), et l'ordre de passation ('session avec les phrases produites par Kali puis

²³ Capacité à inférer son propre état mental et celui d'autrui (Premack et Woodruff, 1978; Houdé *et al.*, 1998).

session avec les phrases énoncées par les acteurs' versus 'session les phrases énoncées par les acteurs puis session avec les phrases produites par Kali').

Pour la **tâche de classification affective**, une ANOVA à mesures répétées à quatre facteurs a été calculée. Nous retrouvons le facteur Genre, Voix (Kali versus acteur), Ordre de passation. Le dernier facteur inhérent à la tâche est le facteur Catégorie (gaieté, tristesse, colère, évidence, doute, ironie pour la classification affective uniquement).

Un des objectifs de ce travail était de déterminer l'influence relative des émotions et attitudes dans la compréhension de phrases affectives. Pour valider cette distinction *a priori*, l'impact de chaque catégorie (doute, évidence, ironie, gaieté, tristesse et colère) sur les performances des sujets doit être évalué indépendamment. En fonction de leur impact, nous verrons s'il est possible d'effectuer une classification en deux types de catégories.

Lorsque des post-tests (tests t) ont été réalisés, une correction de Bonferroni a été appliquée au seuil de significativité. Selon cette méthode, le seuil de significativité est fixé à 0,05 divisé par le nombre de post-test effectué.

3. RESULTATS

A. Effet genre

Au cours de la **tâche de classification grammaticale**, aucune interaction, que ce soit au niveau des performances ou du temps de réalisation de la tâche, n'est observée entre le facteur Genre et le facteur Voix (RC, $F_{3,13} = 1,1$, $p = 0,32$, TR, $F_{3,13} = 1,7$, $p = 0,22$) ou le facteur Ordre de passation (RC, $F_{3,13} = 0,6$, $p = 0,44$, TR, $F_{3,13} = 0,7$, $p = 0,42$)²⁴.

La tâche grammaticale a été réalisée avec des performances équivalentes entre hommes et femmes en terme de nombre de réponses correctes (RC, Femmes = $40,7 \pm 0,5$; Hommes = $40,98 \pm 0,3$; $F_{3,13} = 0,06$, $p = 0,8$, Figure 21.B) et de temps de réponses (TR, Femmes = 372 ± 25 ; Hommes = 321 ± 34 ; $F_{3,13} = 0,7$, $p = 0,4$, Figure 21.A).

²⁴ Les interactions triples ou quadruples ne sont pas non plus significatives.

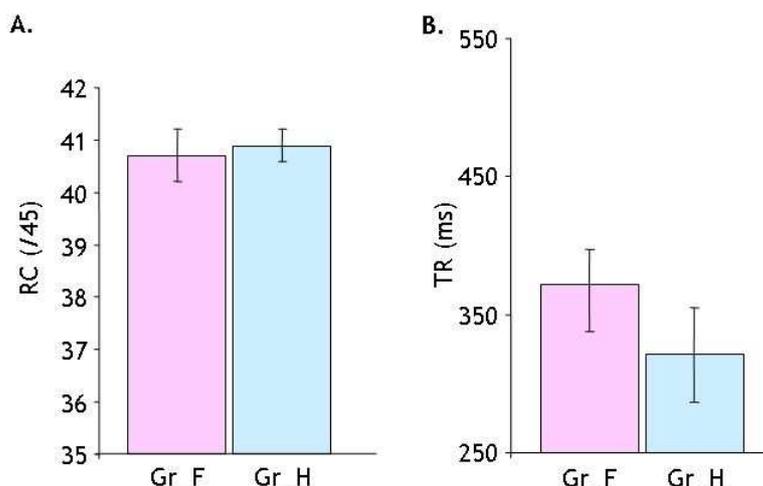


Figure 21. L'effet Genre sur les réponses correctes (sur 45, A) et les temps de réponses correctes (TR, ms, B) lors de la classification grammaticale.

Moyenne \pm écart-type (ES) pour les performances obtenues par les femmes et par les hommes au cours de la classification grammaticale (respectivement Gr_F : rose pale, Gr_H : bleu clair).

Concernant la **classification affective**, aucune interaction entre le facteur Genre et les facteurs Voix (RC, $F_{4,13} = 0,1$, $p = 0,72$, TR, $F_{4,13} = 0,1$, $p = 0,69$), Ordre de passation (RC, $F_{4,13} = 0,2$, $p = 0,70$, TR, $F_{4,13} = 1$, $p = 0,34$) ou Catégorie (RC, $F_{4,13} = 1,4$, $p = 0,21$, TR, $F_{4,13} = 1,3$, $p = 0,25$) n'est observée²⁵.

Cependant, au cours de la classification affective, bien qu'un *effet principal* ne soit pas retrouvé pour les temps de réponses (TR, Femmes = 512 ± 13 ; Hommes = 504 ± 12 ; $F_{4,13} = 0,1$, $p = 0,8$, Figure 22.A), il existe une différence significative entre hommes et femmes sur le nombre de réponses correctes. En effet, les femmes, quelle que soit la catégorie, l'ordre de passation et la voix, obtiennent de meilleures performances en moyenne que les hommes lors de la tâche de classification affective (RC, Femmes = $40,5 \pm 0,1$; Hommes = $37,8 \pm 0,2$; $F_{4,13} = 8,7$, $p = 0,01$, Figure 22.B).

Par soucis de clarté, les analyses suivantes seront présentées sans prendre en compte l'effet Genre puisqu'il n'interagit avec aucun des autres facteurs.

²⁵ Les interactions triples ou quadruples ne sont pas non plus significatives.

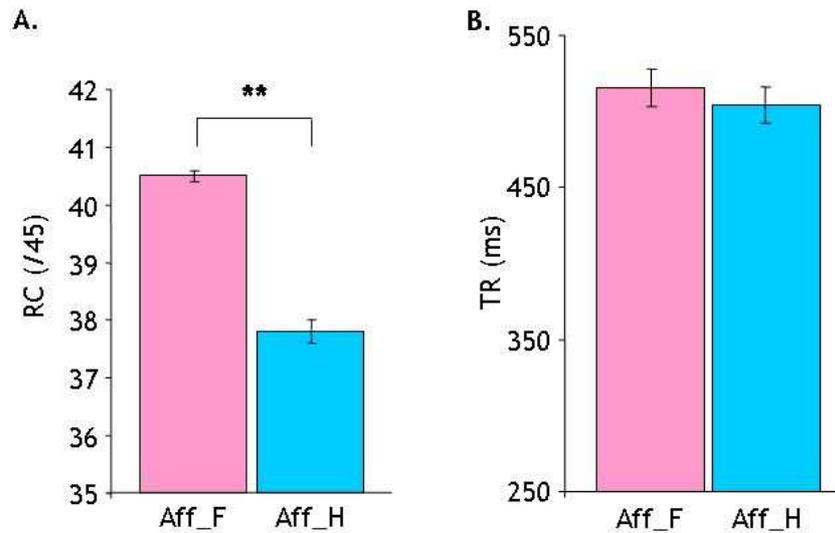


Figure 22. L'effet Genre sur les réponses correctes (/45, A) et les temps de réponses correctes (TR, ms, B) lors de la classification affective.

Moyenne \pm ES pour les performances obtenues par les femmes et par les hommes au cours de la classification affective (respectivement Aff_F : rose, Aff_H : bleu).

B. Conditions neutres

Rappelons que les mêmes phrases étaient utilisées pour la session des phrases enregistrées par les acteurs et la session de phrases produites par Kali et que l'ordre de passation des deux sessions était contrebalancé entre les sujets. Aucune interaction entre l'Ordre de passage et la Voix n'est observée pour le nombre de réponses correctes ($F_{3,13} = 0,4$, $p = 0,5$), ni pour le temps de réponses ($F_{3,13} = 3,9$, $p = 0,07$). L'effet principal de l'Ordre de passage n'est pas non plus significatif ni pour l'une, ni pour l'autre variable (RC : $F_{3,13} = 3,4$, $p = 0,08$; TR : $F_{3,13} = 3$, $p = 0,1$).

Aucune différence significative n'est observée entre classification grammaticale des phrases neutres énoncées par les acteurs ou celle opérée sur les phrases neutres produites par Kali sur le nombre de réponses correctes (RC : phrases énoncées par les acteurs = $40,9 \pm 0,5$, phrases produites par Kali = $40,6 \pm 0,3$, moyenne \pm ES, $F_{3,13} = 0,4$, $p = 0,5$; Figure 23.A). Cependant, le temps de réponses au classement des phrases énoncées par les acteurs augmente légèrement par rapport à celui du classement des phrases produites par Kali (TR : phrases énoncées par les acteurs = 366 ± 32 , phrases produites par Kali = 339 ± 26 ; $F_{3,13} = 5,2$, $p = 0,04$; Figure 23.B).

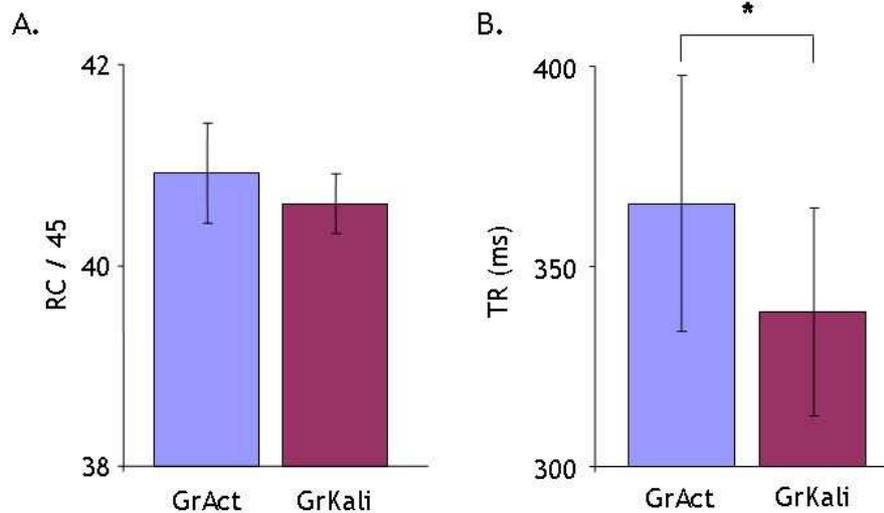


Figure 23. Effet Voix sur les réponses correctes (/45, A) et les temps de réponses correctes (TR, ms, B) lors de la classification grammaticale.

Moyenne \pm ES pour les phrases lues par les acteurs (GrAct, en bleu), et celles produites par Kali (GrKali, en bordeaux).

C. Conditions affectives

Rappelons que les mêmes phrases étaient utilisées pour la session des phrases enregistrées par les acteurs et la session de phrases produites par Kali et que l'Ordre de passation des deux sessions était contrebalancé entre les sujets.

a- Le nombre de réponses correctes

Qualitativement, la tâche de classification affective semble bien réussie quelle que soit la condition de passation (Table 7).

Table 7. Nombre de réponses correctes (RC / 15 \pm erreur standard, ES) pour les huit sujets (en jaune) ayant passé en premier la session des phrases lues par les acteurs (1^{ière} ligne) puis celles de Kali (4^{ième} ligne), pour les huit sujets (en vert) ayant passé en premier les phrases produites par Kali (2^{ième} ligne) puis les phrases enregistrées par les acteurs (3^{ième} ligne) par catégorie (colère, gaieté, tristesse, évidence, doute, ironie).

Passation	Voix	Emotions			Attitudes		
		Colère	Gaieté	Tristesse	Evidence	Doute	Ironie
1	acteur	13,6 \pm 0,6	13,5 \pm 0,4	13,6 \pm 0,3	13,4 \pm 0,7	12,7 \pm 0,8	12,9 \pm 0,4
	Kali	11,2 \pm 0,9	12,4 \pm 0,5	11,2 \pm 0,5	12,2 \pm 0,5	11 \pm 1	11,9 \pm 0,5
2	acteur	14,1 \pm 0,5	14,4 \pm 0,4	14,4 \pm 0,4	14,4 \pm 0,3	13,6 \pm 0,6	14,2 \pm 0,2
	Kali	12,7 \pm 0,3	13,7 \pm 0,4	13,1 \pm 0,3	13,6 \pm 0,3	13 \pm 0,6	12,9 \pm 0,4

L'ANOVA ne montre pas d'interaction Passation * Voix * Catégorie ($F_{4,16} = 0,1$, $p = 0,98$), ni d'interaction entre le facteur Catégorie et Voix ($F_{4,16} = 1,1$, $p = 0,4$), ni Catégorie * Passation ($F_{4,16} = 0,3$, $p = 0,9$).

Par contre, il existe une interaction très significative Passation * Voix ($F_{4,16} = 21$ $p = 0,0004$, Figure 24).

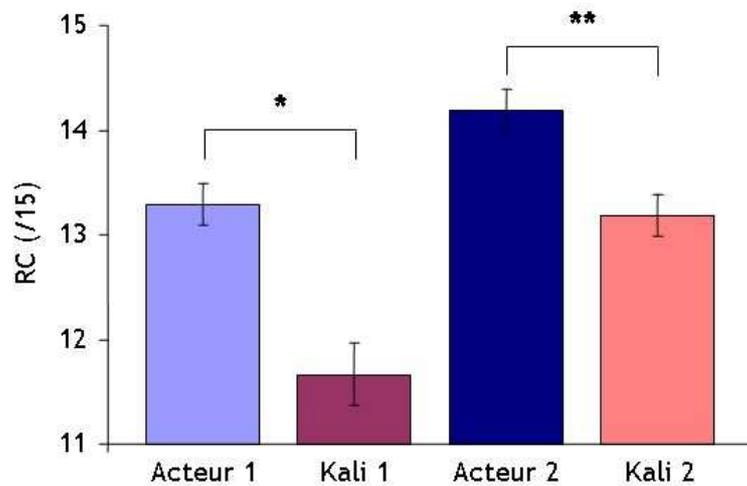


Figure 24. Nombre moyen de réponses correctes (/15 \pm ES) en fonction de l'ordre de passation.

Sont représentés les résultats pour les huit sujets ayant passé en premier la classification affective des phrases lues par les acteurs (Acteur 1, ■) puis celle portant sur les phrases enregistrées par Kali (Kali 2, ■), des huit sujets ayant passé en premier la classification affective des phrases produites par Kali (Kali 1, ■) puis celle portant sur les phrases énoncées par les acteurs (Acteur 2, ■).

Les post-tests indiquent que les sujets qui ont passé en premier la classification des phrases énoncées par les acteurs (Acteur 1) présentent de meilleures performances que les sujets qui ont classé les phrases produites par Kali en premier (Kali 1, test t non apparié, $t_{16} = 2,9$, $p = 0,01$). Ainsi, la présence de prosodie affective dans les phrases enregistrées par les acteurs conduit à l'obtention de meilleures performances.

De même au cours du deuxième passage, les sujets ayant classé les phrases énoncées par les acteurs (Acteur 2) obtiennent de meilleurs scores que les sujets ayant classé les phrases produites par Kali (Kali 2, test t non apparié, $t_{16} = -3,1$, $p = 0,008$).

L'effet facilitateur de la présence de prosodie est présent quel que soit l'ordre de passation, mais cet effet est plus ou moins important en fonction de l'ordre de passation.

Si l'on compare les performances à la tâche de classification des phrases enregistrées par les acteurs suivant leur ordre de passage, les résultats suivants sont obtenus : Les performances ont tendance à augmenter, passant de 14,1 au cours du deuxième passage (Acteur 2) à 13,3 au premier passage de la session acteurs (Acteur 1, test t non apparié, $t_{16} = -2,1$, $p = 0,05$). Mais cet effet n'est pas significatif car il ne passe pas le seuil corrigé par la méthode de Bonferroni ($p \leq 0,01$ pour 4 comparaisons *a posteriori*, voir paragraphe II.2, p89). En ce qui concerne les phrases produites par Kali, le deuxième passage (Kali 2) est lui nettement amélioré par rapport au premier passage (Kali 1) puisque l'on passe de 13,1 à 11,6 (test t non apparié, $t_{16} = 3,1$, $p = 0,008$). Les sujets

obtiennent de bien meilleures performances à la deuxième session lorsqu'il s'agit de classer les phrases produites par Kali qu'énoncées par les acteurs. L'effet facilitateur de la deuxième session est donc plus important pour les phrases produites par Kali.

Concernant les effets principaux, il n'existe pas d'effet Passation ($F_{4,16} = 0,7$, $p = 0,4$). Nous venons de voir qu'il dépendait de la voix qui produit les phrases. Cependant, un effet principal significatif de la Voix montre que la classification des phrases lues par les acteurs était mieux réussie que celle des phrases produites par Kali ($F_{4,16} = 25$, $p = 0,0002$). Enfin, aucun effet principal Catégorie n'est observé ($F_{4,16} = 1,6$, $p = 0,2$). Il n'existe donc pas d'incidence de la catégorie sur les performances au test quelle que soit la condition.

b- Temps de réponses

Les temps de réponses (ms) dans chaque condition sont présentés dans la Table 8.

Table 8. Temps de réponses moyen (\pm ES, TR, ms) pour les réponses correctes des huit sujets (en jaune) ayant passé en premier les phrases lues par les acteurs (1^{ière} ligne) puis celles produites par Kali (3^{ème} ligne), des huit sujets (en vert) ayant passé en premier les phrases produites par Kali (2^{ème} ligne) puis les phrases enregistrées par les acteurs (4^{ème} ligne) en fonction de la catégorie (colère, gaieté, tristesse, évidence, doute, ironie).

Passage	Voix	Emotions			Attitudes		
		Colère	Gaieté	Tristesse	Evidence	Doute	Ironie
1	acteur	505 \pm 30	529 \pm 27	560 \pm 31	542 \pm 41	556 \pm 31	495 \pm 33
	Kali	581 \pm 29	547 \pm 47	576 \pm 47	569 \pm 25	616 \pm 32	525 \pm 29
2	acteur	494 \pm 47	473 \pm 51	553 \pm 38	562 \pm 41	584 \pm 42	447 \pm 43
	Kali	327 \pm 33	429 \pm 42	384 \pm 50	431 \pm 40	537 \pm 28	404 \pm 28

En ce qui concerne le temps de réponses, aucune interaction n'est observée entre les facteurs Catégorie, Passation et Voix ($F_{4,16} = 1,5$, $p = 0,19$). Parmi les doubles interactions, ni Catégorie * Passation ($F_{4,16} = 1,3$, $p = 0,23$), ni Catégorie * Voix ($F_{4,16} = 1,2$, $p = 0,33$) ne sont significatives.

L'interaction entre l'effet Passation et l'effet Voix est significative ($F_{4,16} = 17,5$, $p = 0,0009$, Figure 25).

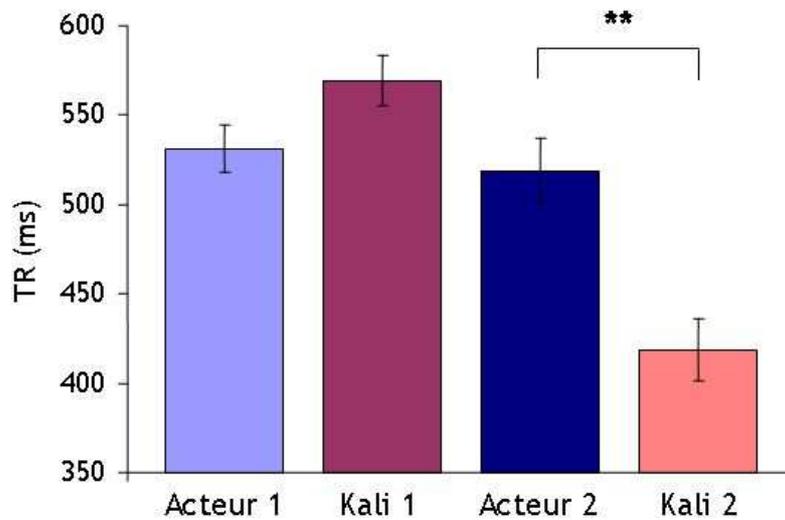


Figure 25. Temps de réponses correctes moyens (ms \pm ES) en fonction de l'ordre de passation.

Sont représentés les résultats pour les huit sujets ayant passé en premier la classification affective des phrases lues par les acteurs (Acteur 1, ■) puis celle portant sur les phrases enregistrées par Kali (Kali 2, ■), des huit sujets ayant passé en premier la classification affective des phrases produites par Kali (Kali 1, ■) puis celle portant sur les phrases énoncées par les acteurs (Acteur 2, ■).

Les post-tests montrent, qu'au cours du premier passage, la tâche de classification affective demande autant de temps de traitement que les phrases soient produites par Kali (Kali 1) ou énoncées par les acteurs (Acteur 1, test de t non apparié, $t_{16} = -1,4$, $p = 0,2$). Par contre, au cours de la deuxième passation, le classement des phrases enregistrées par des acteurs (Acteur 2) est plus long que le classement des phrases produites par Kali (Kali 2, test t non apparié, $t_{16} = -2,2$, $p = 0,04$). Cependant, il faut noter que cet effet n'est pas significatif après la correction de Bonferroni ($p \leq 0,01$ pour 4 comparaisons *a posteriori*, voir paragraphe II.2, p89).

Le temps de résolution de la tâche de classification des phrases énoncées par les acteurs lors de leur premier passage (Acteur 1) n'est pas différent significativement du temps de résolution de la tâche de classification lors du deuxième passage (Acteur 2, test t non apparié, $t_{16} = -0,3$, $p = 0,8$). Par contre, le temps de résolution de la tâche de classification des phrases produites par Kali au cours du premier passage (Kali 1) est nettement plus long que lors du deuxième passage (Kali 2, test t non apparié, $t_{16} = -4,3$, $p = 0,0007$). L'effet facilitateur de l'ordre de passation est donc observé uniquement pour la classification des phrases produites par Kali, et est de l'ordre de 150 ms.

Ni l'effet principal Passation ($F_{4,16} = 4,8$, $p = 0,05$), ni l'effet Voix ($F_{4,16} = 2,6$, $p = 0,12$) ne sont significatifs.

Par contre, il existe un effet principal Catégorie ($F_{4,16} = 6,5$, $p < 0,0001$). Le post-test PLSD de Fischer (Protected Least Significant Difference, Annexe 4, p289) montre que le doute est la catégorie la plus difficile, puis viennent l'évidence et la tristesse, puis la gaieté suivie par l'ironie et la colère (Figure 26).

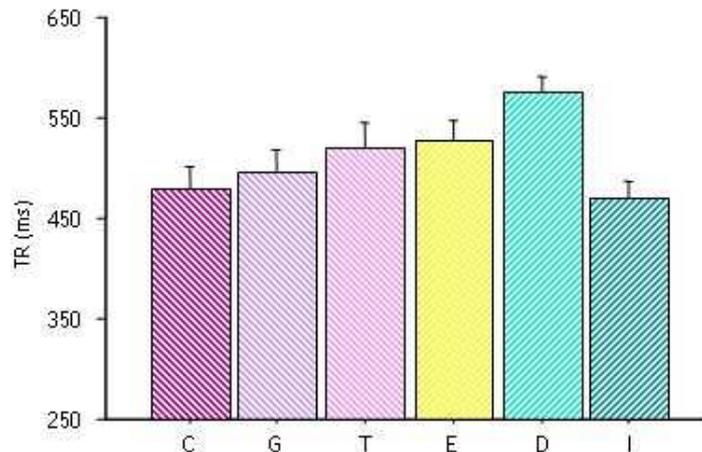


Figure 26. Temps de réponses correctes moyen (ms + ES) par catégorie quelle que soit la session.

Les émotions sont rayées de gauche à droite : colère = C, violet foncé, gaieté = G, violet clair, tristesse = T, rose ; les attitudes sont rayées de droite à gauche : évidence = E, jaune, doute = D, vert pale, ironie = I, vert foncé.

4. RECAPITULATIF DES RESULTATS COMPORTEMENTAUX

Lors de la **classification grammaticale**, aucun effet du genre de l'interlocuteur, ni d'interaction avec d'autres facteurs ne sont observés ni sur le nombre de réponses correctes (RC), ni sur les temps de réponses pour les réponses correctes (TR).

Seul l'effet Voix est significatif sur les temps de réponses, montrant un temps de réponses plus court pour la classification grammaticale des phrases neutres produites par Kali que pour la classification des phrases énoncées par les acteurs. Aucune interaction entre l'effet Voix et l'effet Passation n'est observée sur les performances de nos sujets.

En ce qui concerne la **classification affective**, les femmes montraient un score plus élevé que les hommes quels que soient la voix ou l'ordre de passation.

Une interaction significative est observée entre *l'effet Voix et l'effet Passation* tant au niveau des réponses correctes que des temps de réponses à la tâche de classification affective (résultat décrit dans la Figure 27).

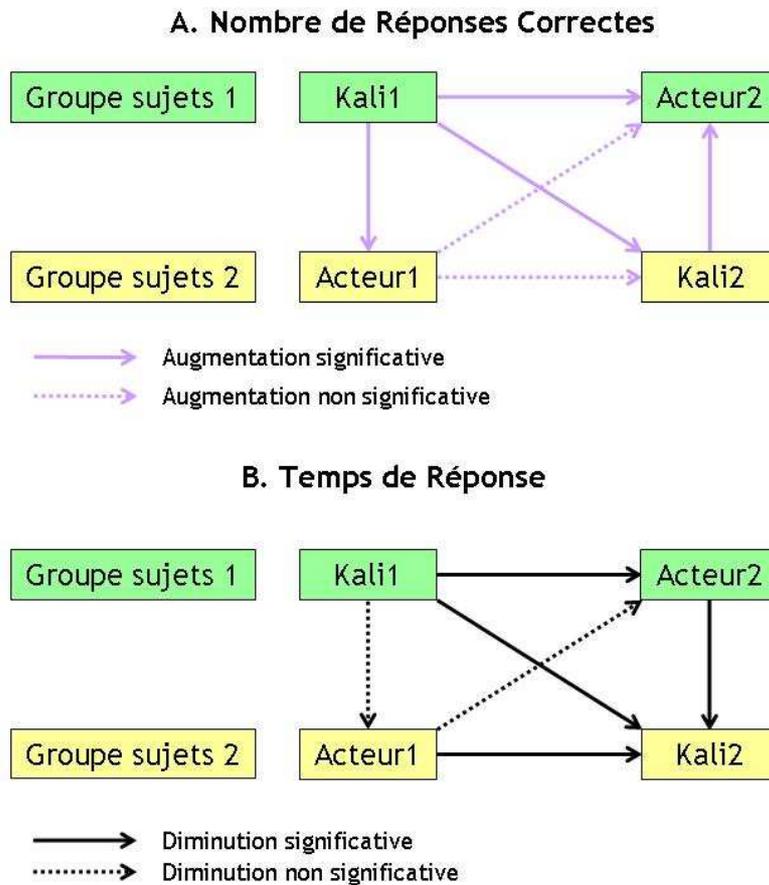


Figure 27. Récapitulatif des résultats comportementaux obtenus pour la classification affective.

Le groupe de sujets 1 a suivi l'ordre de passation suivant : classification des phrases produites par Kali (Kali1, en vert) puis classification des phrases lues par les acteurs (Acteur2, vert). Le groupe de sujets 2 a débuté la session par la classification des phrases affectives énoncées par les acteurs (Acteur1, en jaune) puis la classification des phrases enregistrées par Kali (Kali2, en jaune). A. Le sens d'augmentation du nombre de Réponses Correctes (RC) entre deux tâches de classification affective est représenté par une flèche, en trait plein lorsqu'elle est significative (test de t), en pointillé pour une augmentation non significative (NS). Les flèches montrent donc l'amélioration des performances d'une session à l'autre. B. Le sens de diminution du Temps de réponses aux RC est représenté par des flèches (significative en trait plein, NS en pointillé). Là encore les flèches représentent une amélioration des performances.

Au cours du premier passage, la classification des phrases produites par Kali apparaît plus longue et moins bonne que la classification des phrases énoncées par les acteurs avec la prosodie affective. Mais au cours du deuxième passage, l'inverse est observé : les sujets étaient plus rapides pour classer les phrases produites par Kali sans prosodie que pour classer les phrases énoncées par les acteurs. L'effet facilitateur de l'ordre de passation est très important sur les phrases produites par Kali : le fait d'entendre les phrases avec la prosodie appropriée au cours du passage de la session acteurs en premier (Acteur 1) permettait une plus rapide résolution de la tâche de classification affective des phrases produites par Kali (Kali 2). Par contre, un effet de facilitation de la répétition du contenu lexical en terme de temps de réponses et du nombre de réponses correctes n'est pas observé pour les phrases énoncées par les acteurs.

Les sujets mettaient autant de temps à les classer et les traitaient comme s'ils les entendaient pour la première fois, alors que le contenu lexical était identique à celui des phrases produites par Kali au cours de la première passation.

Par ailleurs, un *effet Catégorie* est observé uniquement sur les temps de réponses. Ce résultat montre que le doute est plus long à classer que l'évidence et la tristesse. Ainsi, les catégories reconnues le plus rapidement étaient la gaieté, la colère et l'ironie.

5. QUESTIONNAIRE POST-EXPERIMENTAL

De manière générale, tous les sujets ont trouvé la tâche de classification grammaticale beaucoup plus aisée que la tâche de classification affective.

15 sujets sur 16 ont relaté avoir trouvé la *tâche de classification affective plus facile* lorsque les phrases à classer étaient enregistrées par les voix d'acteurs avec prosodie affective.

A. Effet de la répétition des phrases entre les sessions

Les 8 sujets ayant effectué la tâche de classification en commençant par les sessions acteurs rapportaient s'être souvenus de leurs réponses et de l'intonation des phrases quand ils devaient, par la suite, classer les phrases produites par Kali. Dans ce cas ils résolvaient la tâche en se basant à la fois sur le contenu lexical et sur le souvenir de la prosodie entendue précédemment.

Les sujets, qui débutaient les sessions par les phrases produites par Kali, utilisaient le contenu lexical des phrases mais ce dernier seul, ne leur permettait pas d'améliorer leurs performances à la tâche de classification affective au cours de la deuxième session portant sur les phrases enregistrées par les acteurs.

B. Effet de la catégorie

En ce qui concerne le *degré de difficulté de classement des six catégories*, la moitié des sujets ont rapporté une équivalence entre les catégories à classer, quelle que soit la voix. L'autre moitié a rencontré une difficulté un peu plus importante pour les

catégories du doute et de l'évidence, surtout lorsque les phrases étaient enregistrées par la voix de synthèse.

C. Autre stratégie de résolution de la tâche

Par ailleurs, 13 sujets (dont 7 qui avaient débuté par la session contenant les phrases produites par Kali) ont dit s'être mis à la place du locuteur pour résoudre la tâche de classification affective quelle que soit la voix produisant les phrases (voir paragraphe III.3.B.b- , p138).

6. DISCUSSION

Ce protocole nous a permis de répondre à plusieurs objectifs concernant la mise au point du protocole de neuroimagerie d'étude des bases neurales de la compréhension de phrases affectives. Le premier objectif était de vérifier, au niveau comportemental, l'existence d'un impact de la présence de prosodie sur la compréhension des stimuli. Mais d'abord, il fallait vérifier l'impact de l'utilisation de Kali, et sa bonne intelligibilité, malgré la sélection préalable des stimuli. Enfin, nous discuterons l'effet de la catégorie affective, puis du genre de l'interlocuteur dans cette étude psycholinguistique.

A. Utilisation de Kali pour la mise en évidence de l'effet de la prosodie affective sur la compréhension de la phrase affective.

Malgré la sélection des phrases intelligibles produites par Kali, il convenait de vérifier, sur un autre échantillon de la population, que ces phrases étaient bien compréhensibles. En effet, au cours de la première étude psycholinguistique, le corpus était composé de 320 phrases offrant la possibilité aux sujets de s'accoutumer à la compréhension de cette voix de synthèse. L'inclusion de tâches d'entraînement a permis de réaliser une familiarisation aux touches de réponses et à la voix et de vérifier si cet entraînement était suffisant.

L'utilisation de la voix de synthèse ne semble pas avoir posé de problèmes de compréhension comme le montrent les résultats à la tâche de classification

grammaticale²⁶. Les sujets ont été capables de traiter aussi rapidement, voire un peu plus rapidement les phrases produites par Kali que les phrases énoncées par les acteurs. Ainsi, ces résultats confirment que l'utilisation de cette voix de synthèse n'altère pas la classification, et donc la compréhension des phrases.

La production de phrases sans prosodie affective par Kali représenterait donc des stimuli de choix, puisqu'à contenu lexical neutre et prosodique grammatical équivalent, cette voix de synthèse n'altère pas la compréhension.

B. L'effet de la présence de prosodie affective sur la compréhension de la phrase affective.

Tout d'abord, quel que soit l'ordre de passation, la classification des phrases lues par les acteurs était mieux réussie que celle des phrases produites par Kali : la présence de prosodie affective permet d'augmenter les performances des sujets à la tâche de classification, démontrant son impact facilitateur sur la compréhension du contenu affectif du message verbal.

Par ailleurs, cet effet est mis en évidence par l'interaction entre l'effet de l'ordre de passation et l'effet de la présence de prosodie.

Un effet facilitateur de la présence de prosodie préalablement entendue en terme de temps de traitement et du nombre de réponses correctes a été observé pour la classification des phrases affectives produites par Kali. Ce résultat viendrait du fait que les sujets ayant passés en premier la classification des phrases énoncées par les acteurs rapportaient, au cours du questionnaire post-expérimental, avoir « copié » la prosodie qu'elles contenaient pour classer les phrases produites par Kali.

Par contre, un effet de facilitation de la répétition du contenu lexical en terme de temps de réponses n'est pas observé pour les phrases énoncées par les acteurs : les sujets mettaient autant de temps à les classer comme s'ils les entendaient pour la première fois. Ces résultats laisseraient supposer que les sujets étaient obligés de refaire une classification affective des phrases enregistrées par les acteurs, après avoir entendu les phrases enregistrées par Kali, comme s'ils étaient confrontés à de nouvelles phrases. La classification préalable des phrases produites par Kali ne semblait d'aucune utilité pour résoudre plus rapidement le classement des phrases énoncées par les acteurs et une

²⁶ Tâche qui consiste à classer le sujet de la phrase suivant qu'il est à la 1^{ière}, 2^{ième} ou 3^{ième} personne du singulier.

nouvelle analyse des phrases semblait nécessaire. Cette nouvelle analyse serait liée à la présence de nouvelles informations apportées par la prosodie dans les phrases énoncées par les acteurs.

Que ce soit au travers de l'analyse du nombre de réponses correctes ou du temps de réponses correctes, nous avons montré que la prosodie affective facilite la classification des phrases affectives qu'elle soit directement énoncée ou préalablement entendue. Cependant, l'effet de la présence de prosodie était particulièrement et directement mis en évidence quand les sujets résolvaient la tâche de classification affective en commençant par la session produite par la voix de synthèse suivie de la session de phrases enregistrées par les acteurs. Le choix de cet ordre de passation des sessions pour l'étude d'imagerie fonctionnelle a donc été retenu. Par ailleurs, nous avons choisi les phrases énoncées par les acteurs pour qu'elles soient différentes de celles produites par Kali, pour éviter l'effet, quoique faible, de répétition du contenu lexical.

La prosodie affective préalablement entendue permettrait de mieux réussir la tâche de classification en l'absence de prosodie affective. La prosodie affective apparaît alors comme un élément paralinguistique facilitant la classification affective de phrase à contenu lexical affectif qu'elle soit incluse directement au discours ou « copiée » d'un énoncé à un autre.

C. L'effet de la catégorie affective sur la compréhension de la phrase affective.

Cette étude montre qu'une différence entre les catégories ne peut pas être mise en évidence à travers l'analyse des réponses à la classification affective. L'existence d'un effet Catégorie a été retrouvée uniquement sur le temps de réponses. Seul le doute semble plus long à classer que les autres catégories. Mais ces résultats ne permettent pas de retrouver la distinction *a priori* entre émotion et attitude. Ceci peut être expliqué par le fait que les sujets devaient attendre la fin de la phrase pour répondre, ce qui a pu empêcher de retrouver la distinction émotion/attitude.

En effet, l'examen plus approfondi des constructions lexico-syntaxiques des phrases montre une différence entre les phrases attitudinales et les phrases émotionnelles. Les phrases de *doute* se terminaient par une intonation montante en fin de phrase, indiquant une interrogation, comme dans l'exemple « *Tu es sûr que j'ai oublié de te prévenir pour la fête ?* ». Le sujet devait donc attendre la fin de la phrase et de l'avoir comprise pour compléter la tâche. Ce traitement prendrait plus de temps que si un indice prosodique ou

lexical était présent en début de phrases. Ceci pourrait expliquer les résultats comportementaux concernant le doute.

Bien que *l'ironie* soit aussi bien reconnue que les émotions, les phrases d'ironie différaient dans leur composition lexicale et leur construction grammaticale des autres catégories. Le trait lexical caractéristique des phrases incluses dans cette catégorie était une opposition entre le contenu de la première et deuxième moitié de la phrase, comme dans l'exemple « *J'ai adoré la douceur de ce livre d'horreur* ». Ainsi, l'ironie était présente au niveau prosodique mais également lexical. En ce qui concerne *l'évidence*, le contenu lexico-syntaxique faisait référence aux connaissances culturelles. Par exemple, « *Je vais prendre mon parapluie avec ce sale temps* » présentait l'action qui était déterminée par la condition météorologique. Pour classer les phrases dans la catégorie de l'évidence, l'intégration de la phrase dans son ensemble était donc requise.

Les attitudes semblaient donc être bien codées ortholinguistiquement, notamment au niveau syntaxique.

Par contre, pour les émotions et plus particulièrement la *colère*, dès le premier mot de la phrase l'intonation pouvait être reconnue. Le contenu lexical était fortement imprégné des champs lexicaux²⁷ émotionnels, mais on ne trouvait pas de structure syntaxique caractéristique comme pour les attitudes. Dans ce cas, l'intégration lexico-syntaxique n'était pas absolument nécessaire pour effectuer la tâche de classification affective.

La mise en évidence d'une distinction entre émotions et attitudes pourrait donc se faire à travers une *expérience de gating*. Ce type d'approche permet d'enregistrer les réponses au cours de l'écoute de phrases (Grosjean, 1996). Ainsi, si nos observations sont exactes, les phrases émotionnelles devraient être reconnues dès le début de la phrase grâce à l'intonation ou au premier mot appartenant au champ notionnel émotionnel. Tandis que la reconnaissance des phrases attitudinales se ferait plus tardivement une fois les structures syntaxiques, lexicales et prosodiques analysées et intégrées.

Ces hypothèses linguistiques ont conduit à conserver au cours de l'étude de neuroimagerie la distinction entre émotions et attitudes : la tâche de classification affective a été opérée séparément sur les phrases émotionnelles et attitudinales.

²⁷ Le champ lexical est un groupement de termes exprimant une même idée.

D. L'effet du genre du locuteur sur la compréhension de la phrase affective.

Le dernier facteur pouvant influencer les résultats de l'étude psycholinguistique était le genre des sujets. Il apparaît que ce facteur n'influçait pas les performances à la tâche de classification grammaticale. Par contre, les femmes obtenaient de meilleures performances à la tâche de classification affective en présence ou non de prosodie (Figure 22). Les résultats du questionnaire post-expérimental ne montraient pas de différence de stratégie dans la résolution de cette tâche entre hommes et femmes. Les meilleures performances des femmes dans cette tâche ne reposaient donc pas sur une différence des stratégies évaluées par notre questionnaire post-expérimental.

Ces résultats montrent que les femmes sont plus efficaces pour la catégorisation émotionnelle que les hommes. Pourtant il a été montré qu'il n'existe pas de différence entre hommes et femmes dans la reconnaissance des émotions sur les visages (Kesler-West *et al.*, 2001), ni dans le niveau d'induction d'un état émotionnel (George *et al.*, 1996a). Nous ne pouvons pas non plus interpréter ces résultats sur la base d'une meilleure intégration du contenu prosodique avec le contenu lexical comme l'ont montré Annett Schirmer et collaborateurs (Schirmer *et al.*, 2002), puisque les femmes surpassaient les hommes en présence ou en l'absence de prosodie.

Est ce que ces résultats sont à mettre en relation avec de meilleures performances aux tâches de nature verbale de manière générale (Halpern, 1993) ? Diane Halpern a montré que les femmes avaient un meilleur accès en mémoire à long terme aux informations phonologiques et lexicales (Halpern, 1997). Une évaluation plus précise des performances des sujets dans différentes tâches de mémoire pourrait éventuellement apporter une réponse à cette interrogation. En attendant, l'étude de neuroimagerie a été menée sur un groupe d'hommes et de femmes, l'objectif premier de cette étude étant l'étude des bases neurales communes aux hommes et aux femmes dans la compréhension de phrases affectives. Une différence neurale entre hommes et femmes sera évaluée ultérieurement (voir perspectives, p165).

III. LES BASES NEURALES DE LA COMPREHENSION DE PHRASES AFFECTIVES

L'objectif principal, pour l'élaboration de notre protocole d'IRMf (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle), a été d'utiliser des stimuli qui, à contenu lexico-syntaxique équivalent, présentaient ou non de la prosodie affective.

La première étude psycholinguistique a abouti à la sélection d'un corpus de choix. Les stimuli sans prosodie affective ont été produits par un logiciel de synthèse de parole. Afin de parer à un problème d'intelligibilité, les phrases produites par ce logiciel correctement comprises ont été sélectionnées au cours de cette étude. Pour éviter les ambiguïtés lexico-syntaxique qui auraient pu masquer l'effet de la présence de prosodie affective, les phrases énoncées avec prosodie affective par les acteurs ont été sélectionnées sur la base d'un critère de classification correcte.

Enfin, au cours de l'étude psycholinguistique suivante, l'impact positif de la présence de prosodie affective a été mis en évidence sur la classification des phrases préalablement sélectionnées.

Les résultats de ces études ont donc permis la mise en place d'un paradigme de type emboîté mettant en évidence trois niveaux de traitement neural de la phrase affective.

Le premier niveau concernait le *traitement ortholinguistique*. Les bases neurales de ce type de traitement ont pu être explorées grâce à la tâche de classification grammaticale des phrases lexicalement neutres. En comparant les activations cérébrales aboutissant à la réalisation de cette tâche par rapport à une tâche de référence de bas niveau, l'ensemble du réseau de la compréhension des éléments ortholinguistiques au niveau de la phrase a pu être mis en évidence. La décomposition de ce réseau en fonction d'un découpage linguistique plus précis a été réalisée à partir de la méta-analyse de la littérature exposée au chapitre 1 (paragraphe IV.D, p72).

Pour explorer les *corrélats neuraux de la classification de phrases à contenu lexical affectif*, nous avons comparé les régions activées au cours de la classification affective de phrases à contenu lexical affectif (par rapport à la tâche de référence) aux régions impliquées lors de la classification grammaticale de phrases à contenu lexical neutre (par rapport à la tâche de référence). De plus, pour obtenir le réseau neural du traitement du contenu lexical affectif indépendamment de la présence de la prosodie affective, nous

avons cherché les aires corticales activées à la fois par les conditions où les sujets devaient classer les phrases lues par les acteurs et par les conditions au cours desquelles les sujets classaient les phrases produites par Kali.

Enfin, pour mettre en évidence les régions corticales impliquées par le *traitement de la prosodie affective* en présence d'un contenu lexical congruent, Les régions cérébrales activées par la classification affective de phrases énoncées par les acteurs (par rapport à la tâche de référence) ont été comparées aux régions cérébrales recrutées par la classification affective de phrases produites par Kali (par rapport à la tâche de référence).

1. MATERIEL ET METHODES

A. Sujets

a- Le groupe initialement inclus dans l'étude IRMf

28 sujets volontaires sains ont participé à cette étude dans le cadre de la loi Huriet. Ces sujets n'avaient pas participé aux études psycholinguistiques précédentes. Tous ont donné leur consentement écrit et éclairé après avoir été préalablement avertis des conditions expérimentales, et des contre-indications à l'inclusion dans un protocole d'IRMf (voir Annexe 1, p203). Cette étude a reçu un avis favorable du Comité Consultatif de Protection des Personnes pour la Recherche Biomédicale de Basse-Normandie (CCPRB n°99/36).

Ces sujets se répartissaient en deux groupes : 14 hommes et 14 femmes ($23,2 \pm 3$ ans, moyenne \pm déviation standard). Tous étaient droitiers (scores aux tests d'Edinburgh = 90 ± 13 , Oldfield, 1971) et tous poursuivaient des études supérieures (4 ± 2 années universitaires).

Tous les sujets avaient pour langue maternelle le Français, car des différences neurales ont déjà été mises en évidence entre sujets chinois et anglais lors du traitement de la prosodie émotionnelle (Gandour *et al.*, 2003). Ces auteurs ont montré que des sujets chinois dont la langue maternelle est dite tonale²⁸ présentaient des activations plus

²⁸ Pour les langues tonales (le thaï et le chinois), la variation de hauteur mélodique sur une syllabe particulière d'un mot a une valeur distinctive : elle permet d'opposer des signifiés différents. Ce rôle important de la prosodie dans le traitement lexical (voir introduction, paragraphe I.2.A.d- , p13) pourrait expliquer les différences de latéralisation observées entre sujets chinois et anglais.

importantes de l'hémisphère gauche pour la discrimination prosodique des émotions que des sujets anglais.

Aucun ne présentait de déficit auditif, de troubles neurologiques ou psychiatriques. Leurs images anatomiques pondérées en T_1 ne montraient pas d'anomalie.

b- Critères a posteriori de sélection des sujets au sein de ce groupe

Un de nos objectifs étant d'évaluer la latéralisation des processus prosodiques affectifs, l'inclusion de sujets présentant une *latéralisation hémisphérique typique* pour le langage était donc nécessaire. Chez les sujets droitiers la spécialisation hémisphérique gauche pour le langage est retrouvée chez 92 à 96% (Rasmussen et Milner, 1977). Cette représentation hémisphérique pour le langage est donc considérée comme typique.

En neurochirurgie, la spécialisation hémisphérique du langage est déterminée à partir du test de Wada. Ce test consiste à injecter une dose de narcoleptique dans les deux carotides. Rapidement après l'injection, le produit atteint l'hémisphère ipsilatéral à l'injection, et provoque un arrêt de l'activité cérébrale. Pour définir la spécialisation hémisphérique du langage, on demande donc aux sujets d'effectuer une tâche de langage au moment de l'injection. Le côté de l'injection qui induit un arrêt d'exécution de cette tâche est alors décrit comme le côté dominant pour le langage (Wada et Rasmussen, 1960).

Cependant, ce test invasif ne peut être effectué chez le sujet sain, mais il a été montré une corrélation entre les résultats obtenus au test de Wada avec l'un index de latéralisation hémisphérique calculé à partir d'images fonctionnelles (Hervé *et al*, sous presse).

Pour sélectionner les sujets présentant une latéralisation hémisphérique gauche pour le langage, une carte de contraste a été définie par sujet (voir Annexe 1, p206). Elle représentait les régions corticales significativement plus recrutées au cours d'une tâche de classification du sujet de phrases entendues à contenu lexical neutre qu'au cours d'une tâche de référence de bas niveau consistant à détecter des bips. Cette carte décrit donc des régions cérébrales engagées au cours d'une tâche langagière. Cinq sujets, présentant une latéralisation droite de ces régions impliquées dans le traitement du langage, ont donc été exclus. Il s'agit de trois hommes (PROS 04 - 07 -12) et deux femmes (PROS 16 - 15, Figure 28).

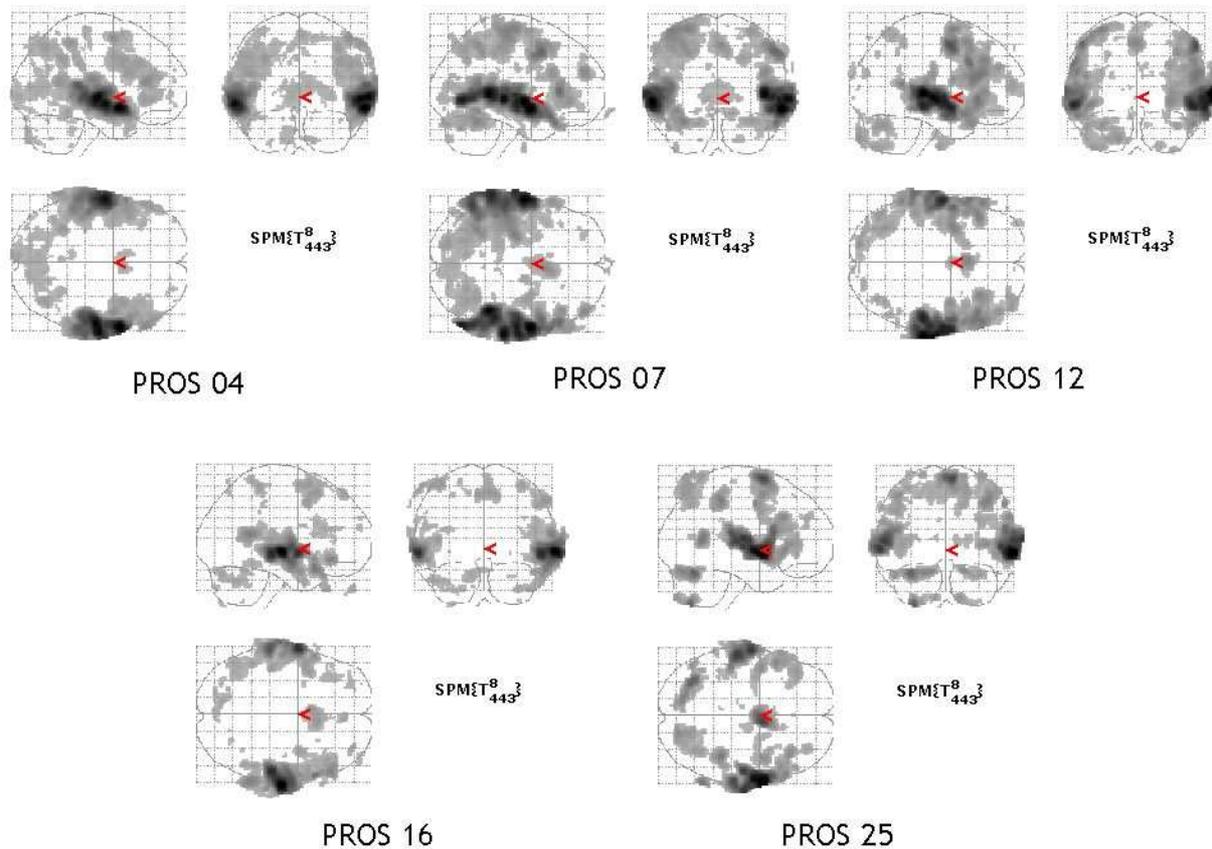


Figure 28. Carte de contrastes dans SPM lors de la tâche de classification grammaticale de phrases neutres produites par des acteurs chez les cinq sujets atypiques.

Les résultats des hommes sont présentés sur la ligne du haut: PROS 04 - 07 - 12, ceux des femmes sur la ligne du bas: PROS 16 - 25.

L'analyse des données a, au final, porté sur 23 sujets, 11 hommes et 12 femmes âgés de $23,3 \pm 3$ années, droitiers (Test d'Edinburgh = $88,7 \pm 13$).

B. Procédure expérimentale

a- Phase d'entraînement

Avant le début de l'expérience, les sujets écoutaient deux textes énoncés par la voix de synthèse afin de se *familiariser* avec celle-ci. Les sujets ont ensuite été entraînés aux différentes tâches de classification incluses dans ce protocole sur un ensemble de 30 phrases à contenu lexical affectif et de 15 phrases à contenu lexical neutre toutes produites par la voix de synthèse (voir discussion sur la familiarisation dans l'étude psycholinguistique II.6.A, p100).

b- Description des tâches expérimentales

Les stimuli étaient diffusés auditivement au moyen d'un casque. On demandait aux sujets de donner leur réponse en fonction de ce que les phrases leurs évoquaient personnellement. Les consignes expérimentales ne précisaient pas que les phrases énoncées avec les voix des acteurs contenaient de la prosodie affective par rapport à la voix générée par le logiciel de synthèse de parole Kali.

Les différentes conditions expérimentales étaient proches de celles proposées dans la dernière étude psycholinguistique. Si la tâche de classification grammaticale a été réalisée telle que dans cette étude, la tâche de classification affective a été séparée en tâche de classification émotionnelle et tâche de classification attitudinale afin de conserver la distinction linguistique des deux catégories affectives (voir paragraphe II.6.C, p 102). 79 % des phrases utilisées étaient identiques à avec les phrases de l'étude psycholinguistique sur l'impact de la prosodie affective dans la compréhension de phrases affectives (chapitre 2, paragraphe II, p86).

➤ La tâche de classification affective

La tâche de classification affective consistait à choisir parmi trois catégories affectives proposées celle qui était susceptible de correspondre à la phrase entendue (pour la sélection des catégories, voir paragraphe I.1.A.a- , p78).

Les phrases émotionnelles devaient être classées comme appartenant à la catégorie de la gaieté, de la tristesse, ou de la colère. Les phrases attitudinales pouvaient appartenir soit à la catégorie du doute, soit de l'évidence, soit de l'ironie.

Ces deux tâches de classification émotionnelle et attitudinale étaient effectuées séparément.

Elles ont chacune été effectuées une première fois sur des phrases produites par Kali, c'est-à-dire sans prosodie affective (AffKali), et une seconde fois avec des phrases différentes énoncées par des acteurs avec la prosodie affective adéquate (AffAct).

➤ La tâche de classification grammaticale

Les tâches de classification grammaticale consistaient à donner le sujet des phrases lexicalement neutre: 1^{ière}, 2^{ième} ou 3^{ième} personne. Cette tâche était réalisée quatre fois: deux fois avec des phrases produites par Kali (GrKali), deux fois avec les mêmes phrases mais énoncées par des acteurs (GrAct). Nous avons utilisé les mêmes phrases car l'étude psycholinguistique ne montrait pas d'effet répétition sur la classification grammaticale (voir paragraphe II.3.B, p92).

c- Ordre de passation

Les sujets effectuaient d'abord les conditions où les phrases étaient enregistrées par la voix de synthèse Kali, suivies par les conditions dont les phrases étaient énoncées par les acteurs. Nous avons préféré commencer par les conditions portant sur les phrases produites par Kali pour que nos sujets ne puissent pas « copier » la prosodie affective incluse dans les phrases énoncées par les acteurs, phénomène observé dans l'étude psycholinguistique (voir paragraphe II.6.B, p101). L'ordre de passation des conditions portant sur les phrases produites par Kali et des conditions portant sur les phrases lues par les acteurs suivait un ordre pseudo aléatoire. La classification attitudinale des phrases produites par Kali ne débutait jamais la passation, car cette condition était jugée la plus difficile (voir réponse au questionnaire post-expérimental de l'étude psycholinguistique sur l'impact de la prosodie affective, paragraphe II.5, p99).

d- Questionnaire post-expérimental

A la fin de l'expérience, les sujets ont répondu à un questionnaire post-expérimental. Nous leur avons tout d'abord posé des questions d'ordre général sur la faisabilité de la tâche. Les autres questions portaient sur les stratégies employées par le sujet : avaient-ils adopté une stratégie syntaxique (catégorisation à partir de la construction grammaticale des phrases), lexical (catégorisation reposant sur le sens des mots) ou une stratégie intonative (catégorisation à partir de la prosodie). Enfin, nous leur avons demandé s'ils avaient répétés mentalement les phrases.

C. Design expérimental et matériel

a- Paradigme emboîté

Ce protocole a été construit selon un paradigme emboîté (Posner *et al.*, 1987). Ce type de paradigme nécessitait la construction de tâches mettant en jeu une fonction cognitive supplémentaire par rapport à la tâche précédente.

La tâche de référence de bas niveau consistait à détecter des bips sonores. Elle faisait appel à la perception auditive, et mettait en jeu une réponse motrice.

La seconde tâche correspond à la classification grammaticale (GrAct, GrKali), qui outre ces deux fonctions cognitives de bas niveau faisait appel au traitement ortholinguistique (incluant la prosodie grammaticale).

La tâche de classification affective en l'absence de prosodie affective (AffKali) nécessitait le traitement ortholinguistique du matériel lexical affectif.

Enfin, la classification des phrases affectives contenant de la prosodie affective (AffAct) faisait appel, en plus, au traitement de l'élément paralinguistique présent dans nos stimuli : la prosodie affective.

La mesure de la variation de l'activité cérébrale entre ces différentes tâches permettait de mettre en évidence les bases neurales de ces différents niveaux de traitement cognitif (voir Annexe 1, p208).

b- Design de type bloc

Notre protocole était composé de huit runs d'une durée de 6 min 30 sec : quatre runs de classification affective (deux runs AffKali et deux runs AffAct), et quatre runs de classification grammaticale (deux runs GrKali, deux runs GrKali). Un run correspondait donc à une condition expérimentale.

Chaque run était composé d'une alternance de blocs de tâche d'intérêt et de blocs de tâche de référence de bas niveau. Donc chaque run débutait par un bloc de référence qui consistait à détecter 16 bips sonores, présentés à intervalle de temps aléatoire (entre 2 et 4 sec). Après chaque bip, les sujets devaient appuyer alternativement sur un des trois boutons du boîtier de réponse. Ce premier bloc était suivi par une alternance de cinq blocs de tâche de classification de 34 sec et de 5 blocs de référence de 32 sec (9 bips à détecter).

Pendant chaque bloc de classification, les sujets entendaient neuf phrases qui duraient en moyenne 3 sec (Figure 29). Le temps de réponses était limité à 1 sec. Les sujets répondaient sur le boîtier de réponse dont les trois touches correspondaient aux trois choix de réponses possibles par tâche -émotionnelle, attitudinale ou grammaticale. Les réponses ont été assignées à chaque bouton suivant un ordre alphabétique pour donner un moyen mnémotechnique aux sujets de les retenir. Par exemple pour la tâche de classification émotionnelle, la touche 1 correspondait à la Colère, 2 à la Gaieté, 3 à la Tristesse.

Ce boîtier de réponse était relié à un ordinateur équipé du logiciel SuperLab[™] Pro version 2.0 (CEDRUS, <http://www.superlab.com/papers>). Ce logiciel permettait de présenter les stimuli et d'enregistrer les réponses et les temps de réponses (limités à 1 sec) apportés à chacun des stimuli.

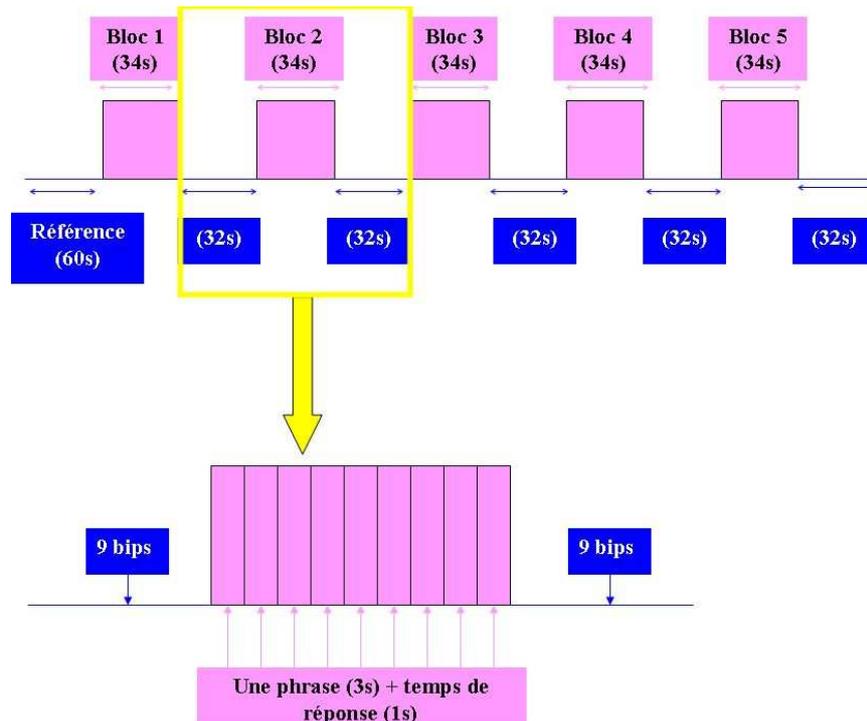


Figure 29. Schéma d'un run de 6 min 30 sec.

Il était composé de cinq blocs de 34 sec (en rose) alternant avec six tâches de référence de 32 sec chacune (en bleu, la première tâche de référence durait 60 sec, car au cours de l'analyse des images fonctionnelles les premières images ont été supprimées, voir Annexe 1, p206). Un bloc se découpait par tranche de 4 sec, intervalle de temps comprenant la présentation d'une phrase d'une durée de 3 sec et un temps de réponses de 1 sec environ.

D. Analyse des résultats comportementaux

Suite à des problèmes techniques, les données comportementales n'ont pu être enregistrées pour trois sujets masculins (PROS 00 - 01 - 02). Le nombre de sujets inclus dans les analyses des données comportementales a donc été ramené à 20 (8 hommes).

Deux variables comportementales ont été étudiées : le pourcentage de réponses correctes (RC) et le temps de réponses pour les réponses correctes (TR ms) pour chacun des huit runs et pour chaque sujet. Le test de normalité de Kolmogorov et Smirnov montre que les distributions des deux variables ne différaient pas de la distribution normale (RC pour GrAct et GrKali : $\chi^2 = 3,8$, $p = 0,3$, RC pour AffAct et AffKali : $\chi^2 = 1,7$, $p = 0,8$; TR pour GrAct et GrKali : $\chi^2 = 0,7$, $p > 0,99$, TR pour AffAct et AffKali $\chi^2 = 0,7$, $p > 0,99$).

Une analyse de la variance (ANOVA) à mesures répétées a été réalisée pour chacune de ces variables. Les deux facteurs de l'analyse étaient la Tâche (classification affective versus grammaticale) et la Voix (acteurs versus Kali).

Les indices des valeurs de F correspondaient pour le premier au nombre de facteur de l'ANOVA (2), et le second au nombre de sujets (20).

Des comparaisons post-tests ont été effectuées avec des tests de t non appariés et une correction de Bonferroni a été appliquée aux valeurs de p obtenues (pour plus de détail sur la méthode voir paragraphe II.2, p89).

E. Analyse statistiques des images fonctionnelles

L'acquisition et le prétraitement des images fonctionnelles sont présentés en Annexe 1 (ainsi que le principe de l'IRM, p191). L'analyse statistique des images fonctionnelles a été effectuée dans le logiciel semi-automatique SPM99 (statistical parametric mapping, Wellcome Department of Cognitive Neurology, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/).

a- Analyse du signal BOLD

➤ Analyse individuelle sur l'ensemble du cerveau

Dans un premier temps, une analyse individuelle a été réalisée. Pour chacun des 23 sujets, des cartes de contrastes de chacun des huit runs par rapport à sa tâche contrôle (détection de bips sonores) ont été calculées : chaque carte contient la variation du signal BOLD qui covarie avec la réalisation de la tâche de classification (émotionnelle, attitudinale ou grammaticale) comparée à la réalisation de la tâche de référence (détection de bips, voir Annexe 1, p206).

➤ Analyse de groupe sur l'ensemble du cerveau

Dans un deuxième temps, les cartes de contrastes individuelles de chacun des 23 sujets ont été utilisées pour une analyse de second niveau de type régression multiple sans terme constant. Quatre variables ont été définies :

- **GrKali** correspondant à la moyenne des 23 cartes de contrastes individuelles pour chacun des deux runs de tâche de classification **grammaticale** portant sur les phrases **neutres** produites par **Kali** (comparée à la détection de bips).
- **GrAct** correspondant à la moyenne des 23 cartes de contrastes individuelles pour chacun des deux runs de tâche de classification **grammaticale** portant sur les phrases **neutres** énoncées par les **acteurs** (comparée à la détection de bips).
- **AffKali** correspondant à la moyenne des 23 cartes de contrastes individuelles pour les tâches de classification **émotionnelle** et **attitudinale** portant sur les phrases **affectives** produites par **Kali** (comparées à la détection de bips). Ce moyennage a été calculé car aucune différence en terme d'activation n'a été mise en évidence

entre ces deux conditions au seuil 0,001 non corrigé pour les comparaisons multiples (voir Annexe 1, p209, pour une explication sur l'utilisation des seuils).

- **AffAct** correspondant à la moyenne des 23 images pour les tâches de classification **émotionnelle** et **attitudinale** portant sur les phrases **affectives** énoncées par les **acteurs** (comparées à la détection de bips). Comme pour AffKali, aucune différence significative d'activation n'a été mise en évidence entre ces deux conditions ($p \leq 0,001$ non corrigé pour les comparaisons multiples) permettant leur moyennage.

Ce protocole nous a permis de répondre aux questions suivantes :

- **Existe-t il un impact de la voix de synthèse sur les régions cérébrales impliquées lors de la tâche de classification grammaticale ?** Il fallait tout d'abord vérifier que l'utilisation de Kali pour produire les phrases utilisées dans ce protocole n'avait pas d'impact sur les réseaux neuraux mis en jeu lors de la classification grammaticale. Deux contrastes permettaient de comparer les régions recrutées par la classification grammaticale lorsqu'elle était effectuée sur les phrases neutres produites par Kali avec les régions activées par la classification grammaticale de phrases neutres énoncées par les acteurs (rappelons que ces phrases ne diffèrent ni par leur contenu lexico-syntaxique ni par leur contenu prosodique grammatical). Ces deux contrastes [**GrAct - GrKali**] et [**GrKali - GrAct**] ont été calculés et analysés d'abord au seuil de 0,05 corrigé pour les comparaisons multiples. Aucune différence n'étant mise en évidence à ce seuil corrigé, nous avons baissé la sensibilité de l'analyse en utilisant le seuil à 0,001 non corrigé, afin de s'assurer qu'aucune différence significative n'était mise en évidence²⁹.
- **Quel est le réseau de la classification des phrases neutres ?** Afin de connaître le réseau du traitement ortholinguistique de la phrase au cours de la classification grammaticale, une conjonction³⁰ des activations obtenues pour les différentes tâches de classification grammaticale comparées à la tâche de référence [**GrAct** \cap **GrKali**] a permis de mettre en évidence les régions activées à la fois lors de la classification grammaticale des phrases neutres énoncées par les acteurs (GrAct) et lors de la classification grammaticale des phrases neutres produites par Kali (GrKali). Ce contraste fournit les régions impliquées dans la classification de phrases lexicalement neutres indépendamment de la voix du locuteur. Le seuil

²⁹ Voir Annexe 1, p209 pour la définition des seuils statistiques et les corrections appliquées.

³⁰ Voir Annexe 1, p212, pour la définition de la conjonction.

statistique a été fixé à 0,0025 seuil corrigé pour les comparaisons multiples, car l'analyse de conjonction est très sensible (voir Annexe 1, p212).

- **Quel est le réseau de la classification des phrases affectives ?** Le contraste “classification affective moins grammaticale” obtenu lorsque les phrases ont été énoncées par les acteurs (AffAct - GrAct) et produites par Kali (AffKali - GrKali) permettait d'explorer les régions impliquées dans la classification de phrases affectives par rapport au réseau neural sous-tendant la classification de phrases neutres. Pour mettre en évidence un tel réseau indépendamment de la présence de prosodie affective, nous avons réalisé une conjonction de ces deux contrastes : la conjonction fournissait les régions communément plus activées dans les deux contrastes : $[(\text{AffAct} - \text{GrAct}) \cap (\text{AffKali} - \text{GrKali})]$ à 0,0025 seuil corrigé pour les comparaisons multiples (correspondant à un seuil corrigé pour les comparaisons multiples de 0,8 pour chaque contraste, voir Annexe 1, p212).
- **Quelles sont les régions impliquées dans le traitement de la prosodie affective ?** Le contraste $[\text{AffAct} - \text{AffKali}]$ a permis de mettre en évidence les aires cérébrales dédiées au traitement de la prosodie affective indépendamment du traitement ortholinguistique, en comparant la tâche de classification affective portant sur les phrases affectives énoncées par les acteurs, donc contenant de la prosodie affective, avec la même tâche réalisée sur des phrases affectives produites par Kali dépourvues de prosodie affective ($p \leq 0,001$ non corrigé pour les comparaisons multiples). Ce contraste a été masqué par le contraste AffAct de manière à exclure les régions présentant une différence de déactivation. En effet, dans un tel contraste direct des régions peuvent être différemment activées entre les deux conditions, tout en étant moins recrutées par rapport à la tâche de référence de détection de bip (voir Annexe 1, p210).

Ces résultats fournissaient l'ensemble des régions définies par un pic d'activité maximale (coordonnées stéréotaxiques) et leur taille en nombre de voxels (voir Annexe 1, p209). Nous les appellerons par la suite des **clusters fonctionnels**.

b- Analyse des variations du signal BOLD dans les clusters fonctionnels

Afin de mieux caractériser l'activité des régions issues des contrastes $[(\text{AffAct} - \text{GrAct}) \cap (\text{AffKali} - \text{GrKali})]$ et $[\text{AffAct} - \text{AffKali}]$, les variations de signal BOLD ont été

extraites pour chaque sujet (23 sujets) et pour chacune des conditions (GrKali, GrAct, AffKali, AffAct) au niveau des clusters fonctionnels présentant la variation d'activité dont la significativité était la plus élevée. Puis la moyenne des variations individuelles du signal BOLD dans chacune des quatre conditions (GrKali, GrAct, AffKali, AffAct) a été calculée pour chaque pic, avec sa déviation standard caractérisant la variabilité individuelle du signal dans chaque région. Les valeurs obtenues ont été reportées dans les différentes illustrations au moyen d'un histogramme en bâton, avec des barres d'erreur correspondant à une déviation standard au-dessus et une en-dessous de la valeur moyenne de ce signal (voir exemple Figure 32, p123).

Pour chacune des conditions, des tests de t univarié de Student ont été calculés pour évaluer si la variation moyenne du signal BOLD différait de zéro, le zéro correspondant à la valeur du signal BOLD dans la tâche de référence de détection de bips. Ceci nous a permis de préciser si les activations ou désactivations³¹ observées étaient significatives par rapport à la tâche contrôle.

c- Analyse des asymétries fonctionnelles

L'objectif de ce travail était de comprendre les bases neurales des fonctions ortho et paralinguistiques et de connaître leur latéralisation. Notamment, nous voulions connaître la latéralisation des régions impliquées dans le traitement de la prosodie affective. Si les études en neuropsychologie s'accordent sur une spécialisation hémisphérique droite dans les régions temporales pour le traitement de la prosodie affective (Ross, 1981), les études d'imagerie fonctionnelle ne l'ont pas directement étudié (Wildgruber *et al.*, 2002; Kotz *et al.*, 2003). Un calcul direct de la latéralisation des différents réseaux mis en évidence dans les différents contrastes cités plus haut a été effectué, afin de pouvoir discuter les résultats divergents de la littérature (paragraphe III.1.E.a- , p113).

➤ Analyse de groupe des asymétries fonctionnelles

Les asymétries hémisphériques des différents réseaux neuraux ont été calculées sur l'ensemble de l'encéphale.

Dans un premier temps, les cartes de contrastes individuelles ont subi une transformation symétrique suivant l'axe du plan inter-hémisphérique. Ces cartes dites

³¹ Les désactivations sont des diminutions du signal BOLD par rapport à la tâche de référence (voir Annexe 1, p210)

« flippées » représentaient à gauche les variations du signal BOLD de l'hémisphère droit, et inversement à droite les variations du signal BOLD de l'hémisphère gauche.

Ensuite, des cartes d'asymétries ont été calculées pour chaque contraste en soustrayant les cartes de contrastes individuelles flippées avec les cartes non flippées. La partie droite de ces cartes d'asymétries correspondait donc à la différence de la variation du signal BOLD droit moins gauche, et la partie gauche fournissait la différence gauche moins droite (voir Annexe 1, p213).

Une analyse de second niveau a alors été réalisée avec ces cartes d'asymétries individuelles avec le même schéma statistique que celui réalisé pour les cartes de contrastes : [GrAct \cap GrKali], [(AffAct - GrAct) \cap (AffKali - GrKali)], [AffAct - AffKali] (paragraphe III.1.E.a- , p113). Ces contrastes ont pour objectif de mettre en évidence les régions dont la différence d'activité entre les deux hémisphères est différente de zéro, donc plus importante dans un hémisphère que dans l'autre.

➤ Analyse des asymétries fonctionnelles par région d'intérêt

Nous avons calculé le contraste **AffAct** dans l'analyse portant sur les cartes de différences entre hémisphère droit et hémisphère gauche ($p \leq 0,001$, seuil non corrigé).

La carte résultante **AffAct** nous a permis de définir des régions d'intérêt qui présentaient une différence d'activité entre hémisphère droit et hémisphère gauche. Ensuite nous avons extrait les variations de signal BOLD individuelles pour les quatre conditions (GrKali, GrAct, AffKali, AffAct) uniquement dans les régions d'intérêt temporales, puisque ce sont ces régions qui sont discutées dans les études de neuroimagerie et de neuropsychologie sur la prosodie affective. L'objectif étant d'évaluer la latéralisation de ces régions temporales, l'extraction du signal BOLD a été réalisée sur les cartes de contrastes individuelles non-flippées (variation du signal BOLD dans un hémisphère) et flippées (variation du signal BOLD dans l'hémisphère controlatéral). La comparaison des activations droites et gauches directement dans les mêmes régions et dans toutes les conditions va nous permettre de définir la latéralisation des régions temporales et leurs spécificités en fonction des différentes tâches.

2. RESULTATS

A. Résultats comportementaux obtenus au cours des acquisitions IRMf

Une interaction Tâche * Voix a été mise en évidence pour le pourcentage de réponses correctes (RC, $F_{2,20} = 89,6$, $p < 0,0001$, Figure 30.A) et les temps de réponses pour les réponses correctes (TR, $F_{2,20} = 19,9$, $p = 0,0006$, Figure 30.B).

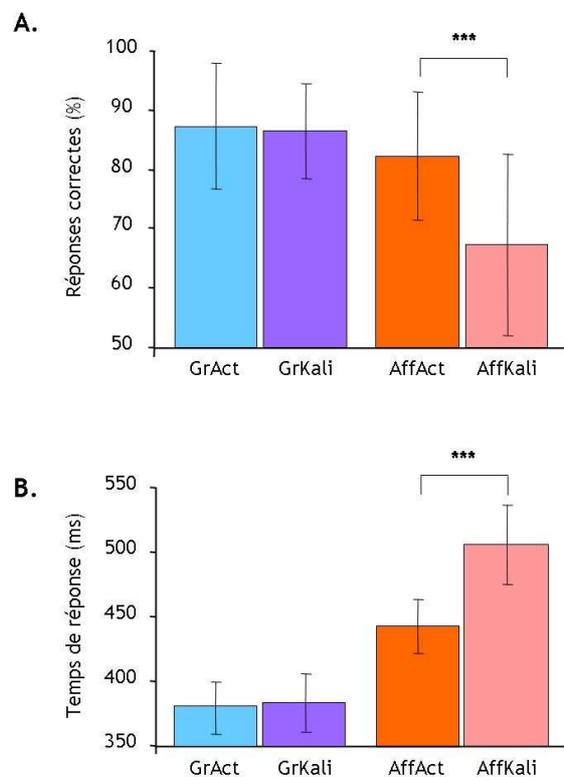


Figure 30. Résultats comportementaux

(A) Moyenne du pourcentage de réponses correctes et (B) moyenne du temps de réponses (ms, \pm déviation standard) pendant la tâche de classification affective de phrases lexicalement affectives énoncées par des acteurs (AffAct, orange) ou produites par Kali (AffKali, rose), pendant la tâche de classification grammaticale de phrases lexicalement neutres énoncées par les acteurs (GrAct, bleu) ou produites par Kali (GrKali, violet, *** correspond à $p < 0,001$).

Des **post-tests** ont montré que l'interaction provenait d'une meilleure réussite et d'un temps plus court pour la réalisation de la classification affective des phrases à contenu lexical affectif quand elles étaient énoncées par des acteurs avec une prosodie affective appropriée (AffAct) que lorsqu'elles étaient produites par Kali qui était dépourvu de prosodie affective (AffKali) (RC: AffAct = $84\% \pm 9$, AffKali = $69\% \pm 9$, t-test apparié $t_{20} = -7,9$, $p < 0,0001$; TR: AffAct = $447 \text{ ms} \pm 71$, AffKali = $510 \text{ ms} \pm 66$, $t_{20} = 5,3$, $p < 0,0001$).

Ces effets n'ont pas été retrouvés dans la **tâche de classification grammaticale**. En effet, il n'existait pas de différence significative ni en terme de pourcentage de réponses correctes (RC: GrAct = 87% ± 8, GrKali = 86% ± 6, $t_{20} = -0,9$, $p = 0,36$), ni en terme de temps de réponses (TR: GrAct = 385 ms ± 82, GrKali = 384 ms ± 89, $t_{20} = 0,4$, $p = 0,7$) entre la classification grammaticale des phrases enregistrées par les acteurs (GrAct) et celles produites par Kali (GrKali).

On note que les deux effets principaux étaient significatifs. L'effet principal Tâche montrait que la tâche de classification grammaticale était mieux réussie que la tâche de classification affective (RC: $F_{2,20} = 43,7$, $p < 0,0001$; TR: $F_{2,20} = 50,4$, $p < 0,0001$). L'effet principal Voix montrait que les tâches étaient plus faciles et plus rapidement réussies avec les phrases enregistrées par les acteurs qu'avec les phrases produites par Kali (RC: $F_{2,20} = 31,7$, $p < 0,0001$; TR: $F_{2,20} = 12,9$, $p = 0,002$).

L'analyse du **questionnaire post-expérimental** des 23 sujets (incluant les sujets sans données comportementales) montrait une grande cohérence avec les résultats comportementaux. Les sujets trouvaient la tâche de classification grammaticale plus facile à réaliser. Cependant, la tâche de classification affective était facilitée quand les phrases étaient énoncées avec de la prosodie, c'est-à-dire énoncées par les acteurs. Pendant la tâche de classification affective, tous les sujets rapportaient avoir principalement utilisé des stratégies basées surtout sur l'intonation pour les phrases lues par les acteurs et seulement sur le contenu lexical pour les phrases dépourvues de prosodie affective, c'est-à-dire celles produites par Kali. Néanmoins, même en présence de prosodie affective, 18 sujets sur 23 (78%) avaient utilisé, en plus de l'intonation, le sens des mots pour classer les phrases affectives énoncées par les acteurs.

Par ailleurs, 11 sujets sur 23 (48%) avaient répété mentalement les phrases pour confirmer leur réponse à la tâche de classification affective quel que soit le locuteur.

Nous n'avons pas observé de différences entre hommes et femmes dans leurs réponses à ce questionnaire.

B. Résultats fonctionnels

a- Classification grammaticale des phrases neutres

Les comparaisons [GrKali - GrAct] et [GrAct - GrKali] n'ont montré aucun impact de la voix de synthèse de parole ni de la voix des acteurs sur le réseau cérébral impliqué dans

la classification grammaticale, même en baissant le seuil à 0,001 non corrigé pour les comparaisons multiples.

L'analyse de conjonction des tâches de classification grammaticale réalisée sur les phrases prononcées par les acteurs et Kali [GrAct \cap GrKali] a révélé des activations massives à gauche dans les lobes frontal, temporal et pariétal (Figure 31, Table 9). Le lobe temporal gauche présentait des activations au niveau du sillon (STS) et du gyrus (T1) temporal supérieur qui s'étendaient vers le gyrus de Heschl, le *planum temporale* ainsi que vers la partie postérieure du gyrus temporal moyen. Dans le lobe frontal, le gyrus frontal inférieur (F3), le gyrus précentral, et l'aire motrice supplémentaire (AMS) étaient activés. Ce réseau incluait également le lobe pariétal, allant du gyrus postcentral au gyrus pariétal supérieur. Le putamen, les thalami et le cortex cérébelleux présentaient aussi une augmentation du signal BOLD.

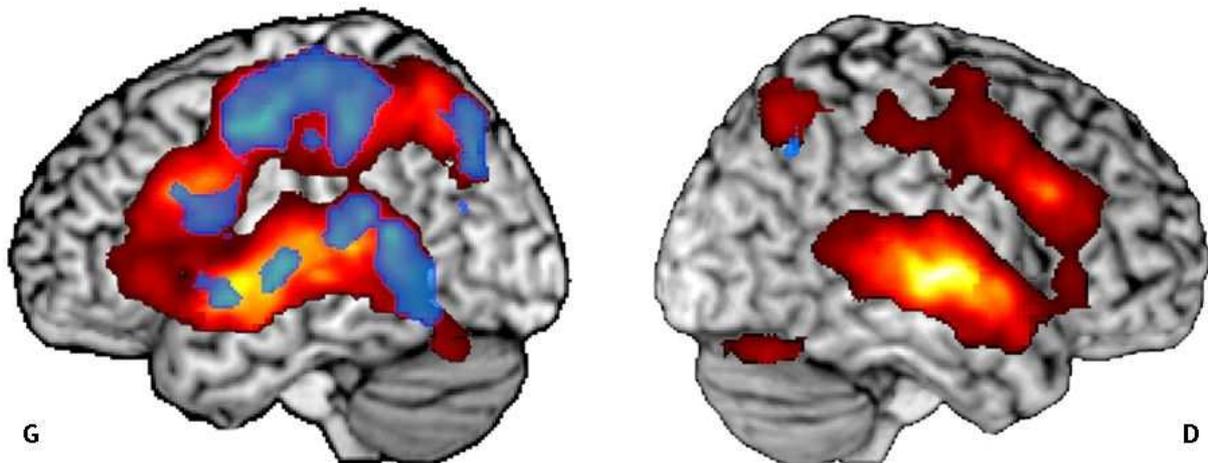


Figure 31. Réseau cortical engagé au cours de la classification grammaticale des phrases à contenu lexical neutre quel que soit le locuteur

Les régions corticales activées significativement pendant la tâche de classification grammaticale des phrases neutres produites par Kali ou prononcées par les acteurs comparativement à la tâche de détection de bips sont projetées sur l'hémisphère gauche (G) et droit (D) du cerveau de référence du Montreal Neurological Institute (MNI) (analyse de conjonction présentée à 0,0025 seuil corrigé pour les comparaisons multiples). L'échelle rouge/jaune représente la variation du signal BOLD, l'échelle bleu/vert correspond aux asymétries significatives du signal BOLD dans chaque hémisphère.

Table 9. Régions corticales impliquées pendant la classification grammaticale de phrases neutres

Localisation anatomique	N voxels	x	y	z	Valeur Z	p corrigé
Hémisphère droit						
T1	12 316	64	-14	0	∞	< 0,001
T2		70	-32	12	∞	< 0,001
T3		44	-68	-28	∞	< 0,001
gyrus précentral		52	20	28	∞	< 0,001
F3 tri		58	32	20	∞	< 0,001
insula antérieure		38	30	-2	7,20	< 0,001
gyrus pariétal supérieur		34	-64	50	∞	< 0,001
gyrus postcentral		48	-28	42	7,82	< 0,001
Calcarine		12	-68	4	∞	< 0,001
Putamen		22	4	10	∞	< 0,001
cortex cérébelleux*		30	-64	-26	∞	< 0,001
Hémisphère gauche						
gyrus précentral	28,192	-66	-12	4	∞	< 0,001
gyrus précentral*		-44	12	28	∞	< 0,001
gyrus précentral*		-54	-8	50	∞	< 0,001
F3 tri		-48	-24	10	∞	< 0,001
F3 tri*		-58	18	16	∞	< 0,001
AMS		-2	0	64	∞	< 0,001
gyrus cingulaire		10	14	48	∞	< 0,001
insula antérieure		-34	28	0	∞	< 0,001
T1*		-52	-16	2	∞	< 0,001
T1*		-60	-50	14	∞	< 0,001
gyrus Heschl		-40	-32	14	∞	< 0,001
T2		-64	-26	0	∞	< 0,001
T3		-48	-60	-16	∞	< 0,001
gyrus postcentral*		-46	-38	50	∞	< 0,001
gyrus pariétal supérieur		-30	-62	46	∞	< 0,001
Precuneus		20	-74	-24	∞	< 0,001
Putamen*		-22	6	8	∞	< 0,001
Calcarine		-8	-86	-2	∞	< 0,001
Thalamus		-12	-16	8	∞	< 0,001
cortex cérébelleux		-30	-64	-26	∞	< 0,001

Coordonnées stéréotaxiques (en mm) des clusters significatifs provenant de la conjonction de la classification grammaticale des phrases prononcées par les acteurs et produites par Kali. Les régions qui présentent une plus grande variation BOLD que leur homologue controlatéral sont identifiées par * (pour les 2 analyses $p \leq 0,0025$ corrigé pour les comparaisons multiples). AMS : aire motrice supplémentaire ; F3 : gyrus frontal inférieur ; GT : gyrus temporal, S : supérieur, M : moyen, I : inférieur ; tri : pars triangularis.

Bien que l'analyse BOLD ait mis en évidence des activations en miroir dans l'hémisphère droit, la comparaison directe entre activations droites et gauches (à partir des cartes de contrastes asymétriques) a montré une latéralisation significative en faveur de la gauche dans les régions activées, excepté dans le cervelet dont les activations présentaient une asymétrie droite.

b- Substrats neuraux de la classification des phrases affectives

Les clusters présentant une plus grande activité pendant la classification affective que lors de la classification grammaticale pouvaient être scindés en deux groupes selon le profil de leur variation de signal BOLD calculé comme la moyenne des 23 valeurs individuelles de BOLD pendant chaque condition aux pics présentant une différence significative d'activité (Table 10, Figure 32, pour méthode voir p113).

Le 1^{er} groupe de régions était composé de la partie antérieure et inférieure de F3 bilatéral, de la partie antérieure de l'insula, de pré-AMS ($y > 26$ mm), de régions sous corticales (thalamus gauche, noyau caudé droit) et du cervelet droit. Ces régions étaient recrutées par la tâche de classification grammaticale mais la variation du signal BOLD était plus importante pendant la classification affective de phrases à contenu verbal affectif.

Le 2^{ème} groupe de régions localisées dans la partie médiale du gyrus frontal supérieur (MF1) et dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur gauche (pSTS) étaient activées pendant la tâche de classification affective et présentaient une variation du signal BOLD négative pendant la tâche de classification grammaticale.

La comparaison des activations droites et gauches dans le contraste [(AffAct - GrAct) \cap (AffKali - GrKali)] par l'approche cerveau entier (avec les cartes de contrastes asymétriques) a mis en évidence une asymétrie gauche significative dans la *pars triangularis / orbitaris* de F3 et de pSTS.

La comparaison inverse (classification grammaticale versus affective) ne présentait aucune différence significative au seuil de 0,001 non corrigé pour les comparaisons multiples.

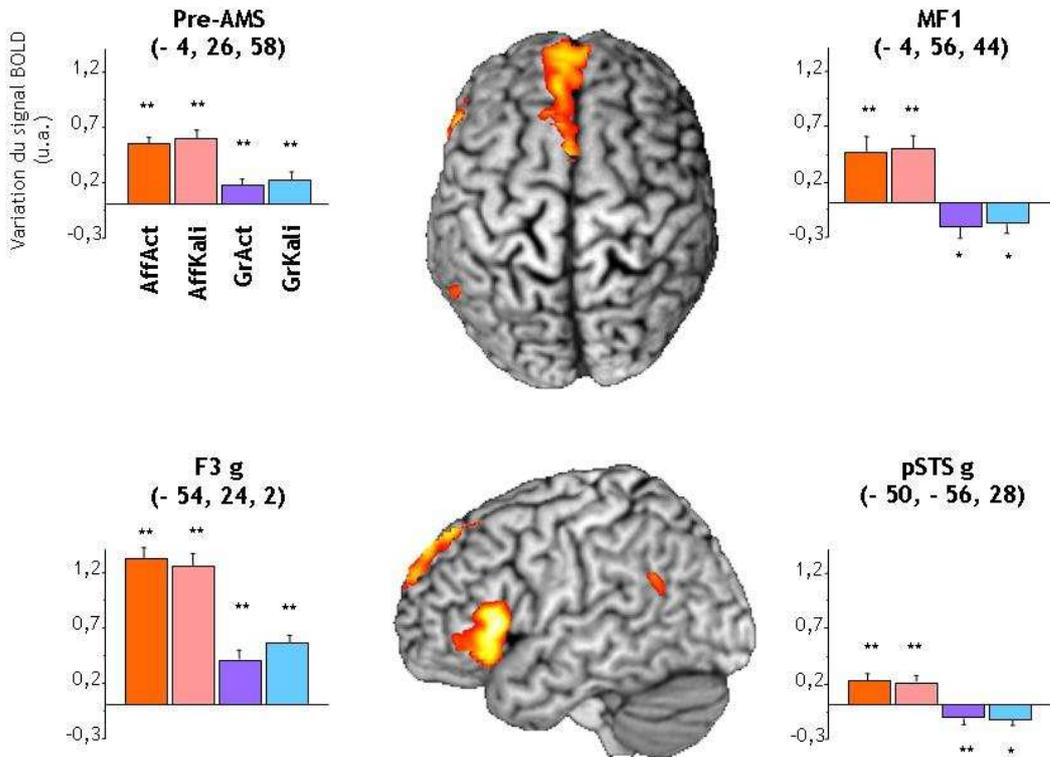


Figure 32. Les régions cérébrales plus activées lors de la classification affective que grammaticale

L'analyse de conjonction du contraste "classification affective moins grammaticale" pour les phrases prononcées par les acteurs (respectivement AffAct et GrAct) avec le même contraste pour les phrases produites par Kali (AffKali, GrKali) a été superposée sur le patron MNI ($p \leq 0,0025$ corrigé pour les comparaisons multiples). Les régions mises en évidence par cette conjonction qui présentait donc une activité BOLD plus importante lorsque les phrases avaient un contenu verbal affectif avec ou sans prosodie affective que lorsque les phrases étaient neutres (classification grammaticale) ont été localisées dans la région prémotrice supplémentaire (pre-AMS), la surface médiale du gyrus frontal supérieur (MF1), le gyrus frontal inférieur gauche (F3g), et la partie postérieure du sillon temporal supérieur (pSTSg). Les graphiques représentent la moyenne de la variation du signal BOLD au pic, présentant une différence significative d'activité, pendant chaque condition comparée à la tâche de référence de détection de bips (les barres d'erreur correspondent à l'erreur standard à la moyenne, les coordonnées stéréotaxiques des pics sont données en mm, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ correspondent aux résultats d'un test de t à zéro pour comparer la variation du signal BOLD pendant chaque condition avec la détection de bips; u.a.: unité arbitraire; AffAct: orange; AffKali: rose; GrAct: bleu; GrKali: violet).

Table 10. Régions présentant plus d'activation pendant la tâche de classification affective en présence ou non de prosodie affective que pendant la tâche de classification grammaticale

Localisation anatomique	N voxels	x	y	z	Valeur Z	p corrigé
Lobe frontal						
F3 tri G*	777	-54	24	2	∞	< 0,001
F3 orb G*		-46	42	-2	6,28	< 0,001
insula antérieure G	59	-30	28	0	6,40	< 0,001
MF1 G	1 270	-4	56	44	∞	< 0,001
MF1 G		-6	44	52	7,72	< 0,001
MF1 G		-4	60	28	7,71	< 0,001
F3 tri D	66	58	26	-2	6,79	< 0,001
Lobe temporal						
pSTS G*	108	-50	-56	28	6,74	< 0,001
Régions sous corticales et cervelet						
thalamus G	253	-4	-10	10	6,85	< 0,001
noyau caudé D*	79	12	4	12	6,51	< 0,001
cortex cérébelleux D	111	26	-78	-28	∞	< 0,001
cortex cérébelleux D		12	-82	-26	7,06	< 0,001
vermis G	105	-4	-60	-36	7,05	< 0,001
vermis D		4	-60	-34	6,78	< 0,001
cortex cérébelleux G	26	-6	-82	-22	6,44	< 0,001

Les coordonnées stéréotaxiques sont données en mm pour les clusters significatifs activés dans la conjonction des contrastes classification affective moins grammaticale pour les phrases prononcées par les acteurs et produites par Kali ($p \leq 0,0025$ corrigé pour les comparaisons multiples). * = régions qui présentent une plus grande activité BOLD que leur homologue controlatéral ($p \leq 0,05$ corrigé). F3 : gyrus frontal inférieur, MF1 : partie médiale du gyrus frontal supérieur, orb : pars orbitaris, pSTS : partie postérieure du sillon temporal supérieur.

c- Réseau neural de la classification de la prosodie affective

Les régions impliquées dans le traitement de la prosodie affective ont été mises en évidence en calculant la différence de signal BOLD pendant la tâche de classification affective des phrases lues par les acteurs avec prosodie affective et la même tâche sur les phrases produites par Kali et dépourvues de prosodie affective [AffAct - AffKali].

La partie antérieure de STS droit (aSTS) était plus activée lors de la classification affective des phrases énoncées par les acteurs que lors de la même tâche effectuée sur les phrases produites par Kali (cluster passant le seuil corrigé 0,05, Figure 33). Cette activation temporelle s'étendait à la partie antérieure de T1 de manière bilatérale, incluant les gyri de Heschl et la partie postérieure de T1 (pT1). L'amygdale bilatérale, le putamen, les gyri hippocampaux présentaient également une plus grande activation en présence de prosodie affective, de même que dans les régions motrices telles les gyri précentraux bilatéraux et l'AMS droite (Table 11).

Table 11. Régions impliquées dans la classification de prosodie affective

Localisation anatomique	N voxels	x	y	z	Valeur Z	p nc
aSTS D	552	56	-2	-12	4,98	< 0,001
T1 / STS D		60	4	-4	3,82	< 0,001
gyrus Heschl D		54	-12	4	3,65	< 0,001
amygdale D	292	30	-2	-12	4,60	< 0,001
hippocampe D		32	-14	-2	3,77	< 0,001
putamen D		26	4	-2	3,64	< 0,001
pSTS D	268	68	-44	8	4,32	< 0,001
STS D		70	-44	16	3,91	< 0,001
STS D		60	-46	4	3,74	< 0,001
AMS D	89	6	-22	66	3,99	< 0,001
gyrus postcentral G	136	-62	-10	42	3,98	< 0,001
putamen/amygdale G	59	-28	-4	-12	3,86	< 0,001
sillon central D	82	54	-8	34	3,85	< 0,001
insula moyenne G	148	-44	2	0	3,83	< 0,001
T1 G		-56	2	0	3,68	< 0,001
sillon central G		-56	-8	30	3,60	< 0,001
insula postérieure G	122	-42	-14	10	3,77	< 0,001
gyrus Heschl G		-36	-22	4	3,57	< 0,001
putamen G		-30	-14	4	3,29	0,001
insula postérieure D	37	38	-20	18	3,74	< 0,001

Coordonnées stéréotaxiques des clusters obtenus par le contraste classification affective en présence de prosodie affective (phrases énoncées par les acteurs) moins classification affective en l'absence de prosodie affective (phrases produites par Kali, $p \leq 0,001$ non corrigé (nc) pour les comparaisons multiples). AMS : aire motrice supplémentaire, T1 : gyrus temporal supérieur, STS : sillon temporal supérieur, a : partie antérieure, p : partie postérieure.

L'analyse de la valeur moyenne du signal BOLD, calculée pour chacune des quatre conditions aux pics présentant une différence significative d'activité, montrait que ces régions présentaient un profil d'activation différent. aSTS et pT1 droit étaient activés pendant la tâche de classification grammaticale et les clusters présentaient une augmentation d'activité en présence d'un contenu lexical affectif, d'autant plus importante lorsque ce contenu était accompagné de la prosodie affective appropriée (Figure 33).

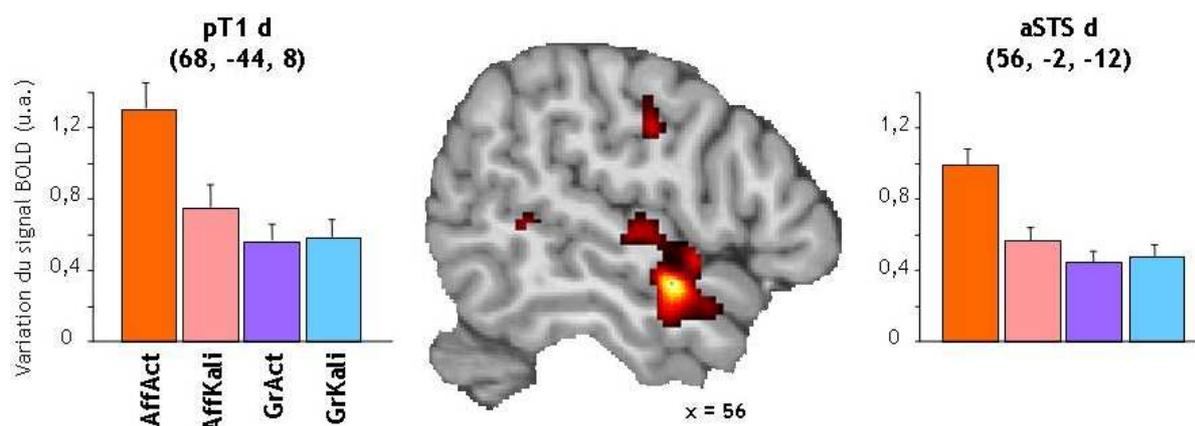


Figure 33. Les régions temporales droites et la prosodie affective

La partie antérieure du sillon temporal supérieur droit (aSTS d) et la partie postérieure du gyrus temporal supérieur droit (pT1 d) qui sont plus activées pendant la classification affective en présence de prosodie affective (phrases lues par les acteurs) que pendant la même tâche en l'absence de prosodie affective (phrases produites par Kali) sont superposées sur une coupe sagittale du cerveau de référence MNI ($x = 56$, $p \leq 0,001$ non corrigé). Les graphiques donnent la moyenne de la variation du signal BOLD durant chaque condition comparée à la tâche de référence de détection de bips aux pics présentant une différence significative d'activité (les barres d'erreur correspondent à l'erreur standard à la moyenne, les coordonnées stéréotaxiques des pics sont données en mm; u.a. : unité arbitraire; AffAct: orange; AffKali: rose; GrAct: bleu; GrKali: violet).

Des tests de t de Student univariés ont permis de vérifier que la variation du signal BOLD par condition pour les gyri précentraux, le gyrus de Heschl à gauche, ainsi que les amygdales, était différente de zéro (Table 12). Une variation de signal BOLD différente de zéro signifie que le signal était significativement plus important au cours de la tâche d'intérêt qu'au cours de la tâche de référence.

Table 12. Résultats des tests de t univariés sur les variations du signal BOLD dans les amygdales, le gyrus de Heschl et les gyri précentraux.

Conditions	AffAct		AffKali		GrAct		GrKali	
	t_{23}	p	t_{23}	p	t_{23}	p	t_{23}	p
Amygdale d	2,5	0,02	-2,3	0,03	3,2	0,004	1	0,3
Amygdale g	4	0,0006	-0,6	0,5	3,5	0,002	2,2	0,04
Heschl g	4,2	0,0004	-0,1	0,9	3,7	0,001	2,7	0,01
Précentral d	3,1	0,005	-1,5	0,1	3,7	0,001	3,3	0,003
Précentral g	6	<0,0001	1,1	0,3	5,4	<0,0001	4,8	<0,0001

Les tests de t à un groupe permettent d'évaluer si la variation du signal BOLD aux pics localisés dans les amygdales, le gyrus de Heschl, et les gyri précentraux droit et gauche au cours de chacune des quatre conditions (classification affective portant sur les phrases lues par les acteurs (AffAct), classification affective portant sur les phrases produites par Kali, classification grammaticale des phrases neutres énoncées par les acteurs (GrAct, et classification grammaticale des phrases neutres enregistrées par Kali : GrKali). Ce tableau fournit les valeurs de t ($N = 23$ sujets), et les valeurs de p correspondantes (d : droit ; g : gauche).

Ces cinq régions étaient recrutées au cours de la classification des phrases énoncées par les acteurs. Par contre, la variation de signal BOLD au cours de la classification de phrases produites par Kali était nulle dans toutes les régions sauf dans l'amygdale droite qui présentait une variation du signal BOLD négative (Figure 34).

Notez que toutes ces régions étaient déjà recrutées au cours de la classification grammaticale quelle que soit la voix qui produisait les phrases (Table 12). Ce niveau d'activation était équivalent à celui atteint lors de la classification affective des phrases énoncées par les acteurs (Figure 34).

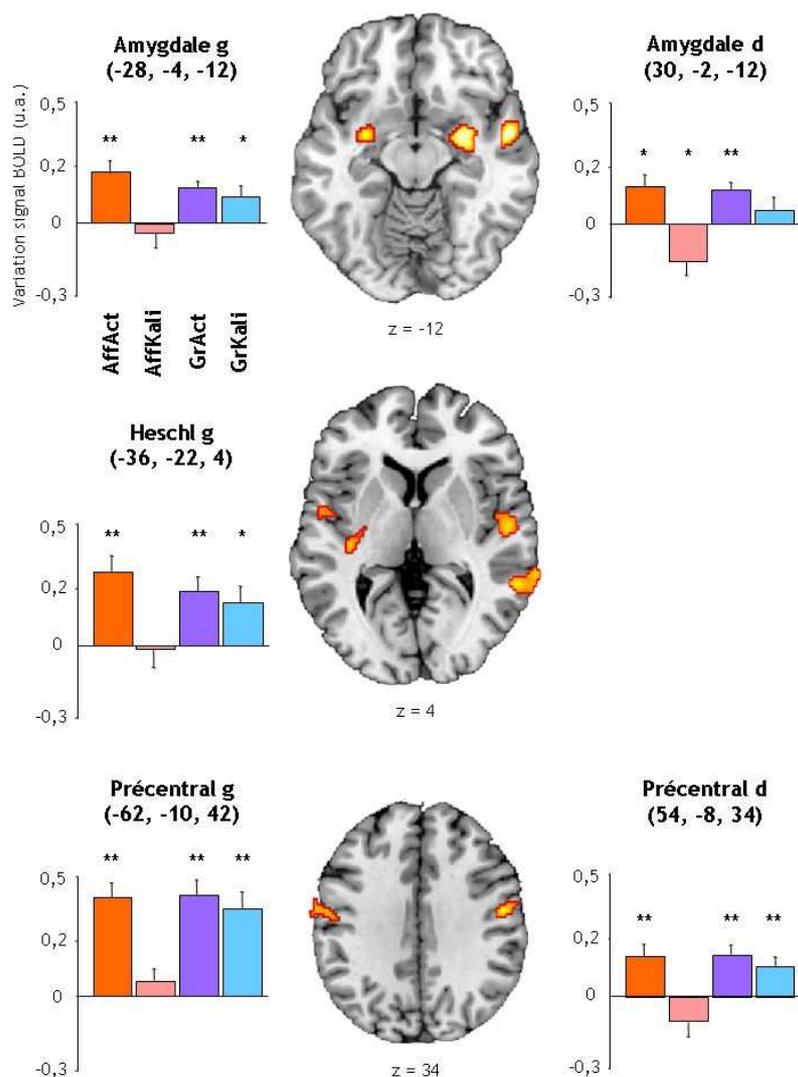


Figure 34. Régions corticales qui présentent une diminution d'activité lorsque les phrases à contenu lexical affectif sont dépourvues de prosodie affective

Les clusters dans l'amygdale bilatérale, le gyrus de Heschl à gauche et les gyri précentraux bilatéraux obtenus au cours du contraste classification affective avec prosodie affective versus classification affective sans prosodie affective sont présentés sur des coupes axiales du cerveau MNI. Les représentations graphiques fournissent la valeur moyenne de la variation du signal BOLD durant la tâche de classification affective comparée à la tâche de référence de détection de bips aux pics présentant une différence significative d'activité (les barres d'erreur correspondent à l'erreur standard à la moyenne, les coordonnées stéréotaxiques des pics sont données en mm; * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ correspondent aux résultats d'un test de t à zéro pour comparer la variation du signal BOLD pendant chaque condition avec la détection de bips; u.a.: unité arbitraire; AffAct: orange; AffKali: rose; GrAct: bleu; GrKali: violet).

Le contraste (AffAct - AffKali) a donc permis de mettre en évidence des régions plus activées au cours de la classification affective des phrases énoncées par les acteurs qu'au

cours de la classification des phrases produites par Kali. Puisque nous avons masqué ce contraste par AffAct, les régions mises en évidence présentaient bien une activation plus importante au cours de la classification affective des phrases énoncées par les acteurs qu'au cours de la tâche de référence de détection de bips (voir Annexe 1, p210). Par contre, il n'y avait pas de contrainte statistique sur la variation du signal BOLD au cours de la classification des phrases produites par Kali. En effet, comme nous venons de le voir, l'activité des régions au cours de la classification des phrases produites par Kali pouvait être plus importante qu'au cours de la tâche de référence comme c'est le cas pour les régions aSTS et pT1. Mais cette activité pouvait être soit moins importante (déactivation) au cours de la tâche de référence comme dans l'amygdale droite, soit équivalente comme pour l'amygdale gauche.

De même, l'activité de ces régions au cours de la tâche grammaticale n'était pas évaluée statistiquement par ce contraste (AffAct - AffKali). Ainsi, des régions, comme l'amygdale, qui présentaient une activité équivalente au cours de la classification grammaticale et la classification affective des phrases lues par les acteurs ont été observées.

d- Asymétrie des activations des aires temporelles recrutées par la prosodie affective

Comme précisé dans l'introduction, la question majeure soulevée par la neuropsychologie et la littérature de neuroimagerie concerne la dominance droite des aires temporelles dans le traitement prosodique. A partir de cette hypothèse *a priori*, des asymétries significatives ont été recherchées dans le contraste tâche de classification affective des phrases énoncées avec prosodie congruente (acteurs) comparée à la tâche de référence de détection de bips, afin de définir des régions d'intérêt fonctionnelle (AffAct, Figure 35). Cette carte d'asymétries montre une asymétrie gauche prévalente au sein du lobe frontal dans sa partie inférieure, ainsi que dans le lobe pariétal. Le lobe temporal, dans sa partie haute et sa partie postérieure, est également plus activé dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit sauf au niveau de la partie antérieure et postérieure de STS. Ces deux régions, qui présentaient une activation droite plus importante dans l'hémisphère droit au cours de la tâche de classification affective des phrases énoncées par les acteurs, définissaient deux régions d'intérêt fonctionnelles.

Pour explorer plus avant la latéralisation de la partie antérieure et postérieure de STS, nous avons calculé pour chaque sujet la variation du signal BOLD dans ces clusters à

droite (sur les cartes de contrastes) et à gauche (sur les cartes de contrastes flippées) et pour chaque condition.

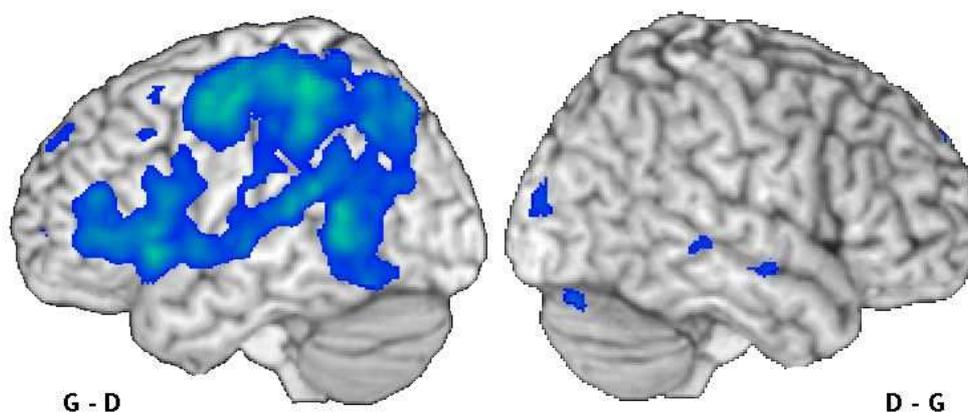


Figure 35. Carte d'asymétries obtenues pour la classification affective des phrases énoncées par les acteurs.

Les différences significatives entre activation droite et activation gauche sont projetées sur la surface de l'hémisphère droit du cerveau de référence MNI (à droite). Les différences significatives entre activation gauche versus activation droite sont projetées sur l'hémisphère gauche de MNI (à gauche sur l'illustration, $p \leq 0,001$ non corrigé).

Une ANOVA à mesures répétées a été appliquée aux valeurs du signal BOLD dans ces clusters incluant deux facteurs: le facteur Côté (hémisphère droit versus gauche) et le facteur Voix (Kali versus acteurs). Durant la classification affective, une interaction significative entre Côté et Voix - l'effet Voix correspondant à la présence de prosodie affective - a été observée (Figure 36; partie antérieure de STS : $F_{2,23} = 5,6$, $p < 0,05$; partie postérieure de STS : $F_{2,23} = 8,4$, $p < 0,01$). Cette interaction découlait d'une augmentation plus importante de la variation du signal BOLD dans la région droite par rapport à la région gauche, en présence de prosodie affective. Un effet principal Côté a été observé, confirmant une implication plus importante des régions temporales droites pendant la tâche de classification affective qu'il y ait ou non présence de la prosodie affective (partie antérieure de STS : $F_{2,23} = 4,7$, $p < 0,05$; partie postérieure de STS : $F_{2,23} = 6,1$, $p < 0,05$). Un effet principal de la prosodie affective (facteur Voix) était également significatif. Il montrait que les régions temporales étaient plus impliquées lorsque les phrases incluaient une prosodie affective congruente (énoncées par les acteurs) que lorsqu'elles en sont dépourvues (produites par Kali, partie antérieure de STS : $F_{2,23} = 39,7$, $p < 0,0001$; partie postérieure de STS : $F_{2,23} = 72,8$, $p < 0,0001$).

Durant la classification grammaticale, les deux facteurs n'interagissaient pas (partie antérieure de STS : $F_{2,23} = 0,5$, $p > 0,05$; partie postérieure de STS : $F_{2,23} = 2,1$, $p > 0,05$) et aucun effet Côté (partie antérieure de STS : $F_{2,23} = 0,7$, $p > 0,05$; partie

postérieure de STS : $F_{2,23} = 2,1$, $p > 0,05$) ni locuteur (partie antérieure de STS : $F_{2,23} = 0,8$, $p > 0,05$; partie postérieure de STS : $F_{2,23} = 0,8$, $p > 0,05$) n'a été observé.

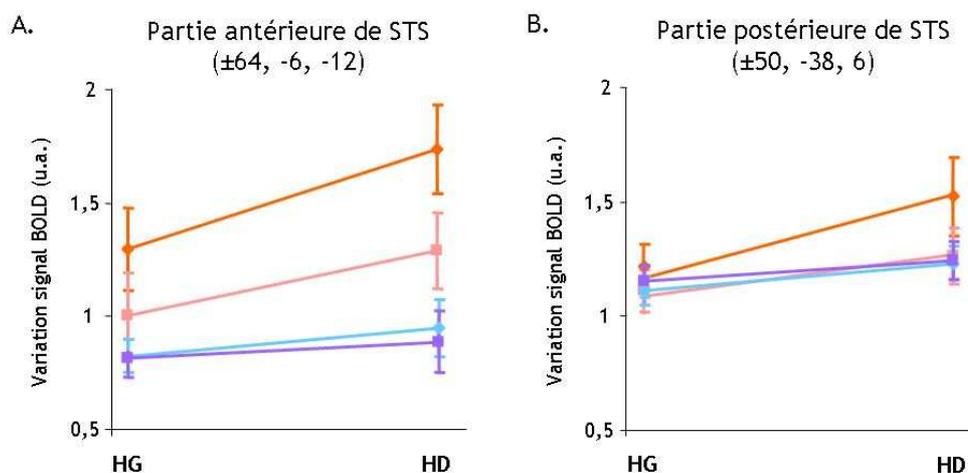


Figure 36. Latéralisation des régions temporales dans le traitement prosodique affectif

Variation du signal BOLD pendant les 4 conditions dans les clusters présentant une asymétrie droite significative pendant la tâche de classification affective des phrases énoncées par les acteurs au niveau A. de la partie antérieure du sillon temporal supérieur (STS) et B. de la partie postérieure du sillon temporal supérieur (—◆— AffAct, —■— AffKali, —●— GrAct, —■— GrKali; HG : hémisphère gauche; HD : hémisphère droit).

Les clusters détectés dans la partie antérieure ($x = 50$, $y = -38$) et postérieure ($x = 68$, $y = -44$, $z = 8$) du sillon temporal supérieur par les cartes statistiques d'asymétries sont très proches respectivement de aSTS ($x = 56$, $y = -2$, $z = -12$) et de pT1 ($x = 64$, $y = -6$, $z = -12$) obtenus avec la carte statistique fonctionnelle 'AffAct - AffKali'. De plus, leurs profils d'activation sont similaires pour les quatre tâches (Figure 33, Figure 36) : elles présentent une activation plus importante pour la classification des phrases à contenu lexical affectif et d'autant plus que ces phrases sont prononcées avec la prosodie affective adéquate (par exemple la variation du signal BOLD au cours de la tâche AffAct est de 1,3 dans aSTS, et 1,7 dans la partie antérieure du sillon temporal supérieur). On peut donc conclure qu'elles font donc partie du même cluster fonctionnel. En effet, les approches utilisées pour les mettre en évidence sont différentes expliquant la relative distance entre les pics d'activité maximal (voir Annexe 1, p211).

e- Résumé des résultats fonctionnels

Ce paradigme a permis de distinguer les régions impliquées dans la prosodie affective, des régions qui traitent les éléments ortholinguistiques pendant la classification de phrases affectives.

En premier lieu, la condition de classification grammaticale des phrases émotionnellement neutres a permis de mettre en évidence les régions impliquées dans le traitement ortholinguistique du langage. Ces régions formaient un réseau fronto-temporal bilatéral qui présentait une asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche.

En deuxième lieu, la comparaison de cette condition de classification grammaticale avec une condition de classification affective de phrases affectives a permis de mettre en évidence les régions dédiées au traitement ortholinguistique affectif, indépendamment de la présence de prosodie affective. Ces régions étaient les aires frontales inférieures (F3), pSTS et MF1. Alors que F3 était déjà engagé durant la classification grammaticale des phrases neutres, pSTS et MF1 étaient spécifiquement recrutées par le matériel à contenu verbal affectif.

Enfin, l'utilisation d'un logiciel de synthèse de parole qui incluait une prosodie grammaticale mais pas de prosodie affective a permis de révéler les régions impliquées dans les processus prosodiques à contenu lexical équivalent. La comparaison de la classification affective de phrases incluant la prosodie affective car énoncées par les acteurs, avec la même tâche réalisée sur les phrases produites par Kali sans prosodie affective a montré une implication temporelle dans le traitement de la prosodie. Cette implication temporelle correspondait à deux régions localisées dans le lobe temporal et présentaient une asymétrie en faveur de la droite.

3. DISCUSSION

A. Réseau neural de la classification grammaticale des phrases neutres

La première étude psycholinguistique a permis de sélectionner les phrases produites par Kali, le logiciel de synthèse de parole, qui soient **intelligibles** (voir paragraphe I.3, p85). Mais il fallait vérifier un possible impact neural de son utilisation sur la classification de phrases neutres. Aucun effet sur les résultats comportementaux n'a été observé entre la tâche de classification grammaticale de phrases à contenu lexical neutre produites par Kali et la tâche de classification grammaticale de phrases énoncées par les acteurs (voir paragraphe III.2.A, p118). De même, les résultats fonctionnels ne montraient pas de différence entre la tâche de classification grammaticale de phrases produites par Kali et la tâche de classification grammaticale de phrases énoncées par les acteurs (voir

paragraphe III.2.B.a- , p119). Ces résultats pourraient provenir du fait que Kali construit les stimuli à partir d'une base de données de syllabes énoncées naturellement, et que ce logiciel apparaît suffisamment intelligible comme en témoigne les bonnes performances des sujets aux tâches de classification grammaticale et affective.

Nous formulons également l'hypothèse qu'un engagement attentionnel des sujets dans une tâche active puisse masquer un effet de la perception de la voix de synthèse. En effet, une étude sur l'impact du discours de synthèse avait trouvé une activité plus importante dans le cortex prémoteur gauche pendant l'écoute passive d'un discours naturel que pendant l'écoute d'un discours de synthèse. Selon les auteurs, cette activation serait liée à une activité en mémoire de travail dépendant du degré de familiarité plus important pour la voix naturelle que la voix de synthèse (Benson *et al.*, 2001). Ce résultat demanderait à être vérifié avec une tâche de perception de phrases produites par Kali.

La classification grammaticale de phrases neutres va permettre de distinguer différentes composantes neurales du réseau de la classification de phrases affectives. La première composante est liée à la réponse motrice. On observe l'activation de l'aire motrice supplémentaire (AMS) qui intervient dans la préparation d'une réponse motrice (Petit *et al.*, 1998), et de la partie haute des gyri pré- et postcentraux ainsi que le cervelet, qui correspondent à la représentation sensori-motrice corticale de la main (Rumeau *et al.*, 1994; Yousry *et al.*, 1997). Pourtant, la tâche de référence de bas niveau qui correspond à la détection de bips sonores nécessitait également une réponse motrice. Or il a été montré que l'activité de AMS ne serait pas uniquement liée à la préparation de la réponse motrice, mais également à l'anticipation de cette réponse (Petit *et al.*, 1998). Le réseau attentionnel mis en jeu pour la réalisation de la tâche de classification grammaticale, qui pourrait avoir masqué un effet de l'utilisation d'une voix de synthèse, a également pu exercer un contrôle sur l'activation du réseau pour anticiper et préparer la réponse motrice (Corbetta et Shulman, 2002). Ceci pourrait expliquer son activation plus importante pour l'anticipation de la réponse à fournir pour la classification grammaticale par rapport à la tâche de référence qui induit une réponse quasiment automatique et nécessitant peu de ressources attentionnelles.

Mais surtout, cette condition nous a permis de mettre en évidence le **réseau neural du traitement ortholinguistique** qui permet la compréhension du message verbal contenu dans les phrases présentées auditivement (voir chapitre 1, p72, Figure 37). Grâce à la méta-analyse, il va être possible de définir plus précisément les régions corticales qui ont été impliquées et pour quelle fonction ortholinguistique. Chaque cluster obtenu dans la

méta-analyse a été superposé sur la carte d'activation, et une vérification visuelle a permis de déterminer la colocalisation des activations avec ces clusters.

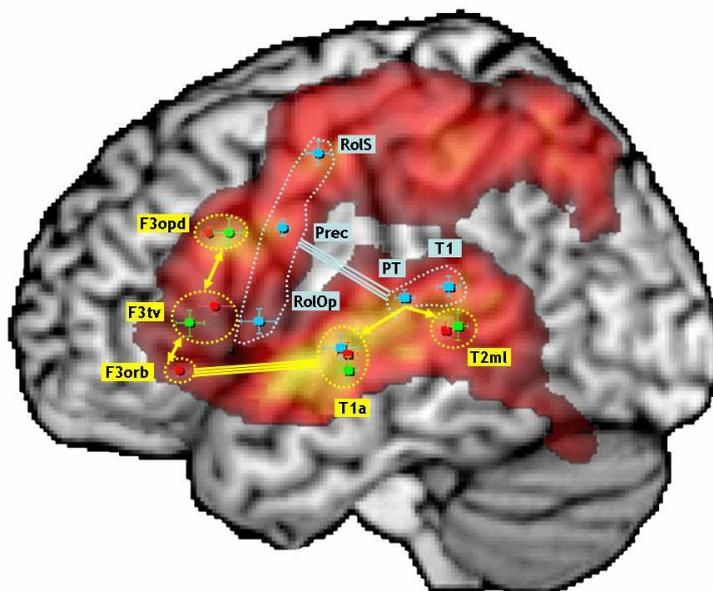


Figure 37. Réseau neural de la classification grammaticale de phrases neutres.

Les régions corticales recrutées lors de la classification grammaticale des phrases neutres produites par Kali et par les acteurs sont superposées sur les vues latérales du cerveau de référence MNI (rouge à jaune [GrAct \cap GrKali], $p \leq 0,0025$ seuil corrigé pour les comparaisons multiples). Les clusters provenant de la méta-analyse sur le langage et colocalisés avec le réseau neural de la classification grammaticale sont projetés à la surface de MNI : sont représentés les clusters impliqués dans le traitement phonologique (carré bleu), les clusters recrutés dans des tâches de nature sémantique (carré rouge), et les clusters regroupant les activations liées au traitement de la phrase (carré vert, les carrés représentent leur centre de masse et les barres d'erreur correspondent à 2 fois l'erreur standard sur les axes y et z). Ces clusters forment la boucle audio-phonatoire (pointillé bleu, triple trait bleu = faisceau arqué), le réseau fronto-temporal d'intégration lexico-syntaxique (pointillé jaune, triple trait jaune = faisceau unciné, RoIS : sillon Rolandique, Prec : gyrus précentral, RolOp : opercule rolandique, F3t : pars triangularis du gyrus frontal inférieur, F3op : pars opercularis du gyrus frontal inférieur, F3orb : pars orbitaris du gyrus frontal inférieur gyrus, PT : planum temporale, T1 : gyrus temporal supérieur, T2 : gyrus temporal moyen, a, anterior; l, lateral; m, middle; d, dorsal; v, ventral).

Nous avons montré que la compréhension de la phrase reposait sur un premier traitement de type phonologique des stimuli qui repose sur la *boucle audio-phonatoire*. La classification grammaticale des phrases neutres a mené à l'activation dans le lobe temporal du *planum temporale* (PT) et de la partie moyenne du gyrus temporal supérieur, incluant le gyrus de Heschl (T1) appartenant aux régions auditives primaires et secondaires qui définissent la composante auditive de la boucle audio-phonatoire. Par ailleurs, le recrutement par la classification grammaticale de la partie longeant le sillon central (RoIS, Prec, Rolop) correspond à la partie motrice de la boucle, qui est liée à la partie auditive via le faisceau arqué. Cette boucle audio-phonatoire a donc permis l'analyse phonologique du signal acoustique de la parole. Elle a pu également jouer un rôle dans la répétition silencieuse des stimuli en vue de la réalisation de la tâche de classification comme l'ont rapporté les sujets dans le questionnaire post-expérimental.

Les régions activées comprendraient également une partie du **réseau lexico-syntaxique** de la compréhension de la phrase que nous avons décrite dans le chapitre 1 (p72). Les données issues du traitement phonologique par la boucle audio-phonatoire entrerait ainsi dans ce réseau pour achever la compréhension du discours. Le traitement opéré passerait par une analyse de la voix et notamment de la prosodie grammaticale au de la partie antérieure du gyrus temporal supérieur (T1a), et par un accès aux connaissances sémantiques des mots dans la partie moyenne et latérale du gyrus temporal moyen (T2ml) qui seront compilées pour aboutir à la compréhension du message verbal contenu dans la phrase. Ces traitements dans le lobe temporal s'effectuent sous le contrôle des régions du gyrus frontal inférieur et de l'insula (F3orb, F3tv, F3opd, Figure 37).

Cependant, on peut remarquer l'absence d'activation dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur (STSp) et dans le pôle temporal (Pole).

L'absence d'activation dans la région correspondant au cluster STSp au cours de la classification grammaticale pourrait provenir de la tâche à réaliser (Figure 38). Ce cluster aurait pour fonction l'intégration des informations lexicales au niveau de la phrase (voir chapitre 1, pIV.C.a- , p62). Or la réussite à la tâche de classification supposait de trouver le sujet de la phrase, elle ne nécessitait donc pas la compréhension de l'énoncé dans son ensemble. Seul l'accès aux connaissances lexicales était requis, traitement opéré dans T2ml.

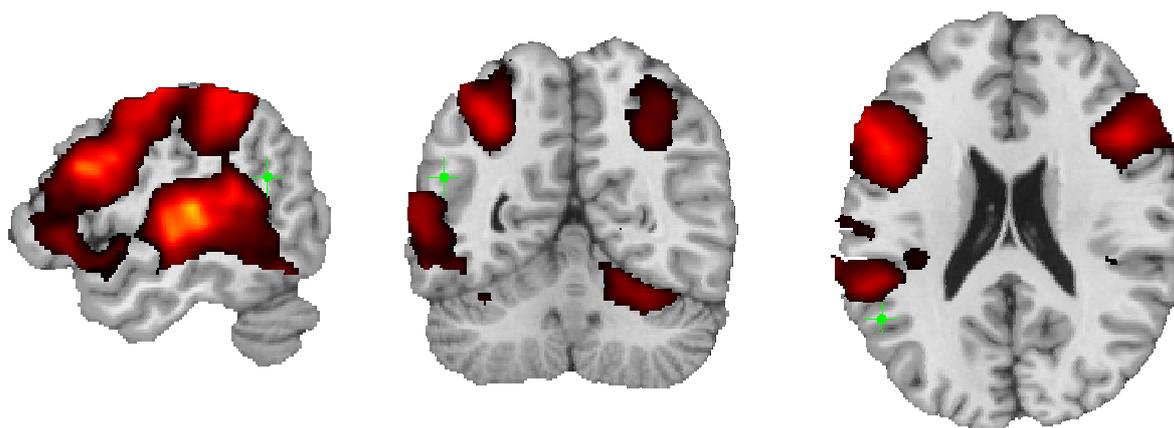


Figure 38. Localisation du cluster STSp par rapport au réseau neural de la classification grammaticale.

Le cluster STSp (vert, voir Figure 39 pour la légende) est superposé sur les coupes sagittale (à gauche, $x = -50$), coronale (au milieu, $y = -54$), axiale (à droite, $z = 22$) du cerveau de référence MNI, avec les régions corticales recrutées lors de la classification grammaticale des phrases neutres produites par Kali et par les acteurs (rouge à jaune $[GrAct \cap GrKali]$, $p \leq 0,0025$ seuil corrigé pour les comparaisons multiples). Le cluster STSp est situé en dehors des zones corticales activées.

La discussion de l'absence d'activation du pôle temporal demande tout d'abord d'aborder le problème des acquisitions d'images fonctionnelles dans cette région. Dans

l'analyse de second niveau que nous avons réalisé dans cette étude sur les cartes d'activation, le masque d'analyse n'incluait pas le pôle temporal (problème de distorsion du signal BOLD dans cette région). Par conséquent, ces données ne permettaient pas de savoir si oui ou non la tâche de classification grammaticale faisait appel au pôle temporal (Figure 39). Cependant, étant donné le rôle du cluster Pole défini par la méta-analyse, nous pouvons émettre l'hypothèse que le pôle temporal n'était pas activé au cours de cette tâche. En effet, la réussite à la tâche supposait de trouver le sujet de la phrase, elle ne nécessitait en aucun cas la récupération des informations en mémoire à long terme, comme des souvenirs. Ces informations permettent d'étoffer la compréhension du message verbal, et n'était donc pas nécessaire à la réalisation d'une tâche de détection du sujet.

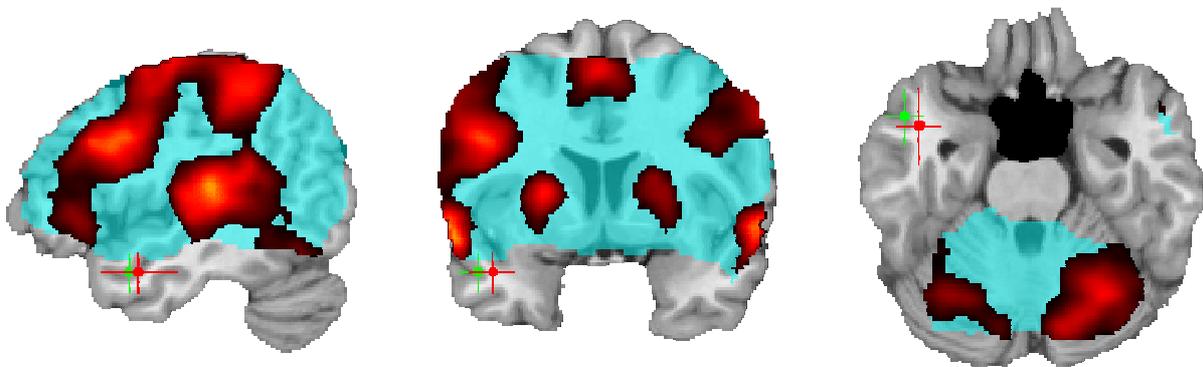


Figure 39. Le cluster Pole par rapport au réseau neural de la classification grammaticale.

Sont superposés, sur les coupes sagittale (à gauche, $x = -47$), coronale (au milieu, $y = 6$), axiale (à droite, $z = -24$) du cerveau de référence MNI, (1) les régions corticales recrutées lors de la classification grammaticale des phrases neutres produites par Kali et par les acteurs (rouge à jaune [GrAct \cap GrKali], $p \leq 0,0025$ seuil corrigé pour les comparaisons multiples), (2) le masque d'analyse de second niveau réalisée sur les cartes de contrastes individuelles (bleu). Ce masque représente l'ensemble des voxels analysés, et n'inclut pas le pôle temporal. Le cluster Pole impliqué dans le traitement de la phrase (vert) et le cluster Pole impliqué dans le traitement lexical (rouge) sont représentés sur les trois coupes (le point symbolise le centre du cluster, les barres correspondent à deux fois l'erreur standard dans les trois incidences, représentant la dispersion des pics inclus dans ces clusters). On peut remarquer que ces deux clusters sont en dehors du masque d'analyse.

Ainsi, cette tâche de classification grammaticale a permis de mettre en évidence le réseau neural de traitement des éléments ortholinguistiques allant du traitement phonologique, au niveau de la boucle audio-phonatoire, à l'accès aux connaissances lexicales dans T2ml, en passant par le traitement de la prosodie grammaticale réalisée dans T1a à gauche. Rappelons que ce réseau s'étendait à l'hémisphère droit, mais le rôle exact de ces régions droites dans le traitement ortholinguistique reste à déterminer (voir perspectives, p164).

Par ailleurs, la mise en évidence de ce réseau fronto-temporal asymétrique gauche renforce l'hypothèse selon laquelle les réseaux neuraux décrits comme traitant la prosodie affective dans d'autres études de neuroimagerie sont en fait liés à la difficulté d'accès au sens des stimuli présentant une faible, voire une absence totale, de contenu lexical (Figure

40). Les régions frontales et temporales gauches que nous retrouvons impliquées dans la classification grammaticale des phrases à contenu lexical neutre, et qui traitent les éléments ortholinguistiques du langage, sont bien activées en présence d'un contenu lexical incongruent avec le contenu prosodique, voire inexistant. Le traitement de ce type de matériel met donc en jeu le réseau neural des processus lexicaux. Mais ces processus ne vont pas jusqu'à l'intégration pour la construction du sens de l'énoncé puisqu'il n'existe pas ou est ininterprétable par rapport au contenu prosodique, expliquant pourquoi aucune de ces études ne montrent d'activation dans pSTS. Ces résultats confirment donc l'hypothèse selon laquelle la latéralisation hémisphérique droite du traitement prosodique a été masquée par l'implication du réseau neural gauche du traitement lexical dans une tentative d'accès au sens des stimuli dont le contenu lexical et incongruent avec le contenu prosodique (George *et al.*, 1996b; Wildgruber *et al.*, 2002; Mitchell *et al.*, 2003; Kotz *et al.*, 2003; Grandjean *et al.*, 2005).

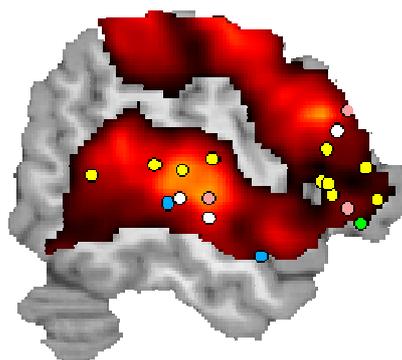


Figure 40. Méta-analyse des études de neuroimagerie sur la prosodie affective dans l'hémisphère gauche. Les pics issus de études de neuroimagerie sur la prosodie affective sont superposés sur une coupe sagittale ($x = 52$) du cerveau de référence MNI. Ces études ont utilisés des stimuli dépourvus de contenu lexical (● Kotz, 2003, ○ Grandjean, 2005) ou un contenu lexical incongruent avec la prosodie affective (● George, 1996, ● Mitchell, 2003, ○ Wildgruber, 2002).

B. Réseau neural de la classification du contenu lexical affectif

a- Aires frontales lexicales et émotionnelles

Un réseau frontal était recruté durant la tâche de classification affective de phrases à contenu lexical affectif et à un niveau moindre durant la tâche de classification grammaticale de phrases neutres. Bien que des activations homologues droites aient été observées, l'asymétrie gauche significative de ce réseau attesterait de sa spécificité pour le traitement du langage (voir paragraphe 0, p122).

Les régions localisées dans la partie antérieure et inférieure de F3 à gauche (*pars triangularis*, F3t) sont connues pour être impliquées dans le traitement lexico-syntaxique (Vigneau *et al.*, 2006). En effet, cette région était proche du cluster F3tv. Cependant, dans la méta-analyse, il a été difficile d'attribuer de distinguer son rôle dans le traitement lexical et dans le traitement syntaxique (chapitre 1, paragraphe IV.C.c- , p68). En utilisant la base de données de pics inclus dans la méta-analyse, il est possible de cibler les pics des études de neuroimagerie les plus proches de l'activation dans F3t retrouvée dans la présente étude, et ainsi mieux comprendre son rôle dans la classification de phrases affectives. F3t serait impliqué dans la catégorisation lexical (Poldrack *et al.*, 1999; Adams et Janata, 2002) et dans la sélection des connaissances lexicales (Wagner *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2002). Il est facile de relier ces activations aux stratégies utilisées par les sujets pour réaliser la tâche. Pour classer les phrases, les sujets se fiaient à des indices de nature lexicale à partir du contenu verbal affectif (voir paragraphe III.2.A, p118). Ainsi, F3t jouerait ici un rôle dans la définition des champs notionnels auquel appartiennent les mots affectifs qui composent les phrases (voir paragraphe I.1.A.c- , p82), permettant la catégorisation affective.

Les sujets ont rapporté avoir répété mentalement les phrases au cours du questionnaire post-expérimental (voir paragraphe III.2.A, p118). Cette stratégie pourrait certainement correspondre à l'activation de la pré-AMS et de l'insula antérieure gauche impliquée dans l'articulation mentale du discours (Ackermann et Riecker, 2004).

Par ailleurs, la *pars orbitaris* de F3 a été activée de manière bilatérale, mais l'analyse des variations du signal BOLD dans cette région est rendue difficile car le cluster observé se trouvait à la limite du masque d'analyse (Figure 41). En effet, des distorsions du signal sont fréquemment rencontrées dans cette région. Cependant, cette *pars orbitaris* de F3 était proche des régions impliquées lors de la discrimination émotionnelle de phrases comparée à la répétition du dernier mot de ces mêmes phrases (car en TEP, il n'existe pas de distorsion dans cette région, George *et al.*, 1996b). Elle correspondait également aux résultats d'études d'IRMf qui comparent le niveau d'expression des émotions entre deux phrases avec la discrimination de l'accentuation prosodique grammaticale (Wildgruber *et al.*, 2004) ou la discrimination des émotions versus la verbalisation d'une voyelle cible (Wildgruber *et al.*, 2005). Cependant dans la présente étude, cette région orbito-frontale était activée au cours du traitement de phrases à contenu lexical affectif quel que soit le type de voix utilisé, c'est-à-dire quelle que soit la présence ou non de prosodie affective. Ce résultat vient conforter les suggestions de Dirk Wildgruber et collaborateurs qui

proposent que le rôle de cette région n'est pas uniquement cantonnée au traitement de la prosodie émotionnelle mais, de manière large, dans des processus émotionnels (Wildgruber *et al.*, 2004; Wildgruber *et al.*, 2005). En effet, la pars orbitaris est activée par la perception de mots émotionnels (Beauregard *et al.*, 1997) ainsi que, dans l'hémisphère droit, par la discrimination du genre sur des visages exprimant des émotions (Blair *et al.*, 1999). Par ailleurs, une lésion de cette région entraîne des difficultés à discriminer les émotions sur des visages et dans la voix (Hornak *et al.*, 2003). Cette région semblerait donc être activée non seulement en présence de prosodie émotionnelle mais également lorsqu'il s'agit de discriminer des stimuli émotionnels (Figure 41).

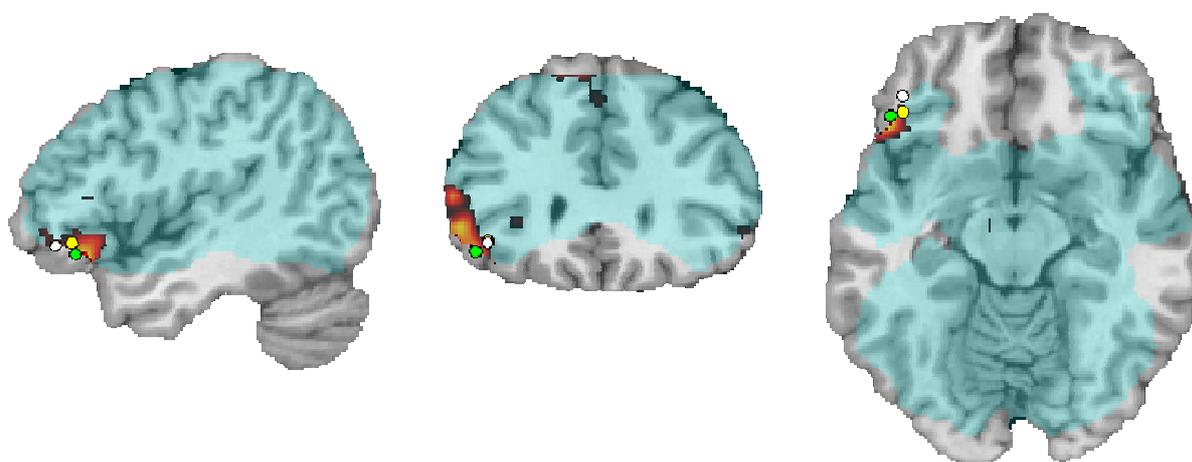


Figure 41. Région F3orb activée par le traitement émotionnel.

Les régions corticales recrutées lors de la classification affective des phrases affectives produites par Kali et par les acteurs (rouge à jaune [(AffAct - GrAct) \cap (AffKali - GrKali)], $p \leq 0,0025$ seuil corrigé pour les comparaisons multiples) sont superposées sur les coupes sagittale (à gauche, $x = -45$), coronale (au milieu, $y = 30$), axiale (à droite, $z = -12$) du cerveau de référence MNI. Les pics localisés au niveau de la pars orbitaris du gyrus frontal inférieur gauche sont issus de trois études de neuroimagerie : une première étude réalisée en TEP sur les bases neurales de la compréhension de la prosodie affective (cercle jaune, George *et al.*, 1996b), une étude en IRMf sur la discrimination émotionnelle de la prosodie énoncée sur des phrases lexicalement neutres (cercle vert, Wildgruber *et al.*, 2005), et enfin une étude de lecture passive de mots émotionnels (cercle blanc, Beauregard *et al.*, 1997). Et est également représenté sur cette figure le masque d'analyse de second niveau réalisée sur les cartes de contrastes individuelles (bleu). Ce masque représente l'ensemble des voxels analysés, et montre que la région F3orb se situe bien à la limite de l'analyse.

b- Activations de la partie médiane du gyrus frontal supérieur et de la partie postérieure du sillon temporal supérieur gauche : un réseau recruté par l'inférence de l'état mental du locuteur ?

Un second groupe de régions, le gyrus frontal supérieur dans sa partie médiane (MF1) et la partie postérieure du sillon temporal supérieur (pSTS), montrait une augmentation d'activité lorsque les sujets exécutaient la tâche de classification affective tandis que ce groupe de régions n'était pas du tout activé pendant la tâche de classification grammaticale (voir paragraphe III.2.B.b- , p122).

➤ La partie médiane du gyrus frontal supérieur

L'implication de la partie médiane du lobe frontal pourrait être liée à la détection d'erreur (Botvinick *et al.*, 2004). De fait, les résultats comportementaux font état d'une plus grande proportion d'erreurs pendant la tâche de classification affective qu'au cours de la tâche de classification grammaticale. Cette différence suggérerait donc une activité plus importante de MF1 dans la tâche de classification affective. Cependant, cette hypothèse sur le rôle fonctionnel de MF1 est remise en cause par les nombreuses études qui localisent la région sensible à la détection d'erreur dans la partie antérieure du cingulum située plus bas que le cluster détecté (pour revue voir Bush *et al.*, 2000; Rushworth *et al.*, 2004; Ridderinkhof *et al.*, 2004), (Figure 42).

Aucune étude portant sur le traitement de la phrase n'a mis en évidence d'activation dans MF1. Par contre, de nombreuses études sur la théorie de l'esprit ont mis montré une activation dans cette partie médiane du gyrus frontal supérieur. La théorie de l'esprit correspond à la capacité d'inférer d'états mentaux et ainsi d'expliquer ou de prédire ses propres actions et celles d'autrui ou d'autres agents intelligents, ou (Premack et Woodruff, 1978). Devant ces résultats, nous avons cherché à vérifier si le cluster MF1 activé par la classification de phrases affectives correspondait aux régions impliquées dans l'inférence des états mentaux. Reprenant le principe de la méta-analyse présentée au chapitre 1, nous avons tout d'abord recueilli les coordonnées des activations fournies dans la littérature sur les régions impliquées au cours de tâche de théorie de l'esprit. Puis nous avons confronté ces coordonnées avec la localisation de MF1 (Figure 42).

Les tâches utilisées dans les études sur la **théorie de l'esprit** impliquaient du matériel verbal (Vogeley *et al.*, 2001; Harris *et al.*, 2005), visuel comme des animations (Castelli *et al.*, 2000), des clips vidéo (Iacoboni *et al.*, 2004), des bandes dessinées (Gallagher *et al.*, 2000; Brunet *et al.*, 2000; Walter *et al.*, 2004), des objets (Goel *et al.*, 1995) et incluait l'inférence des états mentaux d'autrui, comme l'attribution d'intention (Castelli *et al.*, 2000; Walter *et al.*, 2004; Harris *et al.*, 2005) ou l'observation d'interactions sociales (Iacoboni *et al.*, 2004).

Cette région est également impliquée lorsqu'on évalue son **propre état mental** (Craig *et al.*, 1999; Ruby et Decety, 2003; Sugiura *et al.*, 2004; Johnson *et al.*, 2005; Ochsner *et al.*, 2005; den Ouden *et al.*, 2005; Schmitz et Johnson, 2006) ou son propre état émotionnel (Reiman *et al.*, 1997; Ochsner *et al.*, 2002), (Figure 42). Le contenu émotionnel des stimuli apparaît donc crucial puisque MF1 est également recruté dans la perception de situations empathiques, lorsque qu'il s'agit d'inférer et de partager

l'expérience émotionnelle des autres (Mitchell *et al.*, 2005a; Mitchell *et al.*, 2005b; Mitchell *et al.*, 2005c; Hynes *et al.*, 2006; Vollm *et al.*, 2006; Lawrence *et al.*, 2006).

MF1 étant recruté dans la tâche de classification affective, nous avons également confronté nos résultats à ceux obtenus dans la littérature sur les émotions, de la même manière que pour la littérature sur la théorie de l'esprit. La partie haute de MF1 est recrutée dans des processus émotionnels autre que l'empathie mais ces résultats sont plus rares. Pour Phan et co-auteurs, seule la partie basse de MF1 est impliquée dans les processus émotionnels (Phan *et al.*, 2002). Quelques pics d'activations provoqués par la perception de visages émotionnels (Blair *et al.*, 1999) ou de mots émotionnels (Beauregard *et al.*, 1997) sont situés à proximité de la partie de MF1 activée dans notre étude (Figure 42).

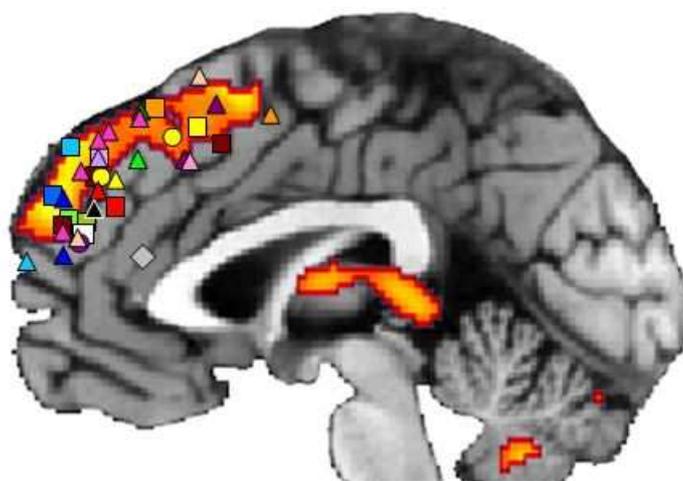


Figure 42. Meta-analyse dans le gyrus frontal médian.

Projection sur la surface médiane du cerveau de référence MNI : (1) des activations obtenues par conjonction des contrastes CLASSIFICATION AFFECTIVE MOINS CLASSIFICATION GRAMMATICALE dans le cas où les phrases sont énoncées par les acteurs et les conditions portant sur les phrases produites par Kali (de rouge à jaune, $p \leq 0,0025$ corrigé pour les comparaisons multiples); (2) des pics d'activations provenant d'études sur la THEORIE DE L'ESPRIT comme le jugement d'intentionnalité (■ Brunet, 2000; ■ Castelli, 2000, ■ Harris, 2005, ■ Iacoboni, 2004, ■ Walter, 2004), la compréhension d'histoires requérant l'inférence d'états mentaux (■ Gallagher, 2000, ■ Vogeley, 2001), le jugement des connaissances d'autrui (□ Goel, 1995, ■ Ruby, 2004); (3) sur ces PROPRES états mentaux comme le jugement des préférences personnelles (▲ Craik, 1999, ▲ Johnson, 2005, ▲ Ochsner, 2005, ▲ Schmitz, 2005, ▲ Sugiura, 2004), l'évaluation de ses propres connaissances (▲ den Ouden, 2005, ▲ Ruby, 2003), l'empathie (▲ Hynes, 2006, ▲ Lawrence, 2005, ▲ Mitchell 2005a, 2005b, 2005c, et ▲ Vollm, 2006), l'évaluation personnelle d'un contenu émotionnel (▲ Ochsner, 2002; ▲ Reiman, 1997); (4) sur l'ÉMOTION qui compare la perception de mots émotionnels et neutres (● Beauregard, 1997) ou de visages émotionnels et neutres (● Blair, 1999); (5) sur la détection d'erreur (◇ (Bush, 2000)). Tous les pics sont dans l'espace stéréotaxiques MNI (voir chapitre 1, paragraphe II.1.E, p38).

Concernant le rôle de cette région au cours de la classification affective, il apparaît difficile de trancher entre traitement des états mentaux d'autrui ou traitement de ses propres états mentaux. Bien que ces deux processus fassent partie des mécanismes à l'origine de l'inférence des états mentaux (Premack et Woodruff, 1978), des auteurs se

sont attachés à chercher s'ils reposaient sur des bases neurales communes. Si certains postulent l'existence d'un réseau commun (Happe, 2003), d'autres montrent que certaines sous parties de MF1 sont spécifiques du traitement de ses propres états mentaux (Ochsner *et al.*, 2004).

Mais pourquoi est-il si difficile de distinguer les bases neurales de l'inférence de son propre état mental et de l'inférence de l'état mental d'autrui ?

Tout d'abord, les dernières publications sur l'inférence d'états mentaux ne prennent pas en compte cette distinction: si certains auteurs se focalisent sur le traitement de ses propres réflexions (pour une revue sur le rôle de MF1 voir Northoff et Bermpohl, 2004), d'autres abordent la théorie de l'esprit du point de vue de l'inférence des états mentaux d'autrui (Abu-Akel, 2003; Gallagher et Frith, 2003; Saxe, 2005; Mitchell, 2005). Enfin, il est possible que l'inférence des états mentaux d'autrui fasse appel à une réflexion sur soi comme le propose la théorie de la simulation. Cette théorie postule que, pour inférer l'état mental d'autrui, il faut se mettre à la place du locuteur (Abu-Akel, 2003).

C'est ce qui a pu se produire dans notre paradigme: pour comprendre le message émotionnel véhiculé dans la phrase, les sujets ont pu se mettre à la place du locuteur et imaginer leur propre réaction émotionnelle dans une telle situation. Par exemple, si je dit "Super, j'ai gagné au loto", c'est que gagner une somme d'argent doit 'ME rendre gai'. Et en effet, dans l'étude psycholinguistique (voir paragraphe II.5, p99), le questionnaire post-expérimental contenait une question sur l'utilisation de la théorie de l'esprit : Les sujets devaient nous dire s'ils s'étaient mis à la place du locuteur pour résoudre la tâche. Tous les sujets ont répondu avoir eu recours à cette stratégie. Cette question porterait donc plus sur l'utilisation de la théorie de la simulation démontrant que la tâche de classification affective fait intervenir l'inférence d'états mentaux d'autrui.

Cependant il faut rester prudent sur cette interprétation puisque les mécanismes de mise en jeu de la théorie de l'esprit font toujours débat dans la littérature. En effet, un autre mécanisme a été proposé : l'inférence des états mentaux du locuteur pourrait se faire en se basant sur ses propres connaissances de l'environnement, par rapport à sa propre expérience : c'est la théorie *théorie* (par opposition à la théorie de la simulation). Comme certains auteurs, nous pensons que ces deux mécanismes soient mis en jeu lorsque nous inférons des états mentaux (Abu-Akel, 2003; Saxe, 2005; Mitchell, 2005). En effet, le traitement du contenu lexical au cours de la tâche permettrait la confrontation de ces données avec ses propres connaissances pour inférer l'état mental du l'interlocuteur.

Au vue de ces différents résultats, la présente activation de MF1 durant la tâche de classification affective serait très probablement liée à la mise en jeu de la représentation interne d'états mentaux, soit son propre état mental (Northoff et Bermpohl, 2004) soit l'état mental d'autrui (Gallagher et Frith, 2003), car son activité semble être augmentée par le contenu émotionnel des stimuli à traiter (Gallagher et Frith, 2003).

➤ La partie postérieure du sillon temporal supérieur

L'activation dans pSTS gauche était certainement liée à l'intégration des **processus lexicaux et syntaxiques**, essentiels pour réussir la tâche de classification affective, tandis qu'elle était superflue pour réaliser la tâche de classification grammaticale nécessitant le traitement d'un seul mot de la phrase -détecter la forme du sujet de la phrase (voir paragraphe III.3.A, p131). De fait, cette région était très proche de la région STSp décrite dans la méta-analyse en charge de l'intégration des informations lexicales pour la construction d'une phrase en réseau avec F3 (voir chapitre 1, paragraphe IV.C.a- , p62). Son profil d'activation au cours des quatre conditions étant proche de celui de MF1, nous avons cherché précisément, en se servant de la base de données que constitue la méta-analyse, quelles études de neuroimagerie avaient retrouvé des pics à proximité de la région pSTS activé uniquement au cours de la classification affective.

Comme illustrée sur la Figure 43, cette région latéralisée à gauche est située à proximité de pics activés par des tâches de traitement de la phrase qui sont: le jugement d'erreurs grammaticales comparé à des erreurs de prononciations (Embick *et al.*, 2000), la génération du mot final d'une phrase (Kircher *et al.*, 2001), et la compréhension de phrases cohérentes versus incohérentes (Kuperberg *et al.*, 2000; Luke *et al.*, 2002). Un tel rôle dans l'intégration sémantique de matériel verbal complexe n'est pas limité à la phrase, cette région est également recrutée pendant la compréhension de texte, avec une augmentation particulière d'activité lorsque les phrases à comprendre forment un dialogue (Homae *et al.*, 2002) ou constituent un syllogisme (Goel *et al.*, 1998) plutôt que lorsque les phrases ne sont pas reliées. pSTS serait donc en charge de l'intégration des informations lexicales pour aboutir à l'élaboration d'un message d'un niveau verbal complexe (phrase ou texte).

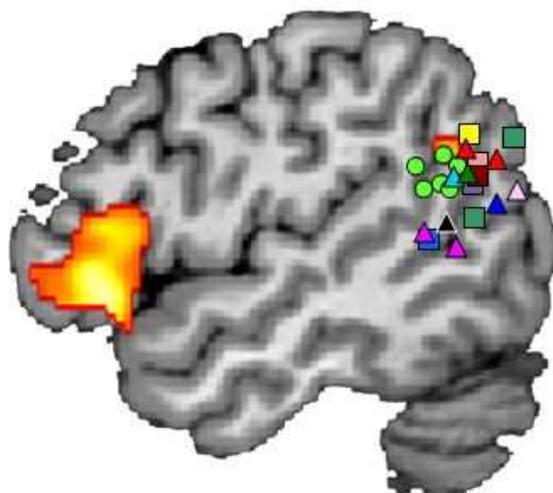


Figure 43. Meta analyse dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur.

Projection sur une coupe sagittale ($x = -50$) du cerveau de référence MNI : (1) des activations obtenues par conjonction des contrastes CLASSIFICATION AFFECTIVE MOINS CLASSIFICATION GRAMMATICALE dans le cas où les phrases sont énoncées par les acteurs et les conditions portant sur les phrases produites par Kali (de rouge à jaune, $p \leq 0,0025$ corrigé pour les comparaisons multiples); (2) des pics d'activations provenant d'études sur la THEORIE DE L'ESPRIT comme le jugement d'intentionnalité (■ Castelli, 2000, ■ Walter, 2004), la compréhension d'histoires requérant l'inférence d'états mentaux (■ Ferstl, 2002, □ Fletcher, 1995, □ Gallagher, 2000, □ Saxe, 2003), le jugement des connaissances d'autrui (■ Ruby, 2004); (3) sur ces PROPRES états mentaux comme le jugement des préférences personnelles (△ Johnson, 2005), l'évaluation de ses propres connaissances (▲ den Ouden, 2005, ▲ Ruby, 2003), l'empathie (▲ Hynes, 2006 et ▲ Vollm, 2006), l'évaluation personnelle d'un contenu émotionnel (▲ Lane, 1997; ▲ Reiman, 1997); (4) l'INTÉGRATION des traitements lexical et syntaxique au niveau de la phrase (○ Embick, 2000; Kircher, 2001; Kuperberg, 2000; Luke, 2002) ou du texte (Goel, 1998; Homae, 2002). Tous les pics sont dans l'espace stéréotaxiques MNI (voir chapitre 1, paragraphe II.1.E, p38).

Il est intéressant de noter que pSTS gauche joue un rôle dans l'intégration de texte mais qu'il est aussi très activé pendant la compréhension d'histoire impliquant l'inférence d'états mentaux. Si quelques auteurs ont confirmé le rôle de pSTS gauche dans l'intégration de matériel verbal complexe en montrant un plus grand recrutement de cette région au cours de la compréhension d'histoire requérant l'inférence d'états mentaux par rapport à des phrases non liées (Fletcher *et al.*, 1995; Ferstl et Von Cramon, 2002), d'autres ont montré que cette région était plus activée pendant la lecture d'histoires impliquant la compréhension des états mentaux des personnages que pendant la lecture d'histoires syntaxiquement correctes mais ne décrivant aucun événement faisant appel à la théorie de l'esprit (Gallagher *et al.*, 2000; Saxe et Kanwisher, 2003). Cette région est également impliquée dans l'interprétation des intentions d'autrui (Castelli *et al.*, 2000; Walter *et al.*, 2004), dans la représentation de soi pour une autoévaluation (Ruby et Decety, 2003; Johnson *et al.*, 2005; den Ouden *et al.*, 2005), dans l'empathie (Hynes *et al.*, 2006; Vollm *et al.*, 2006), mais aussi au cours du jugement de la valence émotionnelle d'un film (Lane *et al.*, 1997; Reiman *et al.*, 1997). Ces études rapportent toute une coactivation de MF1 (sauf dans Saxe et Kanwisher, 2003), témoignant d'une relation étroite en terme de réseau neural entre MF1 et pSTS.

Il faut noter que la **latéralisation de pSTS** semble être modulée par le type de matériel -verbal ou visuel- utilisé dans ces études sur la théorie de l'esprit. Cette hypothèse est corroborée par l'existence d'une asymétrie gauche de cette région dans notre étude qui incluait des stimuli verbaux tandis qu'elle est plus activée à droite au cours de la présentation de photos de visages ou de corps (Saxe et Kanwisher, 2003) ou lorsque les sujets doivent inférer des intentions à partir de l'observation de mouvements (Pelphrey *et al.*, 2004), ou d'actions humaines (Walter *et al.*, 2004; Saxe *et al.*, 2004b).

Ces observations nous ont conduit à proposer que le rôle de pSTS gauche dans cette étude puisse ne pas être restreint uniquement au traitement du contenu propositionnel des phrases. Nous postulons que pSTS gauche aurait un rôle d'intégration du contenu lexical et émotionnel du discours. Le fait que pSTS gauche avec MF1 soient décrits comme le noyau du système de la théorie de l'esprit (Gallagher et Frith, 2003) suggère que l'activation de ce réseau puisse être liée à l'inférence de l'état mental du locuteur pendant la tâche de classification affective. Le fait que l'évaluation des ses propres sentiments et émotions puissent recruter également ces régions, nous a conduit à formuler l'hypothèse selon laquelle nos sujets auraient basé leur jugement en inférant l'état mental du locuteur.

➤ Pourquoi la théorie de l'esprit est-elle impliquée dans la tâche de classification affective ?

L'implication du réseau de la théorie de l'esprit en l'absence de prosodie affective suggérerait que ce processus puisse opérer principalement sur le *contenu verbal du message*. Les sujets réussissaient bien la tâche de classification affective en l'absence de prosodie affective (70% de réponses correctes). L'implication du réseau neural de la théorie de l'esprit ne peut donc être imputée à la difficulté de la tâche, et en tout cas pas à l'absence de prosodie affective. Ces résultats peuvent être considérés comme une indication de la présence du contenu verbal sur le traitement du contenu prosodique. Ainsi si la prosodie facilite la compréhension du discours affectif, elle ne serait pas essentielle. Ce résultat est compatible avec les études de cas de patients cérébrolésés atteints d'aprosodie: ces patients présentaient des scores très bas de jugement du contenu émotionnel de « phrases » dépourvues de contenu lexical, et passent de 25% à 75% de réponses correctes quand les phrases à juger présentaient un contenu lexical congruent (Bowers *et al.*, 1987).

Ce rôle clé du contenu lexical dans l'interprétation d'un discours émotionnel est également soutenu par le fait qu'un défaut du traitement lexical conduit à des erreurs dans des tâches de jugement prosodiques (Lalande *et al.*, 1992). Ces erreurs pourraient être liées à des difficultés à inférer l'état mental émotionnel du locuteur en raison du manque d'informations lexicales à confronter avec ses propres connaissances (théorie théorie). Le fait qu'un déficit de compréhension de la prosodie émotionnelle puisse résulter d'un déficit d'inférence des états mentaux du locuteur en raison d'un manque d'informations lexicales provient de l'observation de patients aprosodiques après lésions des structures médianes (Ross *et al.*, 1997). Douglas Ross interprète ce déficit comme une interruption des échanges entre cerveau gauche qui traite les informations de nature lexico-syntaxique et cerveau droit qui traite l'information prosodique. De fait, les lésions de ses patients aprosodiques, si elles débordent sur les fibres calleuses sous-jacentes qui pourraient permettre la conduction de telles informations, touchent les régions autour de AMS, allant vers la partie médiane du gyrus frontal supérieur.

Kenneth Heilman a rapporté le cas d'un patient qui souffrait d'aprosodie après lésion des régions frontales médianes alors que les régions temporales droites de ce patient sont restées intactes (Figure 24, ligne du bas, Heilman *et al.*, 2004). Cette lésion apparaît assez proche des régions impliquées dans l'inférence d'états mentaux. En effet, de telles lésions sont connues pour entraîner des déficits dans l'inférence des états mentaux (Stuss *et al.*, 2001; Stuss et Anderson, 2004). Il semble donc qu'une atteinte de la région frontale médiane conduise à des difficultés dans l'interprétation du message émotionnel lexical et prosodique congruent, bien que les régions temporales intactes traitent les informations prosodiques correctement.

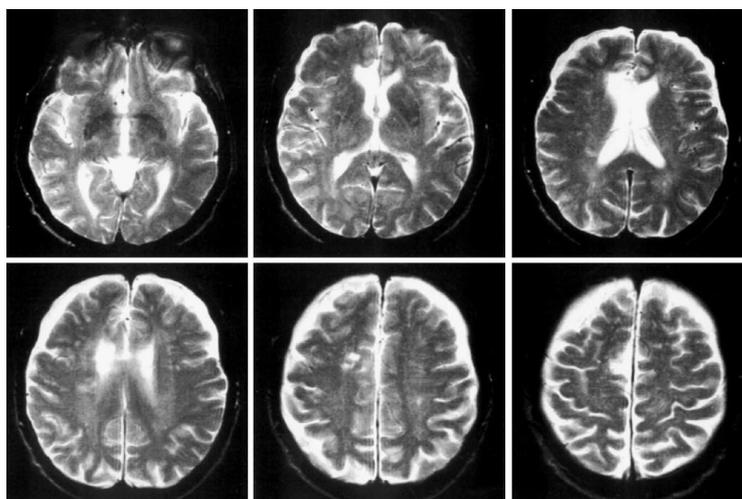


Figure 44. IRM d'un sujet aprosodique présentant une lésion frontale médiane (repris de Heilman *et al.*, 2004).

Mais pourquoi des régions impliquées dans le traitement des états mentaux interviendraient pendant la tâche de classification affective des phrases? La construction de notre paradigme et les résultats comportementaux ne permettaient pas de prévoir la mise en jeu de l'inférence des états mentaux au cours de la classification affective.

En effet, les phrases utilisées dans ce paradigme étaient dépourvues d'ambiguïtés. Leur construction syntaxique était simple et la présence d'un contenu lexical explicite rendait la tâche facilement réalisable, notamment en présence de prosodie, comme l'ont rapporté les sujets dans le questionnaire post-expérimental. *A priori* la classification affective ne requiert aucun coût cognitif supplémentaire autre que celui engendré par le traitement lexical et / ou prosodique. Ainsi l'implication du réseau neural de l'inférence d'états mentaux ne serait pas liée à la résolution de la tâche elle-même mais à **l'inférence d'états mentaux qui apparaît irréprensible chez l'homme**³² (Brüne, 2005), particulièrement en situation de communication. Or l'inférence des états mentaux appartient au domaine de la cognition sociale. Cette tâche de classification affective placerait donc le sujet dans une relation d'interaction sociale, de type locuteur/interlocuteur. Ainsi la classification des phrases, sur la base de leur contenu émotionnel, ne ferait pas seulement appel à une simple catégorisation lexicale mais engagerait également l'inférence de l'état émotionnel du locuteur.

Cette étude rappelle donc que l'inférence d'états mentaux, à la base des relations sociales au quotidien, est étroitement liée au traitement émotionnel, en accord avec une étude de neuroimagerie qui a montré que ces deux régions, et notamment MF1, seraient le **site d'une interaction entre traitement du contenu social et émotionnel** (ici de scènes visuelles, Norris *et al.*, 2004). Dans une revue récente, Rebecca Saxe explique que la théorie de l'esprit, qui apparaît plus tardivement dans l'enfance que le concept d'émotion, pourrait se développer à partir du réseau du traitement des émotions. Ceci pourrait expliquer l'existence d'interactions entre les deux systèmes chez l'adulte (Saxe *et al.*, 2004a).

C. Le rôle des aires temporelles droites dans le traitement de la prosodie affective

Bien que les sujets n'aient pas été instruits de la présence de la prosodie affective dans les phrases dites par les acteurs, ils ont tous rapporté s'être appuyés sur l'intonation

³² Brüne explique que nous examinons en permanence les intentions des autres personnes, et parfois même celles des objets non-animés (Brüne, 2005).

pour résoudre la tâche de classification affective. Leur rapidité et leurs meilleures performances à cette tâche témoignent de l'optimisation de la compréhension de phrases avec un contenu lexical affectif par la présence de la prosodie affective. Un parallèle entre ces résultats et le recrutement des deux régions dans le lobe temporal droit au cours de cette tâche peut donc être fait (voir paragraphe III.2.B.c- , p124).

a- La partie antérieure du sillon temporal supérieur

La présence de prosodie affective a provoqué un surcroît d'activation de la partie antérieure du sillon temporal supérieur (aSTS). Cette région est très proche de l'**aire sélective de la voix humaine** (ASVH, Belin *et al.*, 2004) définie comme une région bilatérale qui répond plus aux sons de la voix humaine qu'aux bruits de l'environnement (Belin *et al.*, 2000; Kriegstein *et al.*, 2003) ou qu'aux vocalisations d'autres espèces (e.g. singes, Fecteau *et al.*, 2004a). Nos résultats impliquent que ASVH droite soit recrutée par le traitement de la prosodie affective, un élément acoustique spécifique de la voix humaine (Figure 45).

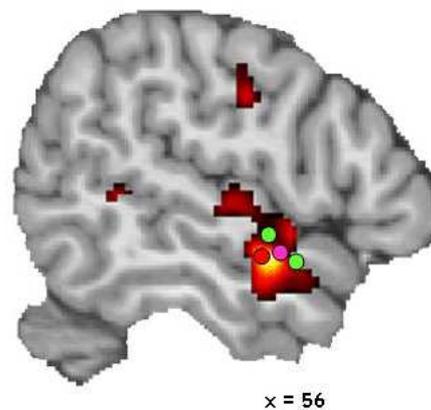


Figure 45. La région sélective de la voix humaine et la prosodie affective

La partie antérieure du sillon temporal supérieur droit (aSTS d) est plus activée au cours de la classification affective en présence de prosodie affective (phrases lues par les acteurs) qu'au cours de la même tâche en l'absence de prosodie affective (phrases produites par Kali) est superposée sur une coupe sagittale du cerveau de référence MNI ($x = 56$, $p \leq 0,001$ non corrigé). Le cluster aSTS d, qui présente la plus grosse augmentation d'activité BOLD en présence de prosodie affective que durant les autres conditions, est localisé près de la "région sélective de la voix humaine" comme définie par ● (Belin *et al.*, 2000), ● (Belin et Zatorre, 2003), et ● (Kriegstein *et al.*, 2003).

Plus précisément, cette aire droite est activée au cours du traitement des **éléments paralinguistiques de la voix**, éléments qui permettent l'identification du genre du locuteur (Fecteau *et al.*, 2004b). En effet, son activité augmente encore plus lorsque l'on perçoit plusieurs locuteurs (Belin et Zatorre, 2003). De plus, cette région est plus activée lorsque la « prototypicalité » des voix est modifiée. Cette opération consiste à

accentuer dans les graves une voix féminine la rendant plus proche d'une voix masculine acoustiquement. Et inversement, en rendant les voix masculines plus aiguës, les expérimentateurs 'donnent à entendre' des voix plus féminines. De telles modifications des voix reviennent donc à perturber l'identification des locuteurs et donc les éléments paralinguistiques du discours. Cette perturbation qui présente un impact sur le recrutement de ASVH, confirme son implication dans le traitement paralinguistique de la communication orale (Lattner *et al.*, 2005). Cette fonction paralinguistique de ASVH droite est également confirmée par Grandjean et collaborateurs. Ils ont montré une asymétrie droite de ASVH lorsque les sujets devaient détecter le genre du locuteur pendant la présentation de pseudo-phrases à l'oreille gauche (Grandjean *et al.*, 2005).

A partir de ces résultats, nous émettons l'hypothèse que ASVH droite traite le contenu émotionnel de la voix à partir de **l'extraction des éléments acoustiques lents** (correspondant aux informations spectrales contenues dans une fenêtre temporelle longue) et caractéristiques de la prosodie affective (Pell, 1998; Monnot *et al.*, 2003). De fait, une telle compétence a déjà été mise en évidence comme une expertise du lobe temporal droit (Griffiths *et al.*, 1998; Belin *et al.*, 1998; Meyer *et al.*, 2002; Mitchell *et al.*, 2003; Wildgruber *et al.*, 2005).

b- La partie postérieure du gyrus temporal supérieur

La partie postérieure du gyrus temporal supérieur (pT1) est la deuxième région qui présentait une activité augmentant avec la présence de la prosodie affective dans notre étude. Ce résultat rappelle le modèle de Douglas Ross sur les corrélats neuraux de la prosodie affective (voir introduction, paragraphe I.2.B.b- , p16). A partir de l'observation de patients aprosodiques, il a postulé que l'organisation corticale droite pour la compréhension de la prosodie affective était similaire à celle de l'organisation gauche du langage propositionnel³³ (Ross, 1981). En fait, nous pouvons considérer pT1 droit comme l'homologue de l'aire de Wernicke, **région d'intégration supramodale**³⁴, considérée comme un épicentre du langage (Tzourio-Mazoyer, 2003). Elle correspond notamment à la région STSp qui permet l'intégration des informations lexicales pour la construction d'un énoncé, et donc la compréhension du message verbal (voir chapitre 1, paragraphe IV.C.a- , p62). ASVH extrairait les éléments acoustiques prosodiques, mais ces éléments n'ont pas

³³ Le langage propositionnel correspond à tous les éléments segmentaux du discours tel que les éléments phonologiques, sémantiques et syntaxiques.

³⁴ L'intégration supramodale est l'intégration des informations sans tenir compte de la modalité.

encore de signification. pT1 droit pourrait donc réaliser la **labellisation émotionnelle de ces éléments prosodiques**.

c- L'asymétrie des régions temporales impliquées dans le traitement prosodique affectif

Le système nerveux est symétrique, et on a longtemps pensé que les deux hémisphères cérébraux avaient les mêmes fonctions. Dax (1836) puis Broca (1821-1880) ont mis en évidence une spécialisation de l'hémisphère gauche pour le langage (Etard, 2003) : apparaît à cette même époque le terme de dominance cérébrale (1868, John Hughlings Jackson, cité par Springer et Deutsch, 2000). On parle de *dominance ou spécialisation hémisphérique* lorsque après une atteinte d'un hémisphère, un déficit important apparaît pour une fonction cognitive donnée, alors qu'une lésion équivalente de l'autre hémisphère ne provoque pas de trouble de cette fonction. La spécialisation hémisphérique a donc été définie tout d'abord à partir des données issues de la neuropsychologie. Actuellement, à partir des données de neuroimagerie, le calcul d'index de latéralisation hémisphérique à partir de données fonctionnelles apporte des résultats concordants avec ceux de la neuropsychologie pour définir la spécialisation hémisphérique (Hervé *et al*, sous presse).

Qu'en est-il de la prosodie affective ?

Nous avons vu que la neuropsychologie a mis en évidence une dominance hémisphérique droite pour le traitement de la prosodie affective (voir introduction, paragraphe I.2.B.b- , p16), tandis que la neuroimagerie montre plutôt une latéralisation droite de ce processus sans mesure direct de l'index d'asymétrie (Mitchell *et al.*, 2003; Wildgruber *et al.*, 2005; Grandjean *et al.*, 2005), voire pas de latéralisation du tout (Kotz *et al.*, 2003). Nos résultats confirment que le traitement prosodique affectif reposerait sur un recrutement temporel bilatéral comme les autres études de neuroimagerie mais que celui-ci est asymétrique en faveur de l'hémisphère droit³⁵. Cette asymétrie met donc bien en évidence la spécialisation hémisphérique droite pour la compréhension de la prosodie affective comme l'ont montré les études de neuropsychologie (Ross, 1981).

Par ailleurs, ce résultat renforce notre hypothèse qu'au cours des études d'imagerie fonctionnelle sur la prosodie affective, des **ressources hémisphériques gauches de nature lexicale** étaient engagées pour tenter d'appréhender le sens des stimuli filtré, c'est-à-dire sans contenu lexical (Meyer *et al.*, 2002; Kotz *et al.*, 2003) ou de

³⁵ Nous ne sommes pas passé par le calcul d'un index de latéralisation mais nous avons comparé directement l'activité régionale droite et gauche.

phrases construites avec des pseudo mots (Grandjean *et al.*, 2005). Ce résultat est également confirmé par Cathy Price et collaborateurs qui avaient déjà montré un plus grand engagement des ressources neurales lexicales au cours de la lecture de pseudo-mots que lors de la lecture de mots (Price *et al.*, 1996b; Grandjean *et al.*, 2005). Ceci explique pourquoi la latéralisation droite de la prosodie n'a pu être mise en évidence à partir de ces protocoles.

Mais pourquoi le traitement de la prosodie affective, élément important pour la compréhension du discours, est-il opéré principalement dans l'hémisphère droit ?

La latéralisation droite du traitement de la prosodie affective pourrait être expliquée par une des *théories sur la latéralisation des processus émotionnels*. En effet, l'hypothèse du système unique ou hypothèse de l'hémisphère droit de Mills (1912) propose que les processus émotionnels soient traités par l'hémisphère droit (cité par Murphy *et al.*, 2003). Cette hypothèse est issue de l'étude de cas de patients présentant des troubles de la reconnaissance des émotions sur des visages après atteinte de l'hémisphère droit (voir Hellige, 1993b pour une revue). Cependant, cette théorie a été remise en cause par des études sur la valence émotionnelle : des lésions de la partie antérieure de l'hémisphère droit provoqueraient des troubles de la reconnaissance des émotions négatives (*withdrawal processes*, processus d'évitement), tandis que la partie antérieure de l'hémisphère gauche répondrait plutôt aux émotions positives (*approach processes*, processus d'approche, Davidson, 1995). A l'heure actuelle, la latéralisation des processus émotionnel est toujours débattue. Cependant, un élément de réponse pourrait venir des méta-analyses. Lou Phan et son équipe ont montré que des régions cérébrales différentes traiteraient chaque émotion (Phan *et al.*, 2002). Ce résultat a été confirmé par Murphy et collaborateurs, élaborant la théorie des programmes affectifs : à chaque émotion son réseau neural (Murphy *et al.*, 2003). Ayant utilisé plusieurs émotions et attitudes dans notre protocole, nous ne pouvons discuter nos résultats du point de vue de cette perspective.

Une autre alternative pour comprendre la latéralisation des processus prosodiques serait de s'intéresser à la *musique*. En effet, la prosodie est désignée dans le langage courant par l'expression 'mélodie du langage'. Le parallèle entre musique et langage est un sujet encore débattu, mais une revue de la littérature montre que les similitudes et les différences dépendent du niveau d'analyse auquel on se place (Besson et Schon, 2001). Des études récentes d'imagerie montrent qu'il existe au niveau cortical des régions communes au traitement de la musique et du langage (Koelsch *et al.*, 2002; Levitin et Menon, 2003; Koelsch *et al.*, 2004). Cependant, le traitement des aspects ortholinguistiques du langage -

niveau phonologique, lexical et syntaxique- serait latéralisé à gauche, tandis que la musique serait traitée préférentiellement par l'hémisphère droit (Springer et Deutsch, 2000). Plus précisément, Junko Murayama et coauteurs ont rapporté le cas d'une femme atteinte d'amusie après lésion de l'hémisphère droit, qui présente également des troubles de la production de la prosodie émotionnelle (Murayama *et al.*, 2004). Ces auteurs ont montré que c'était plus particulièrement la production de l'intonation, correspondant principalement à la fréquence fondamentale, qui était altérée chez cette patiente, élément acoustique important tant pour la prosodie que la musique.

Diana Van Lancker et John Sidtis ont montré que la latéralisation des processus prosodiques dépendraient des éléments acoustiques qui la caractérisent (Van Lancker et Sidtis, 1992). Leurs résultats vont dans le sens de la *théorie sur la latéralisation des traitements acoustiques* proposé par Robert Zatorre (CLT: cued-lateralized theory). Elle postule que la résolution spectrale serait opérée principalement par les régions corticales auditives droites tandis que la résolution temporelle serait traitée de manière optimale par les régions gauches (Zatorre et Belin, 2001; Zatorre *et al.*, 2002; Tervaniemi et Hugdahl, 2003). Par ailleurs, des études récentes ont montré que cet effet de latéralisation était présent dans le sillon temporal supérieur et non dans les régions auditives primaires (Warren *et al.*, 2005).

La question est donc de savoir si les éléments acoustiques spectraux sont plus saillants pour la compréhension de la prosodie affective. La fréquence fondamentale (ou F0) est l'élément spectral acoustique qui définit la prosodie affective (chapitre introduction, paragraphe I.2.A.a- , p11). Des auteurs ont montré que c'était un élément important dans la reconnaissance des émotions³⁶ (Scherer, 1986; Van Lancker et Sidtis, 1992; Pell et Baum, 1997; Pell, 1998) et qu'il expliquerait à lui seul 50% d'exactitude de la catégorisation émotionnelle (Monnot *et al.*, 2003). La fréquence fondamentale des phrases énoncées par les acteurs, donc véhiculant de la prosodie affective, variait en amplitude tandis que la fréquence fondamentale des phrases affectives produites sans prosodie affective par Kali était plate comme celles des phrases neutres (Figure 46). Ainsi la plus grande variation de la fréquence fondamentale, et donc des propriétés spectrales, entre nos stimuli plaide en faveur de l'asymétrie droite de leur traitement selon la théorie de Robert Zatorre. En effet, dans notre étude, les régions le long de STS impliquées dans la compréhension de la prosodie affective présentent une asymétrie droite tandis que le gyrus de Heschl était recruté de manière bilatérale.

³⁶ La qualité vocale (ou timbre) est également importante pour la reconnaissance des émotions (Morel et Bänziger, 2004).

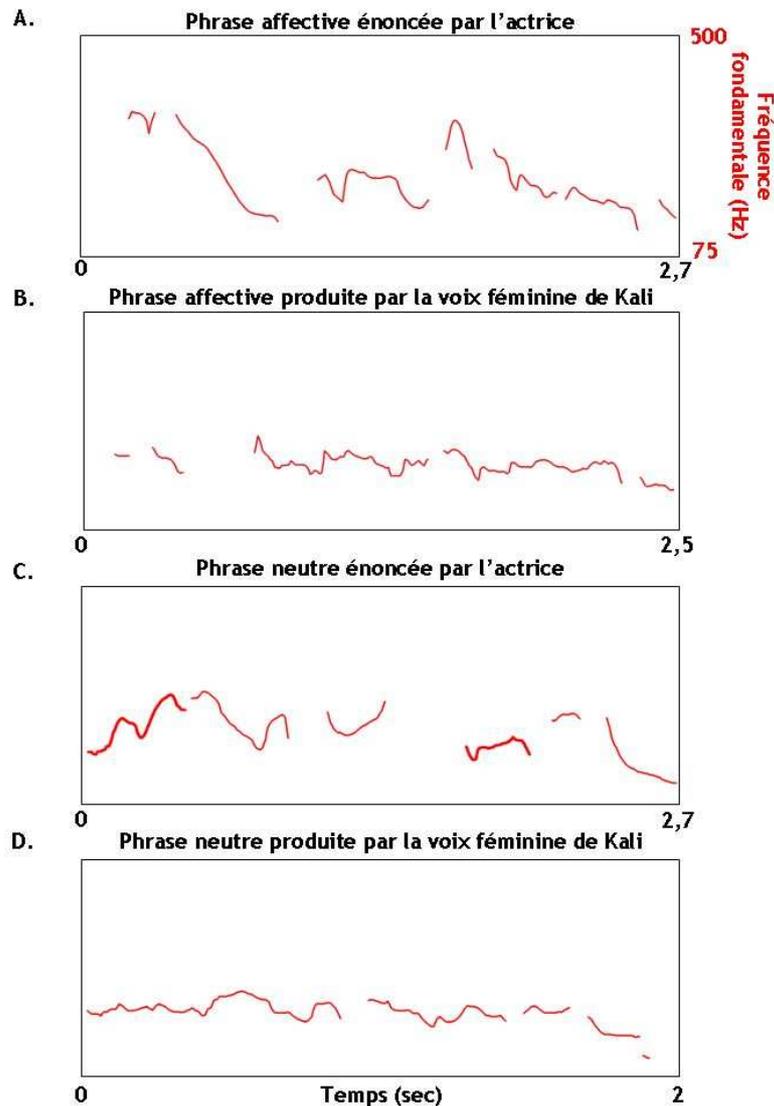


Figure 46. Contours intonatifs du corpus de la présente étude

La fréquence fondamentale (ordonnée droite, ligne rouge) est donnée en fonction du temps (ms, abscisse) pour la phrase avec un contenu lexical affectif “Super, j’ai gagné beaucoup d’argent au loto” (A) énoncées par l’actrice et (B) produites par la voix féminine de Kali et pour la phrase avec un contenu lexical neutre “J’ai rangé mes vêtements dans le placard” (C) énoncées par l’actrice et (D) produites par la voix féminine de Kali.

➤ Asymétrie de la région antérieure du sillon temporal supérieur

La prosodie qu’elle soit affective ou grammaticale est définie par des éléments temporeux et spectraux, donc nécessite selon le théorie de Robert Zatorre un recrutement bilatéral que nous avons observé dans la tâche de classification affective en présence de prosodie affective, mais également dans les autres conditions.

Rappelons, tout d’abord, l’hypothèse du rôle de T1a gauche : cette région serait en charge du traitement des éléments temporels de la prosodie (grammaticale du mot à la phrase, et affective, voir chapitre 1, p57). Ce cluster T1a à gauche correspond à l’homologue de aSTS, puisque ces régions sont toutes les deux proches de la région sélective de la voix humaine qui est activée de manière bilatérale (Belin *et al.*, 2004). Or,

la présente étude de neuroimagerie montre que la région aSTS gauche serait bien recrutée au cours des quatre conditions expérimentales qui nécessitent toute le traitement de la prosodie. Tous les stimuli utilisés étaient énoncés avec la prosodie grammaticale correspondante que ce soit les phrases neutres, les phrases produites par Kali ou énoncées par les acteurs. Ainsi chacune des phrases à classer présentait des éléments acoustiques temporels spécifiques de la prosodie. Il n'était donc pas étonnant de retrouver l'implication de la région aSTS/T1a gauche dans le traitement de tous les types de stimuli. Mais ces stimuli contenaient également des éléments spectraux à traiter. Cependant, pour réaliser la tâche de classification affective sur les phrases énoncées par les acteurs, il était très important de traiter les éléments acoustiques spectraux porteur de message émotionnel de la prosodie. Ce traitement essentiel a entraîné une latéralisation droite plus importante de cette région en présence de prosodie affective. En son absence aucune différence de latéralisation n'était donc mise en évidence.

Ainsi aSTS serait recrutée de manière bilatérale pour traiter les éléments acoustiques prosodiques. Une différence de latéralisation ne serait donc mise en évidence que lorsque le traitement des phrases incluant de la prosodie affective nécessite le traitement de la fréquence fondamentale.

➤ **Asymétrie dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur**

Nous avons montré que la partie postérieure du sillon temporal supérieur droit (pSTS) était en charge de la labellisation des informations émotionnelles véhiculées par la prosodie affective. Cette labellisation doit être ensuite intégrée aux informations de nature phonologico-syntactico-lexicale qui sont analysées par l'homologue gauche (STSp). Cette intégration pourrait se faire via le **transfert transcalleux** de ces deux types d'information afin d'aboutir à une compréhension complète du message affectif. Ce postulat de communication transcalleuse est issu du modèle d'organisation neurale de la prosodie affective issu des travaux de neuropsychologie mené par Douglas Ross (voir introduction, paragraphe I.2.B.b- , p16, (Ross *et al.*, 1997)). En effet, suite aux travaux de Lynn Speedie qui montrent que des patients souffrant de lésions de l'hémisphère gauche étaient aprosodiques (Speedie *et al.*, 1984), Douglas Ross a proposé, toujours à partir de l'étude de cas d'aprosodie, que les contenus prosodique et lexical soient intégrés via le corps calleux pour compléter la compréhension de la prosodie affective. Ce modèle

d'intégration transcalleuse a été confirmé par la suite à partir de l'observation d'aprosodie chez des patients présentant des agénésies³⁷ du corps calleux (Paul *et al.*, 2003).

La latéralisation de la partie postérieure du sillon temporal supérieur traduit une différence dans le type d'informations à traiter. La partie droite serait impliquée dans le traitement des éléments paralinguistiques de la prosodie affective, tandis que la partie gauche serait en charge de la construction du sens des éléments ortholinguistiques. L'intégration essentielle à la compréhension du message verbal se ferait alors via la communication transcalleuse.

D. Réduction de l'activité de l'amygdale et de la boucle audio-phonatoire lorsque la prosodie est incongruente avec le contenu lexical affectif du discours

Tout comme les régions temporales droites que nous venons de décrire, les amygdales, les gyri précentraux et le gyrus de Heschl gauche présentaient une plus grande activité BOLD pendant la classification affective réalisée sur des phrases contenant de la prosodie affective que lorsque cette tâche était réalisée sur des phrases dépourvues de prosodie affective. Mais contrairement aux autres régions, cette augmentation était liée à une diminution d'activité pendant la tâche de classification affective en l'absence de prosodie affective (voir paragraphe III.2.B.c- , p124).

L'activité de ces régions était comparable au cours de la tâche de classification grammaticale et au cours de la tâche de classification affective en présence de prosodie affective (Figure 34, p127). La diminution d'activité que l'on observe en l'absence de prosodie n'était pas liée à l'utilisation de Kali le logiciel de synthèse de parole puisque, rappelons-le, l'écoute de stimuli produits par Kali n'a aucun impact neural ou comportemental au cours de la tâche de classification grammaticale. Cette diminution était probablement liée au fait que Kali produit des phrases affectives dont les **contenus lexicaux et prosodiques sont incongruents**. Ces phrases produites par Kali contiennent une prosodie grammaticale appropriée, mais sur le plan de la prosodie affective, elles présentent une valence neutre, incongruente avec le fort champ lexical³⁸ des mots qui constituent ces phrases. Ces diminutions de débit pourraient donc être interprétées

³⁷ Défaut de développement du corps calleux.

³⁸ Le champ lexical est un groupement de termes exprimant une même idée.

comme une **suppression du traitement de la prosodie incongruente qui interfère avec la compréhension du contenu lexical des phrases**. En effet, les diminutions du signal BOLD peuvent être considérées comme des indicateurs de la réduction des courants électriques locaux dans les régions corticales (Logothetis *et al.*, 2001).

Cette inhibition du traitement des phrases affectives produite par Kali pourrait intervenir au niveau de deux systèmes : les amygdales, et la boucle audio-phonatoire.

a- L'amygdale

Le premier système est composé de l'amygdale bilatérale. Cette région est classiquement décrite comme engagée dans le *traitement des émotions* (pour une revue voir Adolphs, 2002). Mais son rôle a été récemment redéfini à travers des résultats obtenus en neuroimagerie. Certains auteurs ont montré que l'amygdale était activée durant la présentation de visages émotionnels et de visages neutres (Kesler-West *et al.*, 2001), durant l'induction émotionnelle par écoute de rires et de pleurs ainsi que durant la détection de changement d'intonation sur les mêmes stimuli (Sander *et al.*, 2003). Ceci laisserait penser que l'amygdale n'est pas sensible au traitement des émotions *per se*.

Par ailleurs, il a été montré que les marqueurs acoustiques des cris sociaux de singes écureuils (Saïmiri commun ou singe à tête de mort) étaient proches de ceux d'une syllabe prononcée par l'homme avec différentes intonations révélant la panique, la rage ou la tendresse (Jurgens, 1986). Or une étude en TEP chez le singe macaque montre que l'écoute de cris sociaux (*i.e.* vocalisation pour la localisation de nourriture, attaque par un singe dominant) d'autres individus de la même espèce provoque l'activation des aires auditives mais aussi limbiques, comme l'amygdale (Gil-da-Costa *et al.*, 2004). Ces cris ont un rôle majeur dans la cohésion sociale de ces singes qui vivent en groupe. Il est donc important de noter que des structures équivalentes chez l'homme puissent être également recrutées en **condition de relation sociale**. Or nous avons vu que notre protocole avait potentiellement placé le sujet dans une situation de communication (voir paragraphe III.3.B.b- B.b- , p138). Cet argument est donc en faveur d'un rôle plus large pour l'amygdale que le simple traitement des émotions.

Une explication du rôle de l'amygdale particulièrement intéressante vient d'une étude d'imagerie fonctionnelle sur la présentation d'images décrivant des scènes sociales et / ou émotionnelles. Les résultats de cette étude montrent que l'amygdale est sensible à la fois à la composante émotionnelle et à la composante sociale (Norris *et al.*, 2004), composantes pertinentes pour interpréter les interactions humaines. Ces informations sont complémentaires et congruentes. Les auteurs ont donc postulé que l'amygdale répond plutôt à des **stimuli pertinents porteurs d'une signification personnelle**.

En quoi cette notion de ‘pertinence personnelle’ des informations sociales pourrait expliquer le profil d’activité de l’amygdale dans notre étude ?

L’amygdale n’est recrutée dans notre protocole que lorsque les contenus lexical et prosodique sont congruents comme c’est le cas pour la tâche de classification affective des phrases à contenu lexical affectif véhiculant de la prosodie affective et pour la tâche de classification grammaticale de phrases neutres avec une prosodie grammaticale neutre émotionnellement. Lors de la réalisation de la tâche de classification affective de phrases dépourvues de prosodie affective, les informations prosodiques et lexicales sont incohérentes et il n’est donc pas pertinent pour la réaliser d’analyser ces deux informations contradictoires. Donc selon l’hypothèse de la pertinence nécessaire à la mise en jeu de l’amygdale, elle ne doit pas être recrutée dans la classification des phrases affectives produites sans prosodie affective.

Par ailleurs, des études de *neuropsychologie* ont été menées sur le rôle de l’amygdale dans le traitement de la prosodie. Si certains auteurs ont montré qu’une lésion bilatérale de l’amygdale provoquait un déficit de compréhension de la prosodie émotionnelle (Scott *et al.*, 1997), d’autres ont trouvé au contraire qu’elle n’était pas nécessaire (Adolphs et Tranel, 1999). Cette divergence de résultats pourrait être expliquée par une différence des stimuli utilisés pour la tâche de reconnaissance de la prosodie émotionnelle. Scott et coauteurs utilisent des stimuli dont les contenus lexical et prosodique sont congruents tandis que dans l’étude d’Adolphs et collaborateurs la reconnaissance de l’intensité émotionnelle est réalisée sur des phrases dont le contenu lexical neutre est incongruent avec la prosodie émotionnelle appliquée. Or la patiente de l’étude de Scott ne peut réussir la tâche alors que les patients de l’étude d’Adolphs peuvent la réussir. Ces résultats montrent donc, que dans le cas où les contenus sont incongruents, la lésion de l’amygdale n’entraîne pas de déficit de traitement émotionnel comme chez les patients de l’étude d’Adolphs, par contre dans la condition congruente, la lésion de l’amygdale de la patiente de l’étude de Scott entraîne une incapacité à réaliser la tâche. En d’autres termes, l’amygdale est nécessaire au traitement de stimuli congruents et pourrait ne pas être recrutée lorsqu’ils ne le sont pas.

b- Le gyrus de Heschl et les gyri précentraux

Le deuxième système qui présente une moindre activation lors de la classification affective en absence de prosodie affective est composé du gyrus de Heschl à gauche et des gyri précentraux.

La théorie motrice du langage postule que la compréhension du langage repose sur la mise en jeu de la boucle audio-phonatoire (Liberman et Whalen, 2000). Et d’après la

théorie de la représentation basée sur le son du discours (Hickok et Poeppel, 2000), cette boucle intervient dans la compréhension du langage par sa simulation audio-phonatoire (voir chapitre 1, paragraphe IV.A.c- , p56). En effet, le décodage phonologique, prémisses à l'intégration lexicale du langage, reposerait sur la simulation mentale des gestes articulatoires correspondant au contenu verbal devant être interprété (voir chapitre 1, paragraphe, p).

Or, le gyrus de Heschl à gauche est impliqué dans des tâches de production verbale (Bookheimer *et al.*, 2000) ou lors de mouvements orolaryngés (Braun *et al.*, 1997). Ces tâches recrutent également l'aire de la bouche (Fox *et al.*, 2001) qui correspond à nos gyri précentraux. Nous avons montré que ces régions audio-phonatoires sont non seulement recrutées dans des tâches de production mais aussi dans des tâches de compréhension plaçant en faveur de la théorie motrice du langage (Vigneau *et al.*, 2006). Par ailleurs, les travaux de Hans Pihan et collaborateurs ont montré que la répétition mentale de phrases avec prosodie faisait bien appel au système d'articulation subvocal (Pihan *et al.*, 1997). Dans notre étude, la simulation du discours qui inclut une prosodie discordante a besoin d'être atténuée. Les sujets ne doivent pas répéter la prosodie inappropriée, pouvant expliquer pourquoi cette boucle audio-phonatoire n'est pas recrutée lors de la classification affective de phrases à contenu lexical affectif en absence de prosodie affective.

4. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de distinguer les réseaux impliqués dans les processus lexical et prosodique de la phrase affective. Les points de vue de la neuropsychologie des aprosodies et des études d'imagerie fonctionnelle ont été harmonisés en confirmant que le lobe temporal droit est essentiel à la compréhension de la prosodie affective mais que ce rôle incombe également, mais dans une moindre mesure, à la région homologue gauche. En effet, ASVH droite avec la partie postérieure du gyrus temporal supérieur droit semblent traiter la prosodie affective en partenariat avec leurs homologues gauches.

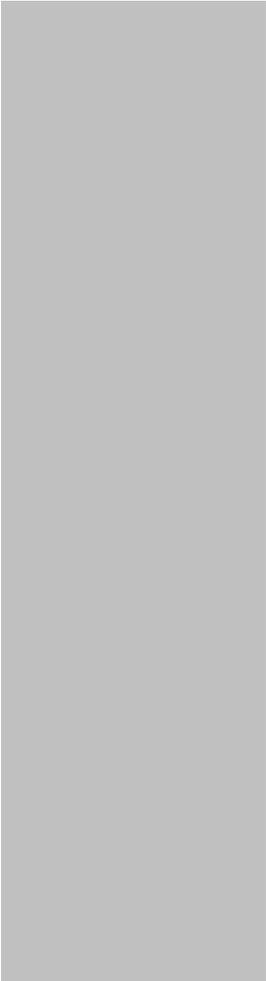
De plus, l'utilisation de phrases à contenu lexical et syntaxique équivalent nous a permis de montrer que la pars orbitaris du gyrus frontal inférieur droit n'est pas liée à la présence de prosodie émotionnelle per se mais plutôt à la présence de mots émotionnels. Enfin nous avons montré que la théorie de l'esprit intervient dans la compréhension de la phrase affective.

Nos résultats ouvrent de nouvelles perspectives : le discours émotionnel conduit à l'activation de systèmes cérébraux qui permettent de configurer le cerveau dans un mode d'interaction sociale. C'est-à-dire que le discours émotionnel induit chez l'interlocuteur une activation des réseaux neuraux lui permettant de comprendre, au delà du contenu lexico-syntaxique, le contenu social du message.

Tout d'abord, **ASVH** a été identifiée comme une région traitant la prosodie affective. Or le rôle de ASHV dans l'hémisphère droit peut être étendu aux traitements des interactions sociales de type émotionnel. En effet si les patients présentant des lésions dans l'hémisphère droit sont déficients dans la compréhension de la prosodie affective (Ross, 1981), ils montrent également un déficit dans l'identification des émotions sur les visages (Blonder *et al.*, 1991). En fait, ASHV présente des connexions préférentielles avec la région des visages localisée dans le gyrus fusiforme droit (FFA : *fusiform face area*) pendant l'identification du locuteur (Kriegstein *et al.*, 2005). Ce qui implique que la fonction paralinguistique de cette région droite peut être élargie non seulement au traitement de la voix mais aussi à celui des visages. Une co-existence de ces deux rôles dans cette région semble importante pour traiter les situations d'interactions sociales. En effet, les enfants autistes -enfants qui présentent des troubles des interactions sociales (Frith, 2001)- présentent un déficit d'activité (Gervais *et al.*, 2004) et de densité de matière grise et blanche (Boddaert *et al.*, 2004) dans ASVH droite ainsi que dans FFA (Pierce *et al.*, 2001; Schultz, 2005) pouvant expliquer de tels troubles.

Le deuxième indicateur qui renforce l'hypothèse selon laquelle le réseau cérébral mis en évidence dans cette étude est lié à la cognition sociale est le recrutement du **réseau de la théorie de l'esprit** pendant la compréhension du discours émotionnel. Ce résultat est en accord avec les observations de Brüne qui montre que la théorie de l'esprit est en permanence activée chez l'homme, même lorsqu'il perçoit des objets non vivants (Brüne, 2005).

Bien que cela reste à confirmer, nous pensons que la coopération de la théorie de l'esprit et des systèmes émotionnels permet une communication verbale émotionnelle adéquate voire optimale. De fait, les patients schizophrènes, qui souffrent de troubles d'ordre social, présentent à la fois des déficits émotionnels, prosodiques et de l'inférence des états mentaux (Brüne, 2005).



Conclusion et perspectives

I. CONCLUSION

Les résultats obtenus au cours de cette thèse peuvent être synthétisés sous la forme d'un modèle neurolinguistique des bases neurales de la compréhension de la phrase à contenu lexical et prosodique affectifs, depuis le traitement phonologique pour parvenir jusqu'au niveau le plus intégré, qui correspond à la théorie de l'esprit (Figure 47).

Au niveau de la phrase, le message verbal émotionnel transmis par le locuteur est constitué des éléments ortholinguistiques correspondant au contenu phonologique, au contenu lexico-syntaxique auxquels s'ajoutent la dimension affective (contenu lexical affectif), et un élément paralinguistique, la prosodie affective. Ces différents éléments seraient traités au niveau cérébral par des circuits neuraux partiellement distincts qui interagiraient pour aboutir à la compréhension du message par l'interlocuteur.

Les bases neurales du traitement ortholinguistique du contenu lexico-syntaxique neutre ont pu être mises en évidence grâce à une tâche de classification grammaticale de phrases à contenu lexical neutre. Ce type de traitement requiert l'activation d'un réseau neural fronto-temporal bilatéral. Afin de comprendre plus précisément le rôle de ce réseau, une méta-analyse a été menée sur les bases neurales des fonctions ortholinguistiques du langage. Les résultats obtenus montrent que le **niveau phonologique** serait décodé et gardé en mémoire par un mécanisme de répétition mentale opéré par la boucle phonologique, en partie, présente dans les deux hémisphères (Figure 47, voir chapitre 1, p52).

Les mouvements articulatoires nécessaires pour émettre ce message verbal seraient représentés dans la partie frontale de cette boucle après le décodage phonologique des sons du langage dans sa partie temporale (bleu clair). Ces deux régions communiqueraient via des fibres du faisceau arqué (flèche bleu clair). La convergence des traitements réalisés à droite et à gauche serait assurée par l'aire motrice supplémentaire (bleu, sur la vue de haut du cerveau), et des échanges *transcallaux*. Le mécanisme de répétition mentale silencieuse participerait à la compréhension et de ce fait à la réalisation de la tâche de classification affective d'un message constitué d'éléments lexico-syntaxiques et prosodiques cohérents (voir chapitre 2, p156).

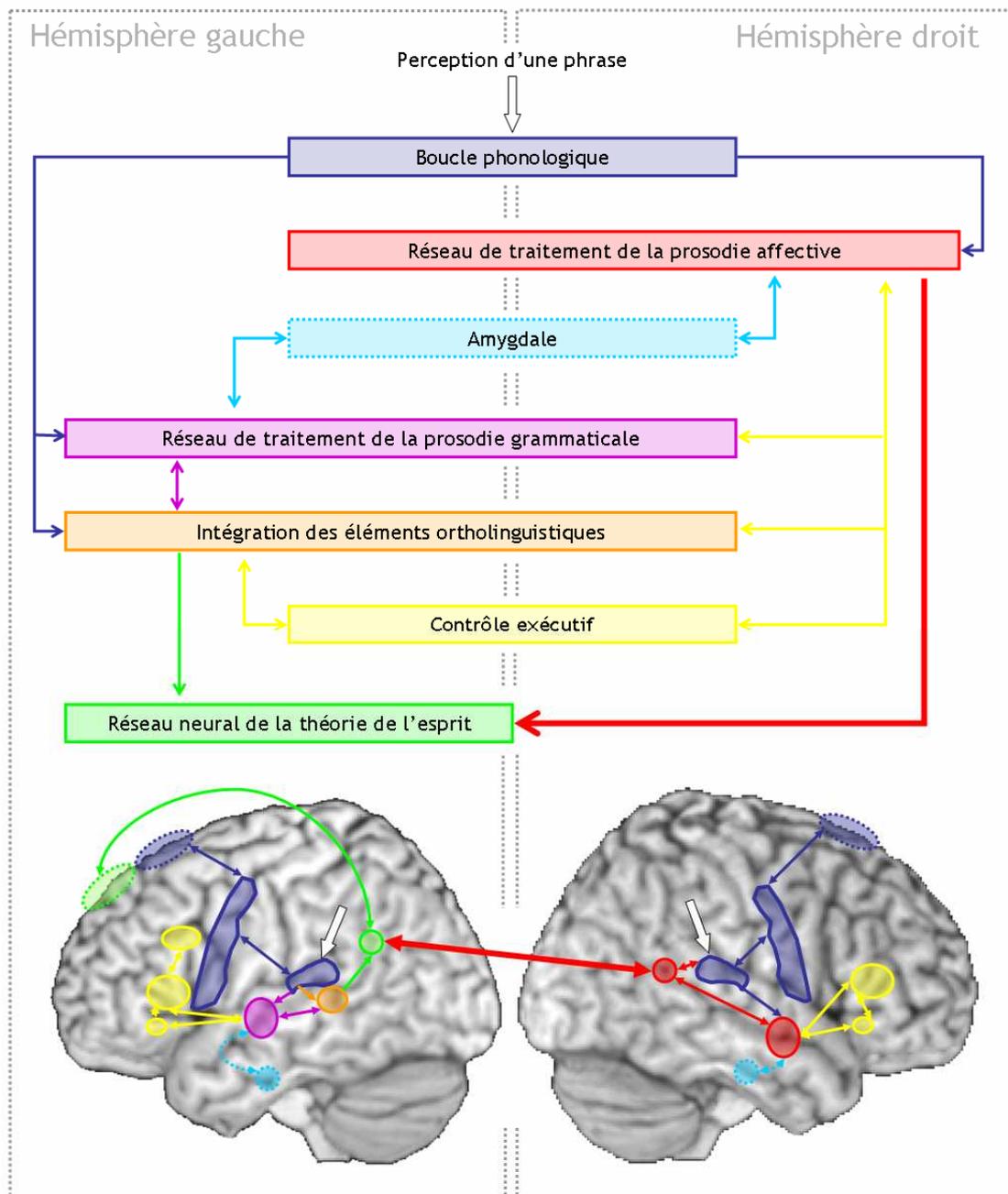


Figure 47. Modèle d'organisation neurale de la compréhension de la phrase affective.

Pour représenter ce modèle, en A sont données les principales fonctions cognitives mises en jeu par l'interlocuteur, en B sont représentés les bases neurales de ses fonctions (voir légende sur la figure).

Le niveau suivant d'analyse du message serait le **décodage du contenu lexicosyntaxique**. Après le traitement de la structure phonologique, le sens de l'énoncé va être attribué. Cette attribution du sens reposerait sur la *voie temporelle postérieure* qui suit le sillon temporel supérieur (Figure 47, flèches orange : du bleu au orange jusqu'au vert à gauche, du bleu au rouge à droite, voir chapitre 1, p72). Ce traitement est réalisé sous le

contrôle exécutif des régions frontales (Figure 47, jaune pâle, voir chapitre 1) via le faisceau arqué (non symbolisé ici). Cette attribution de sens s'accompagne d'une analyse acoustique de la prosodie grammaticale réalisée dans la partie antérieure du sillon temporal supérieur gauche (Figure 47, violet) et, dans une moindre mesure, droit (Figure 47, rouge), (Meyer *et al.*, 2004). Cette région répondrait sélectivement à la voix humaine et est également impliquée dans la reconnaissance du locuteur (Belin *et al.*, 2004). Le relais entre les aires auditives temporales et cette région de la voix humaine forme la *voie temporale antérieure* qui suit le sillon temporal supérieur. Elle serait reliée aux régions frontales de contrôle via le faisceau unciné (Figure 47, flèche noire, voir chapitre 1, p72).

Le deuxième type de traitement nécessaire à la compréhension de la phrase affective est le **traitement ortholinguistique du contenu lexico-syntaxique affectif**. La classification affective de phrases à contenu lexical affectif, en présence ou non de prosodie affective, a entraîné une recrudescence de l'activité des régions frontales inférieures exécutives en charge de la manipulation et du maintien des informations lexicales. Ces régions étaient notamment impliquée au cours de la catégorisation lexicale (Adams et Janata, 2002), opération réalisée pour résoudre la tâche. Ce réseau neural frontal impliqué dans le traitement ortholinguistique traiterait donc le contenu lexical quelle que soit sa couleur affective. Seule une implication plus importante de ce réseau mettrait en évidence la présence d'un contenu lexical affectif à traiter explicitement. Une autre explication pourrait provenir du fait que cette activation plus important de ces régions frontales serait liée à la tâche explicite effectuée par les sujets : classer les phrases suivant leur contenu lexical affectif (comme le montre le premier modèle neurolinguistique du traitement prosodique, Schirmer et Kotz, 2006; Kotz *et al.*, sous presse).

Parallèlement au traitement du contenu lexico-syntaxique, le traitement de la **prosodie affective** serait réalisé dans la partie antérieure du sillon temporal supérieur, puis dans la partie postérieure, à partir des éléments acoustiques contenus dans la voix. Ces régions étaient recrutées au sein de l'hémisphère gauche mais plus encore au sein de l'hémisphère droit. La *partie antérieure* droite ou région sélective de la voie humaine permettrait l'extraction des éléments acoustiques pertinents de la prosodie, et notamment des éléments acoustiques qui véhiculent le contenu affectif de la prosodie (fréquence fondamentale notamment, voir chapitre 2, p149). La partie antérieure gauche serait impliquée dans le traitement des autres éléments acoustiques caractéristiques de la

prosodie affective et grammaticale, notamment les éléments temporels (voir chapitre 1, p57).

La *partie postérieure* droite serait, elle, en charge de l'attribution d'un sens affectif à ce message, tandis que la région homologue gauche serait impliquée dans le traitement du contenu lexico-syntaxique (chapitre 1, p62, chapitre 2, p149).

Ces deux régions étaient également recrutées bilatéralement par le traitement de matériel affectivement neutre, montrant qu'elle ne traite pas uniquement le message affectif. Cependant, les régions temporales droites ont connu une recrudescence d'activité en présence de prosodie affective, sans doute sous l'influence de l'amygdale (rose) et de la boucle articulatoire qui détecteraient la cohérence entre contenus affectifs lexico-syntaxiques et prosodiques (voir chapitre 2, p154). Ce contrôle, qui pourrait favoriser l'intégration du contenu lexical traité principalement dans l'hémisphère gauche au contenu prosodique affectif principalement traité dans l'hémisphère droit, est indispensable à la compréhension aboutie du message affectif, et serait réalisé via le transfert transcalleux de ces deux types d'informations au niveau de la partie postérieure du sillon temporal postérieur. Cette **communication inter-hémisphérique** assurerait le partage et surtout l'intégration des informations traitées par chaque réseau et permettrait une compréhension pleine et entière par l'interlocuteur du message affectif envoyé par le locuteur.

En prenant en compte la dimension ortholinguistique des énoncés, nous avons pu montrer que la latéralisation du réseau neural en charge dans le traitement de la prosodie affective était bien en faveur de l'hémisphère droit, réconciliant neuroimagerie et neuropsychologie sur ce point.

En plus de ces réseaux de traitement ortholinguistique et pragmatique, le *réseau de l'inférence mentale* est également recruté au cours de la classification affective. Cette participation semble être liée à la présence d'un contenu lexical affectif (voir chapitre 2, paragraphe, p). Après décodage du message lexical dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur gauche (vert) et l'intégration des informations prosodiques affectives traitées dans la région homologue droite, l'attribution des intentions du locuteur serait réalisée dans la partie médiane du gyrus frontal supérieur (vert). La construction de notre paradigme a été menée dans l'objectif de placer les sujets dans une situation de communication le plus proche possible des interactions verbales sociales. Ceci a sans doute permis l'observation du réseau neural de la théorie de l'esprit, nécessaire aux interactions sociales. Ce protocole pourrait avoir déclenché la configuration du cerveau pour

l'interaction humaine. Il pourrait fournir quelques pistes de réflexions pour l'étude du « cerveau social » (Blakemore *et al.*, 2004).

II. PERSPECTIVES

Ce modèle a permis de faire une synthèse des résultats de ce travail de thèse, et a servi de base de réflexion sur les questions restées en suspend sur la compréhension des bases neurales de la communication affective. Il devra donc être complété, voire corrigé. En effet, si les relations fonctionnelles entre les différentes régions corticales reposent en partie sur des études de connectivité, l'organisation temporelle et fonctionnelle de ce réseau de régions reste encore à explorer. On peut pour cela utiliser des techniques de modélisation (équations structurales, dynamic causal modelling) qui permettent d'observer les interactions régionales au sein d'un modèle.

Comme nous allons le voir, ce travail de thèse se poursuit par ailleurs dans trois directions : tout d'abord comprendre le rôle des régions corticales droites dans le traitement ortholinguistique, puis par la recherche d'un éventuel effet du genre au cours de la communication affective (Besson *et al.*, 2002), et enfin, en faisant le lien entre les processus émotionnels et l'inférence de l'état mental au niveau neural.

A. Le rôle des régions corticales de l'hémisphère droit au cours du traitement ortholinguistique du langage

La question de l'implication des régions corticales droites dans le traitement ortholinguistique a été posée par leur recrutement au cours de la classification des phrases neutres. Des études sur les patients callosotomisés (ayant subi une résection chirurgicale du corps calleux) montrent que l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche n'ont pas les mêmes fonctions ortholinguistiques au cours de la compréhension du langage (Gazzaniga, 2000).

Afin d'évaluer le rôle de ces régions dans ce type de processus, une méta-analyse des données issues des études incluses dans la méta-analyse de l'hémisphère gauche, est

en cours de réalisation. Nous allons classer les pics de l'hémisphère droit en deux catégories selon qu'ils présentent ou non un pic homologue en terme de contraste et de localisation dans l'hémisphère gauche. Le rôle des régions droites pourrait ainsi être discuté en fonction des contrastes et du nombre de pics homotopes afin de **distinguer l'existence des régions impliquées dans un traitement spécifique de l'hémisphère droit et de régions participant au même type de traitement que les régions de l'hémisphère gauche.**

B. L'effet genre sur le réseau neural de la compréhension de la phrase affective

Il est communément admis que hommes et femmes n'appréhendent pas le monde de la même manière (Halpern, 2000; Kimura, 2001). Si les femmes seraient plus performantes dans l'encodage et le rappel des éléments en mémoire verbale à long terme, les hommes seraient plus aptes à manipuler des éléments en mémoire de travail visuo-spatiale (Halpern, 1997). Les théories actuelles proposent qu'un mélange entre influence culturelle (acquis, « *nurture* ») et différences liées à la génétique et aux taux d'hormones sexuelles (inné, « *nature* ») sont à l'origine des différences entre hommes et femmes (Halpern et Tan, 2001). Dans la suite de nos travaux, il serait intéressant d'étudier les différences concernant les bases neurales de l'écoute de phrases affectives entre homme et femme. En effet, dans l'étude psycholinguistique, des différences comportementales ont été mises en évidence (voir chapitre 2, paragraphe II.3.A, p90) : les femmes réalisaient de meilleures performances que les hommes à la tâche de classification affective. La question est donc de savoir si cette différence comportementale se reflète au niveau cérébral.

Des études sur la **perception des émotions** chez les hommes et les femmes ont donné lieu à l'hypothèse du *style cognitif* (Hellige, 1993a; Canli *et al.*, 2002). Cette théorie postule que les hommes et les femmes recruteraient des réseaux différents pour atteindre de bonnes performances. Chacun utiliserait ses meilleures ressources pour résoudre les tâches. Sur le plan des émotions, les femmes percevraient mieux et encoderaient mieux que les hommes les images émotionnelles (Canli *et al.*, 2002). Quand est-il des fonctions langagières émotionnelles ?

En ce qui concerne la **prosodie affective**, une seule étude s'est attachée à explorer succinctement les différences liées au genre (Wildgruber *et al.*, 2002). Ces auteurs ont montré que les hommes recrutaient plus le gyrus frontal moyen droit pour comparer l'expressivité de deux **phrases**, à contenu lexical neutre, produites avec une prosodie

émotionnelle dont les paramètres acoustiques varient entre les deux stimuli, alors que les femmes recrutent plus le gyrus temporal moyen gauche. Mais la plus importante littérature concernant l'effet du genre sur le traitement de la prosodie provient d'études en ERP (event-related potential ou potentiels évoqués, Besson *et al.*, 2002). L'équipe de chercheurs menée par Annett Schirmer montrait que les femmes traiteraient la prosodie émotionnelle plus **précocement** que les hommes (Schirmer *et al.*, 2002) et de manière plus **automatique** (Schirmer *et al.*, 2005a). L'étude en IRMf qui a suivi ces travaux en ERP montrait que le traitement de la prosodie émotionnelle, au **niveau du mot**, faisait appel à un recrutement plus important du gyrus frontal inférieur gauche chez les femmes (Schirmer *et al.*, 2004). Ces résultats montrent donc que le réseau de la compréhension de la phrase affective au niveau de la phrase pourrait être modulé par le genre. C'est pourquoi une nouvelle analyse des données de notre étude IRMf sur la compréhension de la phrase affective est en cours afin d'évaluer l'influence du genre sur les réseaux neuraux. Par ailleurs, il faudra déterminer si cette différence fonctionnelle entre homme et femme est liée à la compréhension d'un message verbal, à la dimension affective du discours et / ou à la présence de prosodie affective. Autrement dit, il faudra déterminer si **les différences entre hommes et femmes sont indépendants ou dépendants de la condition de communication dans laquelle ils se trouvent.**

C. Relation entre théorie de l'esprit et émotion

En philosophie, on décrit une relation forte entre émotion et théorie de l'esprit. Mais cette vision des émotions n'est pas la plus répandue en neurosciences (Houdé *et al.*, 1998). En effet, historiquement l'étude des émotions a été réalisée chez l'animal grâce aux travaux de Charles Darwin. Il a montré que les expressions faciales des animaux et de l'homme étaient assez proches (*The expression of the emotions in Man and Animals*, 1872). Ces résultats ont permis d'explorer les mécanismes neuraux sous-tendant les réactions émotionnelles chez l'animal (Ledoux, 2002). Cependant, les mécanismes d'états internes émotionnels (comme les sentiments, Damasio, 2001) n'ont pu être explorés car seul le comportement a été étudié. Il en va de même pour tous les mécanismes de représentation des états internes. Si chez les grands singes, l'attribution d'un désir et d'intention à autrui a été étudié (Woodruff *et Premack*, 1979), ces résultats restent à confirmer. La difficulté à étudier la représentation des états internes chez l'animal pourrait expliquer **pourquoi les émotions et la théorie de l'esprit ont toujours été étudiées chez l'homme séparément.** Mais dans une revue récente, Rebecca Saxe explique que les processus émotionnels font partie des concepts de la théorie de l'esprit, acquis très tôt au cours du développement,

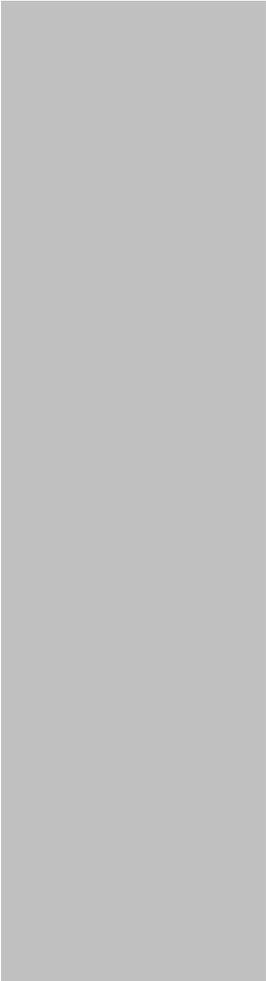
conduisant à la question de la *similarité entre leur corrélats neuraux* (Saxe et al., 2004a). Mais à ce jour, aucune étude d'imagerie fonctionnelle n'a étudié la question directement.

Une *nouvelle étude d'imagerie fonctionnelle* nous permettra de vérifier si le réseau qui a été mis en évidence lors de la classification affective était bien celui qui est recruté au cours d'une tâche faisant appel à la théorie de l'esprit. Pour cela, des sujets réaliseront une tâche de classification affective et une tâche faisant appel à la théorie de l'esprit, **pour vérifier si le traitement de la théorie de l'esprit et des émotions reposent sur un réseau neural commun, ou bien en partie commun aux deux processus.**

A la suite de ce travail une étude similaire va être menée chez les *patients schizophrènes*. Comme nous l'avons vu au cours de ce travail de thèse, la reconnaissance des émotions exprimées au cours de la conversation constituerait un élément important dans la compréhension des interactions sociales. Ce décodage des émotions véhiculées par un message verbal serait intimement lié au traitement de la théorie de l'esprit. Or, la reconnaissance des émotions et l'inférence de l'état mental d'autrui sont altérées chez les patients schizophrènes (Abu-Akel, 2003 ; Brune, 2005a). En effet, lors d'une étude en IRMf menée au sein de notre laboratoire³⁹, nous avons montré que lorsque des patients schizophrènes écoutaient une histoire évoquant une scène de tricherie, ils présentaient une activation dans la partie médiane du gyrus frontal supérieur plus faible par rapport à des sujets contrôles. Aucune autre altération des réseaux neuraux mis en place pour la compréhension de cette histoire n'a été observée. Or nous avons vu que cette région appartenait au réseau de la théorie de l'esprit. Ces résultats laisseraient penser que les troubles de la communication verbale des patients schizophrènes seraient en partie liés à un défaut d'engagement du réseau de la théorie de l'esprit plutôt qu'à un défaut d'activation du réseau neural de traitement du langage.

La mise en place d'une étude en IRMf sur les bases neurales de la compréhension du discours affectif et de la théorie de l'esprit pourrait nous aider à **mieux comprendre l'origine des troubles de la communication sociale chez ces patients, et savoir à quel niveau du traitement du langage ils interviennent. Ce travail permettrait de déterminer si les patients schizophrènes présentent des troubles liés à un problème au cours du traitement des éléments ortholinguistiques du langage et/ou du contenu paralinguistique du langage ; ou bien savoir si l'altération de la communication chez ses patients serait plutôt liée à un défaut d'engagement d'un processus cognitif plus intégré comme la théorie de l'esprit.**

³⁹ Dollfus, S., Razafimandimby, A., Maiza, O., Lebain, P., Brazo, P., Beaucousin, V., Lecardeur, L., Delamillieure, P., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. Functional deficit in medial prefrontal cortex in schizophrenic patients: a cause of impaired communication and social interaction?. Am. J. Psychiatry (soumis)



Bibliographie

1. Abu-Akel, A. (2003). A neurobiological mapping of theory of mind. *Brain Res. Rev.* 43 29:40.
2. Ackermann, H., and Riecker, A. (2004). The contribution of the insula to motor aspects of speech production: a review and a hypothesis. *Brain Lang.* 89(2) 320:328.
3. Adams, R.B., and Janata, P. (2002). A comparison of neural circuits underlying auditory and visual object categorization. *NeuroImage* 16(2) 361:377.
4. Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Curr. Opin. Neurobiol.* 12(2) 169:177.
5. Adolphs, R., and Tranel, D. (1999). Intact recognition of emotional prosody following amygdala damage. *Neuropsychologia* 37(11) 1285:1292.
6. Andreasen, N.C., O'Leary, D., Arndt, S., Cizadlo, T., Rezai, K., Watkins, G.L., Boles Ponto, L.L., and Hichwa, R. (1995). PET studies of memory: novel and practised free recall of complex narratives. *NeuroImage* 2 284:295.
7. Aubergé, V. (1991) *La synthèse de la parole: des règles aux lexiques.*
8. Aubergé, V., and Bailly, G. (1995). Generation of intonation: a global approach. *Eurospeech* 2065:2068.
9. Aubergé, V., Grépillat, T., et Rillaiard, A. (1997) Can we perceive attitudes before the end of sentences? The gating paradigm for prosodic contours. *Eurospeech* 871-877.
10. Badre, D., Poldrack, R.A., Pare-Blagoev, E.J., Insler, R.Z., and Wagner, A.D. (2005). Dissociable controlled retrieval and generalized selection mechanisms in ventrolateral prefrontal cortex. *Neuron* 47(6) 907:918.
11. Bandettini, P.A., and Ungerleider, L.G. (2001). From neuron to BOLD: new connections. *Nat. Neurosci.* 4(9) 864:866.
12. Bandettini, P.A., Wong, E.C., Hinks, R.S., Tikofsky, R.S., and Hyde, J.S. (1992). Time course EPI of human brain function during task activation. *Magn Reson. Med.* 25(2) 390:397.
13. Baumgaertner, A., Weiller, C., and Buchel, C. (2002). Event-related fMRI reveals cortical sites involved in contextual sentence integration. *NeuroImage* 16(3 Pt 1) 736:745.
14. Beaucousin, V., Lacheret-Dujour, A., and Tzourio-Mazoyer, N. (2003). La prosodie. Dans *Cerveau et langage.*, pp. 223-247.
15. Beauregard, M., Chertkow, H., Bub, D., Murtha, S., Dixon, R., and Evans, A. (1997). The neural substrates for concrete, abstract, and emotional word lexica: a positron emission tomography. *J. Cogn. Neurosci.* 9 441:461.
16. Belin, P., Fecteau, S., and Bedard, C. (2004). Thinking the voice : neural correlates of voice perception. *Trends Cogn. Sci.* 8(3) 129:135.
17. Belin, P., and Zatorre, R.J. (2003). Adaptation to speaker's voice in right anterior temporal lobe. *Neuroreport* 16(14) 2105:2109.
18. Belin, P., Zatorre, R.J., and Ahad, P. (2002). Human temporal-lobe response to vocal sounds. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 13(1) 17:26.
19. Belin, P., Zatorre, R.J., Lafaille, P., Ahad, P., and Pike, B. (2000). Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature* 403(6767) 309:312.
20. Belin, P., Zilbovicius, M., Crozier, S., Thivard, L., Fontaine, A., Masure, M.C., and Samson, Y. (1998). Lateralization of speech and auditory temporal processing. *J. Cogn. Neurosci.* 10(4) 536:540.
21. Ben Shachar, M., Palti, D., and Grodzinsky, Y. (2004). Neural correlates of syntactic movement: converging evidence from two fMRI experiments. *NeuroImage* 21(4) 1320:1336.

22. Benson, R.R., Whalen, D.H., Richardson, M., Swainson, B., Clark, V.P., Lai, S., and Liberman, A.M. (2001). Parametrically dissociating speech and nonspeech perception in the brain using fMRI. *Brain Lang.* 78(3) 364:396.
23. Besson, M., Magne, C., and Schon, D. (2002). Emotional prosody: sex differences in sensitivity to speech melody. *Trends Cogn. Sci.* 6(10) 405:407.
24. Besson, M., and Schon, D. (2001). Comparison between language and music. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 930 232:258.
25. Binder, J.R., Frost, J.A., Hammeke, T.A., Bellgowan, P.S., Rao, S.M., and Cox, R.W. (1999). Conceptual processing during the conscious resting state: a functional MRI study. *J. Cog. Neurosci.* 11(1) 80:93.
26. Binder, J.R., Frost, J.A., Hammeke, T.A., Bellgowan, P.S.F., Springer, J.A., Kaufman, J.N., and Possing, E.T. (2000). Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cereb. Cortex* 10(5) 512:528.
27. Binder, J.R., Frost, J.A., Hammeke, T.A., Cox, R.W., Rao, S.M., and Prieto, T. (1997). Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *J. Neurosci.* 17(1) 353:362.
28. Binder, J.R., Frost, J.A., Hammeke, T.A., Rao, S.M., and Cox, R.W. (1996). Function of the left planum temporale in auditory and linguistic processing. *Brain* 119 1239:1247.
29. Binder, J.R., Swanson, S.J., Hammeke, T.A., Morris, G.L., Mueller, W.M., Fischer, M., Benbadis, S., Frost, J.A., Rao, S.M., and Houghton, V.M. (2003). Determination of language dominance using functional MRI: a comparison with the Wada test. *Am. Aca. Neurol.* 46(4) 978:984.
30. Blair, R.J., Morris, J.S., Frith, C.D., Perrett, D.I., and Dolan, R.J. (1999). Dissociable neural responses to facial expressions of sadness and anger. *Brain* 122 (Pt 5) 883:893.
31. Blakemore, S.J., Winston, J., and Frith, U. (2004). Social cognitive neuroscience: where are we heading? *Trends Cogn. Sci.* 8(5) 216:222.
32. Blonder, L.X., Bowers, D., and Heilman, K.M. (1991). The role of the right hemisphere in emotional communication. *Brain* 114(Pt 3) 1115:1127.
33. Boatman, D., Gordon, B., Hart, J., Selnes, O., Miglioretti, D., and Lenz, F. (2000). Transcortical sensory aphasia: revisited and revised. *Brain* 123 1634:1642.
34. Boddaert, N., Chabane, N., Gervais, H., Good, C.D., Bourgeois, M., Plumet, M.H., Barthelemy, C., Mouren, M.C., Artiges, E., Samson, Y., Brunelle, F., Frackowiak, R.S., and Zilbovicius, M. (2004). Superior temporal sulcus anatomical abnormalities in childhood autism: a voxel-based morphometry MRI study. *NeuroImage* 23(1) 364:369.
35. Boemio, A., Fromm, S., Braun, A., and Poeppel, D. (2005). Hierarchical and asymmetric temporal sensitivity in human auditory cortices. *Nat. Neurosci.*
36. Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annu. Rev. Neurosci.* 25 151:188.
37. Bookheimer, S.Y., Zeffiro, T.A., Blaxton, T., Gaillard, W., and Theodore, W. (1995). Regional cerebral blood flow during object naming and word reading. *Hum. Brain Mapp.* 3 93:106.
38. Bookheimer, S.Y., Zeffiro, T.A., Blaxton, T.A., Gaillard, P.W., and Theodore, W.H. (2000). Activation of language cortex with automatic speech tasks. *Neurology* 55(8) 1151:1157.
39. Booth, J.R., Burman, D.D., Meyer, J.R., Gitelman, D.R., Parrish, T.B., and Mesulam, M.M. (2002). Modality independence of word comprehension. *Hum. Brain Mapp.* 16(4) 251:261.
40. Bottini, G., Corcoran, R., Sterzi, R., Paulesu, E., Schenone, P., Scarpa, P., Frackowiak, R.S., and Frith, C.D. (1994). The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language. A positron emission tomography activation study. *Brain* 117 (Pt 6) 1241:1253.

41. Botvinick, M.M., Cohen, J.D., and Carter, C.S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends Cogn. Sci.* 8(12) 539:546.
42. Bowers, D., Coslett, H.B., Bauer, R.M., Speedie, L.J., and Heilman, K.M. (1987). Comprehension of emotional prosody following unilateral hemispheric lesions: processing defect versus distraction defect. *Neuropsychologia* 25(2) 317:328.
43. Boysson-Bardies, B. (1996). *Comment la parole vient aux enfants.* (Paris, Odile Jacob Press).
44. Braun, A.R., Varga, M., Stager, S., Schulz, G., Selbie, S., Maisog, J.M., Carson, R.E., and Ludlow, C.L. (1997). Altered patterns of cerebral activity during speech and language production in developmental stuttering. An H₂(15)O positron emission tomography study. *Brain* 120 (Pt 5) 761:784.
45. Braver, T.S., and Bongiolatti, S.R. (2002). The role of frontopolar cortex in subgoal processing during working memory. *NeuroImage* 15(3) 523:536.
46. Brett, M., Johnsrude, I.S., and Owen, A.M. (2002). The problem of functional localization in the human brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 3(3) 243:249.
47. Bright, P., Moss, H., and Tyler, L.K. (2004). Unitary vs multiple semantics: PET studies of word and picture processing. *Brain and language* 89(3) 417:432.
48. Brüne, M. (2005). "Theory of mind" in schizophrenia: A review of the literature. *Schizophr. Bul.* 31(1) 1:22.
49. Brunet, E., Sarfati, Y., Hardy-Bayle, M.C., and Decety, J. (2000). A PET investigation of the attribution of intentions with a nonverbal task. *NeuroImage* 11(2) 157:166.
50. Buchanan, T.W., Lutz, K., Mirzazade, S., Specht, K., Shah, N.J., Zilles, K., and Jancke, L. (2000). Recognition of emotional prosody and verbal components of spoken language: an fMRI study. *Brain Res. Cogn Brain Res.* 9(3) 227:238.
51. Büchel, C., Price, C., and Friston, K. (1998). A multimodal language region in the ventral visual pathway. *Nature* 394 274:277.
52. Buchsbaum, B.R., Hickok, G., and Humphries, C. (2001). Role of left posterior superior temporal gyrus in phonological processing for speech perception and production. *Cognitive Science* 25 663:678.
53. Buckner, R.L., Koutstaal, W., Schacter, D.L., and Rosen, B.R. (2000). Functional MRI evidence for a role of frontal and inferior temporal cortex in amodal components of priming. *Brain* 123 620:640.
54. Bunge, S.A., Ochsner, K.N., Desmond, J.E., Glover, G.H., and Gabrieli, J.D.E. (2001). Prefrontal regions involved in keeping information in and out of mind. *Brain* 124 2074:2086.
55. Bush, G., Luu, P., and Posner, M.I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends Cogn. Sci.* 4(6) 215:222.
56. Calvert, G., Brammer, M., Bullmore, E.T., Campbell, R., Iversen, S.D., and David, A.S. (1999). Response amplification in sensory-specific cortices during cross-modal binding. *Neuroreport* 10 2619:2623.
57. Canli, T., Desmond, J.E., Zhao, Z., and Gabrieli, J.D. (2002). Sex differences in the neural basis of emotional memories. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A* 99(16) 10789:10794.
58. Caplan, D. (2001). Functional neuroimaging studies of syntactic processing. *J. Psycholinguist. Res.* 30(3) 297:320.
59. Caplan, D., Alpert, N., and Waters, G. (1999). PET studies of syntactic processing with auditory sentence presentation. *NeuroImage* 9 343:351.
60. Cappa, S.F., Perani, D., Schnur, T., Tettamanti, M., and Fazio, F. (1998). The effect of semantic category and knowledge type on lexical-semantic access: a PET study. *NeuroImage* 8 350:359.

61. Castelli, F., Happe, F., Frith, U., and Frith, C. (2000). Movement and mind: a functional imaging study of perception and interpretation of complex intentional movement patterns. *NeuroImage* 12(3) 314:325.
62. Catani, M., Howard, R.J., Pajevic, S., and Jones, D.K. (2002). Virtual in vivo interactive dissection of white matter fasciculi in the human brain. *NeuroImage* 17(1) 77:94.
63. Catani, M., Jones, D.K., and ffytche, D.H. (2005). Perisylvian language networks of the human brain. *Ann. Neurol.* 57(1) 8:16.
64. Chau, W., and McIntosh, A.R. (2005). The Talairach coordinate of a point in the MNI space: how to interpret it. *Neuroimage.* 25(2) 408:416.
65. Chee, M.W., OCraven, K.M., Bergida, R., Rosen, B.R., and Savoy, R.L. (1998). Auditory and visual word processing studied with fMRI. *Hum. Brain Mapp.* 7(1) 15:28.
66. Chee, M.W.L., Weekes, B., Lee, K.M., Soon, C.S., Schreiber, A., Hoon, J.J., and Chee, M. (2000). Overlap and dissociation of semantic processing of Chinese characters, English words, and pictures: Evidence from fMRI. *NeuroImage* 12(4) 392:403.
67. Cohen, D., and Hecaen, H. (1965). [Neurolinguistic remarks on a case of agrammatism]. *J Psychol. Norm. Pathol. (Paris)* 62(3) 273:296.
68. Cohen, J.D., Perstein, W.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Noll, D.C., Jonides, J., and Smith, E.E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature* 386 604:607.
69. Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., and Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain* 125(Pt 5) 1054:1069.
70. Collins, D.L., Neelin, P., Peters, T.M., and Evans, A.C. (1994). Automatic 3D intersubject registration of MR volumetric data in standardized Talairach space. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 18 192:205.
71. Constable, R.T., Pugh, K.R., Berroya, E., Mencl, W.E., Westerveld, M., Ni, W., and Shankweiler, D. (2004). Sentence complexity and input modality effects in sentence comprehension: an fMRI study. *NeuroImage* 22(1) 11:21.
72. Content, A., Mousty, P., and Radeau, M. (1990). BRULEX: une base de données lexicales informatisée pour le français écrit et parlé. *L'année Psychologique* 90 551:566.
73. Cooke, A., Zurif, E.B., DeVita, C., Alsop, D., Koenig, P., Detre, J., Gee, J., Pinango, M., Balogh, J., and Grossman, M. (2002). Neural basis for sentence comprehension: Grammatical and short-term memory components. *Hum. Brain Mapp.* 15(2) 80:94.
74. Corbetta, M., and Shulman, G.L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 3(3) 201:215.
75. Craik, F.I.M., Moroz, T.M., Moscovitch, M., Stuss, D.T., Winocur, G., Tulving, E., and Kapur, S. (1999). In Search of the Self: A Positron Emission Tomography Study. *Psychological Science* 10(1) 26:34.
76. Crinion, J.T., Lambon-Ralph, M.A., Warburton, E.A., Howard, D., and Wise, R.J. (2003). Temporal lobe regions engaged during normal speech comprehension. *Brain* 126(Pt 5) 1193:1201.
77. Crivello, F., Schormann, T., Tzourio-Mazoyer, N., Roland, P.E., Zilles, K., and Mazoyer, B. (2002). Comparison of spatial normalization procedures and their impact on functional maps. *Hum. Brain Mapp.* 16 228:250.
78. Crosson, B., Radonovich, K., Sadek, J.R., Gökçay, D., Bauer, R.M., Fischler, I.S., Cato, M.A., Maron, L., Auerbach, E.J., Browd, S.R., and Briggs, R.W. (1999). Left-hemisphere processing of emotional connotation during word generation. *Neuroreport* 10(12) 2449:2455.
79. Damasio, A. (2001). Fundamental feelings. *Nature* 413 781:

80. Damasio, H., Grabowski, T.J., Tranel, D., Ponto, L.L., Hichwa, R., and Damasio, A. (2001). Neural correlates of naming actions and of naming spatial relations. *NeuroImage* 13(6) 1053:1064.
81. Damon, W. (2000). *Handbook of child psychology: Vol. 2. Cognition, Perception, and Language*. (New York, Wiley).
82. Dapretto, M., and Bookheimer, S.Y. (1999). Form and content: Dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron* 24(2) 427:432.
83. Davidson, R. J. (1995). Emotional lateralization. Dans *Brain asymmetry*, R.J. Davidson, and K. Hugdahl, eds. (Cambridge, London: pp. 359-424).
84. Davis, M.H., Meunier, F., and Marslen-Wilson, W.D. (2004). Neural responses to morphological, syntactic, and semantic properties of single words: an fMRI study. *Brain and language* 89(3) 439:449.
85. Dejerine, J. (1980). *Anatomie des centres nerveux*. (Paris, Masson,SA.).
86. Demb, J.B., Desmond, J.E., Wagner, A.D., Vaidya, C.J., Glover, G.H., and Gabrieli, J.D.E. (1995). Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: a functional MRI study of task difficulty and process specificity. *J. Neurosci.* 15(9) 5870:5878.
87. Démonet, J.F., Price, C., Wise, R., and Frackowiak, R.S.J. (1994). Differential activation of right and left posterior sylvian regions by semantic and phonological tasks: a positron-emission tomography study in normal human subjects. *Neurosci. Letters* 182 25:28.
88. den Ouden, H.E., Frith, U., Frith, C., and Blakemore, S.J. (2005). Thinking about intentions. *NeuroImage* 28(4) 787:796.
89. Dronkers, N.F., Wilkins, D.P., Van, V.R., Jr., Redfern, B.B., and Jaeger, J.J. (2004). Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. *Cognition* 92(1-2) 145:177.
90. Duffau, H., Gatignol, P., Mandonnet, E., Peruzzi, P., Tzourio-Mazoyer, N., and Capelle, L. (2005). New insights into the anatomo-functional connectivity of the semantic system: a study using cortico-subcortical electrostimulations. *Brain* 128(Pt 4) 797:810.
91. Embick, D., Marantz, A., Miyashita, Y., O'Neil, W., and Sakai, K.L. (2000). A syntactic specialization for Broca's area. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 97(11) 6150:6154.
92. Etard, O. (2003). Petite histoire de l'aphémie. Dans *Cerveau et langage*.
93. Etard, O., Mellet, E., Papathanassiou, D., Benali, K., Houdé, O., Mazoyer, B., and Tzourio-Mazoyer, N. (1999). Picture naming without Broca and Wernicke's area. *Neuroreport* 11(3) 617:621.
94. Ethofer, T., Anders, S., Erb, M., Herbert, C., Wiethoff, S., Kissler, J., Grodd, W., and Wildgruber, D. (2005). Cerebral pathways in processing of affective prosody: A dynamic causal modeling study. *NeuroImage*
95. Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G., and Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. *Eur. J. Neurosci.* 15(2) 399:402.
96. Falk, D. (2004). Prelinguistic evolution in early hominins: whence motherese? *Behav. Brain Sci.* 27(4) 491:503.
97. Fecteau, S., Armony, J.L., Joanette, Y., and Belin, P. (2004b). Priming of non-speech vocalizations in male adults: the influence of the speaker's gender. *Brain Cogn.* 55(2) 300:302.
98. Fecteau, S., Armony, J.L., Joanette, Y., and Belin, P. (2004a). Is voice processing species-specific in human auditory cortex? An fMRI study. *NeuroImage* 23(3) 840:848.
99. Fernald, A. (1989). Intonation and communicative intent in mothers' speech to infants: is the melody the message? *Child Dev.* 60(6) 1497:1510.

100. Ferstl, E.C., and Von Cramon, D.Y. (2002). What does the frontomedian cortex contribute to language processing: coherence or theory of mind? *NeuroImage* 17(3) 1599:1612.
101. Fiebach, C.J., Friederici, A.D., Müller, K., and vonCramon, D.Y. (2002). fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *J. Cog. Neurosci.* 14(1) 11:23.
102. Fiez, J.A., Balota, D.A., Raichle, M.E., and Petersen, S.E. (1999). Effects of lexicality, frequency, and spelling-to-sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron* 24(1) 205:218.
103. Fiez, J.A., Raichle, M.E., Balota, D.A., Tallal, P., and Petersen, S.E. (1996). PET activation of posterior temporal regions during auditory word presentation and verb generation. *Cereb. Cortex* 6 1:10.
104. Fletcher, P.C., Happe, F., Frith, U., Baker, S.C., Dolan, R.J., Frackowiak, R.S., and Frith, C.D. (1995). Other minds in the brain: a functional imaging study of "theory of mind" in story comprehension. *Cognition* 57(2) 109:128.
105. Fonagy, I. (1983). *La vive voix* (Paris).
106. Fox, P.T., Huang, A., Parsons, L.M., Xiong, J.H., Zamarrippa, F., Rainey, L., and Lancaster, J.L. (2001). Location-Probability Profiles for the Mouth Region of Human Primary Motor-Sensory Cortex: Model and Validation. *NeuroImage* 13(1) 196:209.
107. Fox, P.T., Ingham, R.J., Ingham, J.C., Zamarrippa, F., Xiong, J.H., and Lancaster, J.L. (2000). Brain correlates of stuttering and syllable production - A PET performance-correlation analysis. *Brain* 123 1985:2004.
108. Friederici, A.D., and Alter, K. (2004). Lateralization of auditory language functions: a dynamic dual pathway model. *Brain Lang.* 89(2) 267:276.
109. Friederici, A.D., Opitz, B., and vonCramon, D.Y. (2000). Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: an fMRI investigation of different word types. *Cereb. Cortex* 10(7) 698:705.
110. Friederici, A.D., Ruschemeyer, S.A., Hahne, A., and Fiebach, C.J. (2003). The role of left inferior frontal and superior temporal cortex in sentence comprehension: localizing syntactic and semantic processes. *Cereb. Cortex* 13(2) 170:177.
111. Frith, U. (2001). Mind blindness and the brain in autism. *Neuron* 32(6) 969:979.
112. Gallagher, H.L., and Frith, C.D. (2003). Functional imaging of 'theory of mind'. *Trends Cogn. Sci.* 7(2) 77:83.
113. Gallagher, H.L., Happé, F., Brunswick, N., Fletcher, P.C., Frith, U., and Frith, C.D. (2000). Reading the mind in cartoons and stories: an fMRI study of 'theory of mind' in verbal and nonverbal tasks. *Neuropsychologia* 38(1) 11:21.
114. Gandour, J., Wong, D., Dziedzic, M., Lowe, M., Tong, Y., and Li, X. (2003). A cross-linguistic fMRI study of perception of intonation and emotion in Chinese. *Hum. Brain Mapp.* 18(3) 149:157.
115. Gazzaniga, M.S. (2000). Cerebral specialization and interhemispheric communication: does the corpus callosum enable the human condition? *Brain* 123 (Pt 7) 1293:1326.
116. George, M.S., Ketter, T.A., Parekh, P.I., Herscovitch, P., and Post, R.M. (1996a). Gender differences in regional cerebral blood flow during transient self-induced sadness or happiness. *Biol. Psychiatry* 40(9) 859:871.
117. George, M.S., Parekh, P.I., Rosinsky, N., Ketter, T.A., Kimbrell, T.A., Heilman, K.M., Herscovitch, P., and Post, R.M. (1996b). Understanding emotional prosody activates right hemisphere regions. *Arch. Neurol.* 53(7) 665:670.
118. Gervais, H., Belin, P., Boddart, N., Leboyer, M., Coez, A., Sfaello, I., Barthelemy, C., Brunelle, F., Samson, Y., and Zilbovicius, M. (2004). Abnormal cortical voice processing in autism. *Nat. Neurosci.* 7(8) 801:802.

119. Geschwind, N., and Levitsky, W. (1968). Human brain left-right asymmetries in temporal speech region. *Science* 161 186:187.
120. Gil-da-Costa, R., Braun, A., Lopes, M., Hauser, M.D., Carson, R.E., Herscovitch, P., and Martin, A. (2004). Toward an evolutionary perspective on conceptual representation: Species-specific calls activate visual and affective processing systems in the macaque. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A* 101(50) 17516:17521.
121. Giraud, A.L., Lorenzi, C., Ashburner, J., Wable, J., Johnsrude, I., Frackowiak, R., and Kleinschmidt, A. (2000). Representation of the temporal envelope of sounds in the human brain. *J. Neurophysiol.* 84(3) 1588:1598.
122. Givon, T. (1995). Isomorphism in the Grammatical Code: Cognitive and Biological Considerations. Dans *Iconicity in Language*, John Benjamins Publishing Company, ed. (Amsterdam: pp. 47-76.
123. Goel, V., Buchel, C., Frith, C., and Dolan, R.J. (2000). Dissociation of Mechanisms Underlying Syllogistic Reasoning. *NeuroImage* 12(5) 504:514.
124. Goel, V., Gold, B., Kapur, S., and Houle, S. (1998). Neuroanatomical correlates of human reasoning. *J. Cogn. Neurosci.* 10(3) 293:302.
125. Goel, V., Grafman, J., Sadato, N., and Hallett, M. (1995). Modeling other minds. *Neuroreport* 6(13) 1741:1746.
126. Grandjean, D., Sander, D., Pourtois, G., Schwartz, S., Seghier, M.L., Scherer, K.R., and Vuilleumier, P. (2005). The voices of wrath: brain responses to angry prosody in meaningless speech. *Nat. Neurosci.* 8(2) 145:146.
127. Griffiths, T.D., Buchel, C., Frackowiak, R.S., and Patterson, R.D. (1998). Analysis of temporal structure in sound by the human brain. *Nat. Neurosci.* 1(5) 422:427.
128. Grosjean, F. (1996). Gating. *Language and the Cognitive Processes* 11(6) 597:604.
129. Gurd, J.M., Amunts, K., Weiss, P.H., Zafiris, O., Zilles, K., Marshall, J.C., and Fink, G.R. (2002). Posterior parietal cortex is implicated in continuous switching between verbal fluency tasks: an fMRI study with clinical implications. *Brain* 125(Pt 5) 1024:1038.
130. Hagoort, P., Indefrey, P., Brown, C., Herzog, H., Steinmetz, H., and Seitz, R.J. (1999). The neural circuitry involved in the reading of German words and pseudowords: A PET study. *J. Cognitive Neurosci.* 11(4) 383:398.
131. Halpern, D. F. (2000). *Sex differences in cognitive abilities.* (Mahwah, New Jersey.
132. Halpern, D. F. (1993). Gender differences in intellectual abilities. Dans *Encyclopedia of intelligence*, R.J. Struberg, S.J. Ceci, J. Hurn, E. Hunt, and J.D. Madarazzo, eds. (New York: Macmillan), pp. 463-467.
133. Halpern, D.F. (1997). Sex differences in intelligence. Implications for education. *Am. Psychol.* 52(10) 1091:1102.
134. Halpern, D.F., and Tan, U. (2001). Stereotypes and steroids: using a psychobiosocial model to understand cognitive sex differences. *Brain Cogn* 45(3) 392:414.
135. Happe, F. (2003). Theory of mind and the self. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1001 134:144.
136. Harris, L.T., Todorov, A., and Fiske, S.T. (2005). Attributions on the brain: neuro-imaging dispositional inferences, beyond theory of mind. *NeuroImage* 28(4) 763:769.
137. Hart Jr, J., and Gordon, B. (1990). Delineation of single-word semantic comprehension deficits in aphasia, with anatomical correlations. *Ann. Neurol.* 27 226:231.
138. Hashimoto, R., and Sakai, K.L. (2002). Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron* 35(3) 589:597.

139. Hauser, M.D., Chomsky, N., and Fitch, W.T. (2002). The faculty of language: what is it, who has it, and how did it evolve? *Science* 298(5598) 1569:1579.
140. Hautzel, H., Mottaghy, F.M., Schmidt, D., Zemb, M., Shah, N.J., Muller-Gartner, H.W., and Krause, B.J. (2002). Topographic segregation and convergence of verbal, object, shape and spatial working memory in humans. *Neurosci. Lett.* 323(2) 156:160.
141. Heilman, K.M., Leon, S.A., and Rosenbek, J.C. (2004). Affective aprosodia from a medial frontal stroke. *Brain Lang.* 89(3) 411:416.
142. Heilman, K.M., Scholes, R., and Watson, R.T. (1975). Auditory affective agnosia. Disturbed comprehension of affective speech. *J Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 38(1) 69:72.
143. Heim, S., and Friederici, A.D. (2003). Phonological processing in language production: time course of brain activity. *Neuroreport* 14(16) 2031:2033.
144. Heim, S., Opitz, B., and Friederici, A.D. (2002). Broca's area in the human brain is involved in the selection of grammatical gender for language production: evidence from event-related functional magnetic resonance imaging. *Neurosci. Lett.* 328(2) 101:104.
145. Hellige, J. B. (1993a). Individual differences. Dans *Hemispheric asymmetry: What's right and what's left.*, S.M. Kosslyn, ed. (Cambridge, London: pp. 207-259.
146. Hellige, J. B. (1993b). Behavioral asymmetries in human. Dans *Hemispheric asymmetry: What's right and what's left.*, S.M. Kosslyn, ed. (Cambridge, London: pp. 28-64.
147. Herbster, A.N., Mintun, M.A., Nebes, R.D., and Becker, J.T. (1997). Regional cerebral blood flow during word and nonword reading. *Hum. Brain Mapp.* 5 84:92.
148. Hervé, P.-Y., Razafimandimby, A., Dollfus, S., et Tzourio-Mazoyer, N. (sous presse). Functional laterality imaged: assessing the hemispheric specialization for language with PET and fMRI. *Neuroscience Imaging*
149. Heun, R., Jessen, F., Klose, U., Erb, M., Granath, D.O., Freymann, N., and Grodd, W. (2000). Interindividual variation of cerebral activation during encoding and retrieval of words. *Eur. Psychiatry* 15 470:479.
150. Hickok, G., Buchsbaum, B., Humphries, C., and Muftuker, T. (2003). Auditory-motor interaction revealed by fMRI : speech, music, and working memory in area Spt. *J. Cogn. Neurosci.* 15:5 1:10.
151. Hickok, G., and Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition* 92(1-2) 67:99.
152. Hickok, G., and Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends Cogn. Sci.* 4(4) 131:138.
153. Homae, F., Hashimoto, R., Nakajima, K., Miyashita, Y., and Sakai, K.L. (2002). From perception to sentence comprehension: the convergence of auditory and visual information of language in the left inferior frontal cortex. *NeuroImage* 16(4) 883:900.
154. Homae, F., Yahata, N., and Sakai, K.L. (2003). Selective enhancement of functional connectivity in the left prefrontal cortex during sentence processing. *Neuroimage.* 20(1) 578:586.
155. Hornak, J., Bramham, J., Rolls, E.T., Morris, R.G., O'Doherty, J., Bullock, P.R., and Polkey, C.E. (2003). Changes in emotion after circumscribed surgical lesions of the orbitofrontal and cingulate cortices. *Brain* 126(Pt 7) 1691:1712.
156. Horwitz, B., Rumsey, J.M., and Donohue, B.C. (1998). Functional connectivity of the angular gyrus in normal reading and dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95(15) 8939:8944.
157. Houdé, O., Kayser, D., Koenig, O., Proust, J., and Rastier, F. (1998). *Vocabulaire des sciences cognitives.*
158. Houdé, O., Mazoyer, B., and Tzourio-Mazoyer, N. (2002). *Cerveau et psychogé.*

159. Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, W.D., Friston, K., Weiller, C., and Frackowiak, R. (1992). The cortical localization of the lexicons. Positron emission tomography evidence. *Brain* 115 (Pt 6) 1769:1782.
160. Hugdahl, K., Thomsen, T., Ersland, L., Morten, R.L., and Niemi, J. (2003). The effects of attention on speech perception: An fMRI study. *Brain and language* 85(1) 37:48.
161. Hughlings-Jackson, J. (1915). On affections of speech from diseases of the brain. *Brain* 38 106:174.
162. Hynes, C.A., Baird, A.A., and Grafton, S.T. (2006). Differential role of the orbital frontal lobe in emotional versus cognitive perspective-taking. *Neuropsychologia* 44(3) 374:383.
163. Iacoboni, M., Lieberman, M.D., Knowlton, B.J., Molnar-Szakacs, I., Moritz, M., Throop, C.J., and Fiske, A.P. (2004). Watching social interactions produces dorsomedial prefrontal and medial parietal BOLD fMRI signal increases compared to a resting baseline. *NeuroImage* 21(3) 1167:1173.
164. James, T.W., and Gauthier, I. (2004). Brain areas engaged during visual judgments by involuntary access to novel semantic information. *Vision Res.* 44(5) 429:439.
165. Jancke, L., and Shah, N.J. (2002). Does dichotic listening probe temporal lobe functions? *Neurology* 58(5) 736:743.
166. Jancke, L., Wustenberg, T., Scheich, H., and Heinze, H.J. (2002). Phonetic perception and the temporal cortex. *NeuroImage* 15(4) 733:746.
167. Jennings, J.M., McIntosh, A.R., Kapur, S., Zipursky, R.B., and Houle, S. (1998). Functional network differences in schizophrenia: a rCBF study of semantic processing. *Neuroreport* 9(8) 1697:1700.
168. Jessen, F., Erb, M., Klose, U., Lotze, M., Grodd, W., and Heun, R. (1999). Activation of human language processing brain regions after the presentation of random letter strings demonstrated with event-related functional magnetic resonance imaging. *Neurosci. Letters* 270(1) 13:16.
169. Joanisse, M.F., and Gati, J.S. (2003). Overlapping neural regions for processing rapid temporal cues in speech and nonspeech signals. *NeuroImage* 19(1) 64:79.
170. Jobard, G., Crivello, F., and Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Evaluation of the dual route theory of reading: A metanalysis of 35 neuroimaging studies. *NeuroImage* 20 693:712.
171. Jobard, G., Vigneau, M., Mazoyer, B., et Tzourio-Mazoyer, N. (sous presse). Impact of modality and linguistic complexity during reading and listening tasks. *NeuroImage*
172. Johnson, S.C., Schmitz, T.W., Kawahara-Baccus, T.N., Rowley, H.A., Alexander, A.L., Lee, J., and Davidson, R.J. (2005). The Cerebral Response during Subjective Choice with and without Self-reference. *J Cogn Neurosci.* 17(12) 1897:1906.
173. Jurgens, U. (1986). The squirrel monkey as an experimental model in the study of cerebral organization of emotional vocal utterances. *Eur. Arch. Psychiatry Neurol. Sci.* 236(1) 40:43.
174. Just, M.A., Newman, S.D., Keller, T.A., McEleney, A., and Carpenter, P.A. (2004). Imagery in sentence comprehension: an fMRI study. *NeuroImage* 21(1) 112:124.
175. Kansaku, K., Yamaura, A., and Kitazawa, S. (2000). Sex differences in lateralization revealed in the posterior language areas. *Cereb. Cortex* 10(9) 866:872.
176. Kelley, W.M., Macrae, C.N., Wyland, C.L., Caglar, S., Inati, S., and Heatherton, T.F. (2002). Finding the self? An event-related fMRI study. *J. Cog. Neurosci.* 14(5) 785:794.
177. Kesler-West, M.L., Andersen, A.H., Smith, C.D., Avison, M.J., Davis, C.E., Kryscio, R.J., and Blonder, L.X. (2001). Neural substrates of facial emotion processing using fMRI. *Brain Res. Cogn Brain Res.* 11(2) 213:226.
178. Kimura, D. (2001). *Cerveau d'homme, cerveau de femme ?* (Paris).

179. Kircher, T.T., Brammer, M., Tous, A.N., Williams, S.C., and McGuire, P.K. (2001). Engagement of right temporal cortex during processing of linguistic context. *Neuropsychologia* 39(8) 798:809.
180. Koelsch, S., Gunter, T.C., Cramon, D.Y., Zysset, S., Lohmann, G., and Friederici, A.D. (2002). Bach speaks: a cortical "language-network" serves the processing of music. *NeuroImage* 17(2) 956:966.
181. Koelsch, S., Kasper, E., Sammler, D., Schulze, K., Gunter, T., and Friederici, A.D. (2004). Music, language and meaning: brain signatures of semantic processing. *Nat. Neurosci.* 7(3) 302:307.
182. Koriat, A., Greenberg, S.N., and Kreiner, H. (2002). The extraction of structure during reading: evidence from reading prosody. *Mem. Cognit.* 30(2) 270:280.
183. Kosslyn, S.M., Alpert, N.M., Thompson, W.L., Chabris, C.F., Rauch, S.L., and Anderson, A.K. (1994). Identifying objects from different viewpoints. A PET investigation. *Brain* 117 1055:1071.
184. Kotz, S.A., Cappa, S.F., Von Cramon, D.Y., and Friederici, A.D. (2002). Modulation of the lexical-semantic network by auditory semantic priming: an event-related functional MRI study. *NeuroImage* 17(4) 1761:1772.
185. Kotz, S.A., Meyer, M., Alter, K., Besson, M., Von Cramon, D.Y., and Friederici, A.D. (2003). On the lateralization of emotional prosody: an event-related functional MR investigation. *Brain Lang* 86(3) 366:376.
186. Kotz, S.A., Meyer, M., et Paulmann, S. (sous presse). Lateralization of emotional prosody in the brain: an overview and synopsis on the impact of study design. *Progress in Brain Research*
187. Kriegstein, K., Eger, E., Kleinschmidt, A., and Giraud, A. (2003). Modulation of neural responses to speech by directing attention to voices or verbal content. *Cogn. Brain Res.* 17 48:55.
188. Kriegstein, K., Kleinschmidt, A., Sterzer, P., and Giraud, A.L. (2005). Interaction of face and voice areas during speaker recognition. *J. Cogn. Neurosci.* 17(3) 367:376.
189. Kuperberg, G.R., McGuire, P.K., Bullmore, E.T., Brammer, M.J., Rabe-Hesketh, S., Wright, I.C., Lythgoe, D.J., Williams, S.C.R., and David, A.S. (2000). Common and distinct neural substrates for pragmatic, semantic, and syntactic processing of spoken sentences: an fMRI study. *J. Cogn. Neurosci.* 12(2) 321:341.
190. Kwong, K.K., Belliveau, J.W., Chesler, D.A., Goldberg, I.E., Weisskoff, R.M., Poncelet, B.P., Kennedy, D.N., Hoppel, B.E., Cohen, M.S., Turner, R., and . (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A* 89(12) 5675:5679.
191. Lacheret-Dujour, A., and Beaugendre, F. (1999). La prosodie du français.
192. Lakshminarayanan, K., Ben Shalom, D., van, W., V, Orbelo, D., Houde, J., and Poeppel, D. (2003). The effect of spectral manipulations on the identification of affective and linguistic prosody. *Brain Lang.* 84(2) 250:263.
193. Lalonde, S., Braun, C.M., Charlebois, N., and Whitaker, H.A. (1992). Effects of right and left hemisphere cerebrovascular lesions on discrimination of prosodic and semantic aspects of affect in sentences. *Brain Lang.* 42(2) 165:186.
194. Lane, R.D., Reiman, E.M., Ahern, G.L., Schwartz, G.E., and Davidson, R.J. (1997). Neuroanatomical correlates of happiness, sadness, and disgust. *Am. J. Psychiatry* 154(7) 926:933.
195. Lattner, S., Meyer, M.E., and Friederici, A.D. (2005). Voice perception: Sex, pitch, and the right hemisphere. *Hum. Brain Mapp.* 24(1) 11:20.
196. Lawrence, E.J., Shaw, P., Giampietro, V.P., Surguladze, S., Brammer, M.J., and David, A.S. (2006). The role of 'shared representations' in social perception and empathy: an fMRI study. *NeuroImage* 29(4) 1173:1184.
197. Ledoux, J. (2002). The emotional brain (harmondsworth, penguin group).

198. Léon, P. (1993). *Précis de phonostylistique, parole et expressivité* (Paris, Nathan).
199. Levitin, D.J., and Menon, V. (2003). Musical structure is processed in "language" areas of the brain: a possible role for Brodmann Area 47 in temporal coherence. *NeuroImage* 20(4) 2142:2152.
200. Liberman, A.M., and Whalen, D.H. (2000). On the relation of speech to language. *Trends Cogn. Sci.* 4(5) 187:196.
201. Lieberman, P. (2002). On the nature and evolution of the neural bases of human language. *Am. J. Phys. Anthropol. Suppl* 35 36:62.
202. Logothetis, N.K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T., and Oeltermann, A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature* 412(6843) 150:157.
203. Luke, K.K., Liu, H.L., Wai, Y.Y., Wan, Y.L., and Tan, L.H. (2002). Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Hum. Brain Mapp.* 16(3) 133:145.
204. Maguire, E.A., and Frith, C.D. (2004). The brain network associated with acquiring semantic knowledge. *NeuroImage* 22(1) 171:178.
205. Martin, A., Haxby, J.V., Lalonde, F.M., Wiggs, C.L., and Ungerleider, L.G. (1995). Discrete cortical regions associated with knowledge of color and knowledge of action. *Science* 270 102:105.
206. Martin, A., Wiggs, C.L., Ungerleider, L.G., and Haxby, J.V. (1996). Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature* 379 649:652.
207. Martin, Ph. (1996) WinPitch : un logiciel d'analyse temps réel de la fréquence fondamentale fonctionnant sous Windows. Actes des 21èmes Journées d'Etude sur la Parole 224-227.
208. Mazoyer, B., Dehaene, S., Tzourio, N., Frak, v., Cohen, L., Murayama, N., Levrier, O., Salamon, G., and Mehler, J. (1993). The cortical representation of speech. *J. Cogn. Neurosci.* 5 467:479.
209. McDermott, K.B., Petersen, S.E., Watson, J.M., and Ojemann, J.G. (2003). A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia* 41(3) 293:303.
210. McGuire, P.K., Silbersweig, D.A., Murray, R.M., David, A.S., Frackowiak, R.S.J., and Frith, C.D. (1996). Functional anatomy of inner speech and auditory verbal imagery. *Psychol. Med.* 26 29:38.
211. Mechelli, A., Friston, K.J., and Price, C.J. (2000). The effects of presentation rate during word and pseudoword reading: A comparison of PET and fMRI. *J. Cog. Neurosci.* 12 145:156.
212. Menard, M.T., Kosslyn, S.M., Thompson, W.L., Alpert, N.M., and Rauch, S.L. (1996). Encoding words and pictures: a positron emission tomography study. *Neuropsychologia* 34 185:194.
213. Mesulam, M. M. (2000). Behavioral neuroanatomy. Dans *Principles of Behavioral and Cognitive Neurology*, (Oxford: Oxford University Press), pp. 1-95.
214. Mesulam, M.M. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Ann. Neurol.* 28 597:613.
215. Meyer, M., Alter, K., Friederici, A.D., Lohmann, G., and Von Cramon, D.Y. (2002). FMRI reveals brain regions mediating slow prosodic modulations in spoken sentences. *Hum. Brain Mapp.* 17(2) 73:88.
216. Meyer, M., Steinhauer, K., Alter, K., Friederici, A.D., and Von Cramon, D.Y. (2004). Brain activity varies with modulation of dynamic pitch variance in sentence melody. *Brain Lang.* 89(2) 277:289.
217. Milner, B. (1958). Psychological defects produced by temporal lobe excision. Dans *The Brain and Human Behavior*, Inconnu, ed. Res. Publ. Ass. Nev. Trent. Dis.), pp. 244-257.
218. Mitchell, J.P. (2005). The false dichotomy between simulation and theory-theory: the argument's error. *Trends Cogn Sci.* 9(8) 363:364.

219. Mitchell, J.P., Banaji, M.R., and Macrae, C.N. (2005a). The link between social cognition and self-referential thought in the medial prefrontal cortex. *J Cogn Neurosci*. 17(8) 1306:1315.
220. Mitchell, J.P., Macrae, C.N., and Banaji, M.R. (2005c). Forming impressions of people versus inanimate objects: social-cognitive processing in the medial prefrontal cortex. *NeuroImage* 26(1) 251:257.
221. Mitchell, J.P., Macrae, C.N., and Banaji, M.R. (2005b). Encoding-Specific Effects of Social Cognition on the Neural Correlates of Subsequent Memory. *Journal of Neuroscience* 24(21) 4912:4917.
222. Mitchell, R.L., Elliott, R., Barry, M., Cruttenden, A., and Woodruff, P.W. (2003). The neural response to emotional prosody, as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia* 41(10) 1410:1421.
223. Monnot, M., Orbelo, D., Riccardo, L., Sikka, S., and Rossa, E. (2003). Acoustic analyses support subjective judgments of vocal emotion. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1000 288:292.
224. Monrad-Krohn, G.H. (1947). Dysprosody or altered 'melody of language'. *Brain* 70 405:415.
225. Moore, C.J., and Price, C.J. (1999). A functional neuroimaging study of the variables that generate category-specific object processing differences. *Brain* 122 (Pt 5) 943:962.
226. Morel, M., and Bänziger, T. (2004). Le rôle de l'intonation dans la communication vocale des émotions: test par la synthèse. *Cahiers de l'Institut de Linguistique de Louvain* 30(1-3) 207:232.
227. Morel, M., and Lacheret-Dujour, A. (2001). "Kali", synthèse vocale à partir du texte : de la conception à la mise en oeuvre. *Traitement Automatique des langues* 42 1:29.
228. Morel, M. A., and Danon-Boileau, L. (1998). *Grammaire de l'intonation - l'exemple du français* (Paris).
229. Mummery, C.J., Ashburner, J., Scott, S.K., and Wise, R.J. (1999). Functional neuroimaging of speech perception in six normal and two aphasic subjects. *J. Acoust. Soc. Am.* 106(1) 449:457.
230. Murayama, J., Kashiwagi, T., Kashiwagi, A., and Mimura, M. (2004). Impaired pitch production and preserved rhythm production in a right brain-damaged patient with amusia. *Brain Cogn.* 56(1) 36:42.
231. Murphy, F.C., Nimmo-Smith, I., and Lawrence, A.D. (2003). Functional neuroanatomy of emotions: a meta-analysis. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 3(3) 207:233.
232. Nathaniel-James, D.A., and Frith, C.D. (2002). The role of the dorsolateral prefrontal cortex: evidence from the effects of contextual constraint in a sentence completion task. *NeuroImage* 16(4) 1094:1102.
233. Nieuwenhuys, R., Voogd, J., and van Huijzen, C. (1988). *The human central nervous system. A synopsis and atlas* (Berlin, Springer-Verlag).
234. Noesselt, T., Shah, N.J., and Jancke, L. (2003). Top-down and bottom-up modulation of language related areas - An fMRI Study. *BMC. Neurosci.* 4(1) 13:
235. Noppeney, U., and Price, C.J. (2004). Retrieval of abstract semantics. *Neuroimage*. 22(1) 164:170.
236. Norris, C.J., Chen, E.E., Zhu, D.C., Small, S.L., and Cacioppo, J.T. (2004). The interaction of social and emotional processes in the brain. *J. Cogn. Neurosci.* 16(10) 1818:1829.
237. Northoff, G., and Bermpohl, F. (2004). Cortical midline structures and the self. *Trends Cogn Sci.* 8(3) 102:107.
238. Ochsner, K.N., Beer, J.S., Robertson, E.R., Cooper, J.C., Gabrieli, J.D., Kihlstrom, J.F., and D'Esposito, M. (2005). The neural correlates of direct and reflected self-knowledge. *NeuroImage* 28(4) 797:814.
239. Ochsner, K.N., Bunge, S.A., Gross, J.J., and Gabrieli, J.D. (2002). Rethinking feelings: an FMRI study of the cognitive regulation of emotion. *J. Cogn. Neurosci.* 14(8) 1215:1229.

240. Ochsner, K.N., Knierim, K., Ludlow, D.H., Hanelin, J., Ramachandran, T., Glover, G., and Mackey, S.C. (2004). Reflecting upon feelings: an fMRI study of neural systems supporting the attribution of emotion to self and other. *J. Cogn. Neurosci.* 16(10) 1746:1772.
241. Okada, K., Smith, K.R., Humphries, C., and Hickok, G. (2003). Word length modulates neural activity in auditory cortex during covert object naming. *Neuroreport* 14(18) 2323:2326.
242. Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9(1) 97:113.
243. Parker, G.J., Luzzi, S., Alexander, D.C., Wheeler-Kingshott, C.A., Ciccarelli, O., and Lambon Ralph, M.A. (2005). Lateralization of ventral and dorsal auditory-language pathways in the human brain. *NeuroImage* 24(3) 656:666.
244. Paul, L.K., Van Lancker-Sidtis, D., Schieffer, B., Dietrich, R., and Brown, W.S. (2003). Communicative deficits in agenesis of the corpus callosum: nonliteral language and affective prosody. *Brain Lang.* 85(2) 313:324.
245. Paulesu, E., Frith, C.D., and Frackowiak, R.S.J. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature* 362 342:345.
246. Paulesu, E., McCrory, E., Fazio, F., Menoncello, L., Brunswick, N., Cappa, S.F., Cotelli, M., Cossu, G., Corte, F., Lorusso, M., Pesenti, S., Gallagher, A., Perani, D., Price, C., Frith, C.D., and Frith, U. (2000). A cultural effect on brain function. *Nat. Neurosci.* 3(1) 91:96.
247. Pell, M.D. (1998). Recognition of prosody following unilateral brain lesion: influence of functional and structural attributes of prosodic contours. *Neuropsychologia* 36(8) 701:715.
248. Pell, M.D. (2005). Cerebral mechanisms for understanding emotional prosody in speech. *Brain Lang* 96(2) 221:234.
249. Pell, M.D., and Baum, S.R. (1997). Unilateral brain damage, prosodic comprehension deficits, and the acoustic cues to prosody. *Brain Lang.* 57(2) 195:214.
250. Pelphrey, K.A., Morris, J.P., and McCarthy, G. (2004). Grasping the intentions of others: the perceived intentionality of an action influences activity in the superior temporal sulcus during social perception. *J. Cogn. Neurosci.* 16(10) 1706:1716.
251. Perani, D., Cappa, S.F., Schnur, T., Tettamanti, M., Collina, S., Rosa, M.M., and Fazio, F. (1999). The neural correlates of verb and noun processing - A PET study. *Brain* 122 2337:2344.
252. Petit, L., Courtney, S.M., Ungerleider, L.G., and Haxby, J.V. (1998). Sustained activity in the medial wall during working memory delays. *J Neurosci.* 18(22) 9429:9437.
253. Phan, K.L., Wager, T., Taylor, S.F., and Liberzon, I. (2002). Functional neuroanatomy of emotion: a meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *NeuroImage* 16(2) 331:348.
254. Pierce, K., Muller, R.A., Ambrose, J., Allen, G., and Courchesne, E. (2001). Face processing occurs outside the fusiform 'face area' in autism: evidence from functional MRI. *Brain* 124(Pt 10) 2059:2073.
255. Pihan, H., Altenmuller, E., and Ackermann, H. (1997). The cortical processing of perceived emotion: a DC-potential study on affective speech prosody. *Neuroreport* 8(3) 623:627.
256. Poeppel, D. (2003). The analysis of speech, in different temporal integration window: cerebral lateralization as 'asymmetric sampling in time'. *speech communication* 41 245:255.
257. Poeppel, D., Guillemin, A., Thompson, J., Fritz, J., Bavelier, D., and Braun, A.R. (2004). Auditory lexical decision, categorical perception, and FM direction discrimination differentially engage left and right auditory cortex. *Neuropsychologia* 42(2) 183:200.
258. Poldrack, R.A., Wagner, A.D., Prull, M.W., Desmond, J.E., Glover, G.H., and Gabrieli, J.D. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage* 10(1) 15:35.

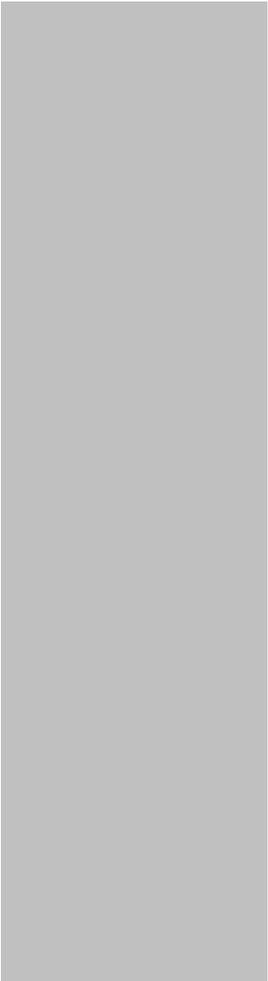
259. Poremba, A., Malloy, M., Saunders, R.C., Carson, R.E., Herscovitch, P., and Mishkin, M. (2004). Species-specific calls evoke asymmetric activity in the monkey's temporal poles. *Nature* 427(6973) 448:451.
260. Posner, M.I., Inhoff, A.W., and Friedrich, F.J. (1987). Isolating attentional systems: a cognitive-anatomical analysis. *Psychobiology* 15 107:121.
261. Premack, D., and Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behav. Brain Sci.* 4 515:526.
262. Price, C.J., Moore, C.J., Humphreys, G.W., and Wise, R.J. (1997). Segregating semantic from phonological processes during reading. *J. Cognitive Neurosci.* 9(6) 727:733.
263. Price, C.J., Wise, R.J., and Frackowiak, R.S. (1996a). Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cereb. Cortex* 6(1) 62:70.
264. Price, C.J., Wise, R.J., Warburton, E.A., Moore, C.J., Howard, D., Patterson, K., Frackowiak, R.S., and Friston, K.J. (1996b). Hearing and saying. The functional neuro-anatomy of auditory word processing. *Brain* 119 (Pt 3) 919:931.
265. Querleu, D., Renard, X., Versyp, F., Paris-Delrue, L., and Crepin, G. (1988). Fetal hearing. *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.* 28(3) 191:212.
266. Raichle, M.E., MacLeod, A.M., Snyder, A.Z., Powers, W.J., Gusnard, D.A., and Shulman, G.L. (2001). A default mode of brain function. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A* 98(2) 676:682.
267. Rasmussen, T., and Milner, B. (1977). The role of early left brain injury in determining lateralization of cerebral speech functions. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 299 355:369.
268. Reiman, E.M., Lane, R.D., Ahern, G.L., Schwartz, G.E., Davidson, R.J., Friston, K.J., Yun, L.S., and Chen, K. (1997). Neuroanatomical correlates of externally and internally generated human emotion. *Am. J. Psychiatry* 154(7) 918:925.
269. Ridderinkhof, K.R., Ullsperger, M., Crone, E.A., and Nieuwenhuis, S. (2004). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science* 306(5695) 443:447.
270. Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Dogil, G., and Grodd, W. (2000). Opposite hemispheric lateralization effects during speaking and singing at motor cortex, insula and cerebellum. *Neuroreport* 11(9) 1997:2000.
271. Roder, B., Stock, O., Neville, H., Bien, S., and Rosler, F. (2002). Brain activation modulated by the comprehension of normal and pseudo- word sentences of different processing demands: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage.* 15(4) 1003:1014.
272. Ronnberg, J., Rudner, M., and Ingvar, M. (2004). Neural correlates of working memory for sign language. *Brain Res. Cogn Brain Res.* 20(2) 165:182.
273. Roskies, A.L., Fiez, J.A., Balota, D.A., Raichle, M.E., and Petersen, S.E. (2001). Task-dependent modulation of regions in the left inferior frontal cortex during semantic processing. *J. Cog. Neurosci.* 13(6) 829:843.
274. Ross, E.D. (1981). The aprosodias. Functional-anatomic organization of the affective components of language in the right hemisphere. *Arch. Neurol.* 38(9) 561:569.
275. Ross, E. D., and Mesulam, M.M. (2000). Affective Prosody and the Aprosodias. Dans *Principles of Behavioral and Cognitive Neurology.*, (Oxford: Oxford university press), pp. 316-331.
276. Ross, E.D., Thompson, R.D., and Yenkosky, J. (1997). Lateralization of affective prosody in brain and the callosal integration of hemispheric language functions. *Brain Lang.* 56(1) 27:54.
277. Rossi, M. (1999b). La dichotomie -segmental/suprasegmental- est-elle justifiée? Dans *Leçons d'Afrique, filiations, ruptures et reconstitution de langues. Hommage à Gabriel Manessy.*, Kluwer, ed. (Amsterdam: pp. 551-567.

-
278. Rossi, M. (1999a). *L'intonation, le système du français - description et modélisation* (Paris).
279. Ruby, P., and Decety, J. (2003). What you believe versus what you think they believe: a neuroimaging study of conceptual perspective-taking. *Eur. J Neurosci.* 17(11) 2475:2480.
280. Rumeau, C., Tzourio, N., Murayama, N., Peretti-Vitton, P., Levrier, O., Joliot, M., Mazoyer, B., and Salamon, G. (1994). Location of hand function in the sensorimotor cortex: magnetic resonance and functional correlation. *AJNR* 15 425:433.
281. Rushworth, M.F., Walton, M.E., Kennerley, S.W., and Bannerman, D.M. (2004). Action sets and decisions in the medial frontal cortex. *Trends Cogn. Sci.* 8(9) 410:417.
282. Rypma, B., Prabhakaran, V., Desmond, J.E., Glover, G.H., and Gabrieli, J.D. (1999). Load-dependent roles of frontal brain regions in the maintenance of working memory. *NeuroImage* 9(2) 216:226.
283. Sander, K., Brechmann, A., and Scheich, H. (2003). Audition of laughing and crying leads to right amygdala activation in a low-noise fMRI setting. *Brain Res. Brain Res. Protoc.* 11(2) 81:91.
284. Savage, C.R., Deckersbach, T., Heckers, S., Wagner, A.D., Schacter, D.L., Alpert, N.M., Fischman, A.J., and Rauch, S.L. (2001). Prefrontal regions supporting spontaneous and directed application of verbal learning strategies - Evidence from PET. *Brain* 124 219:231.
285. Saxe, R. (2005). Against simulation: the argument from error. *Trends Cogn. Sci.* 9(4) 174:179.
286. Saxe, R., Carey, S., and Kanwisher, N. (2004a). UNDERSTANDING OTHER MINDS: Linking Developmental Psychology and Functional Neuroimaging. *Annu. Rev. Psychol.* 55 87:124.
287. Saxe, R., and Kanwisher, N. (2003). People thinking about thinking people. The role of the temporo-parietal junction in "theory of mind". *NeuroImage* 19(4) 1835:1842.
288. Saxe, R., Xiao, D.K., Kovacs, G., Perrett, D.I., and Kanwisher, N. (2004b). A region of right posterior superior temporal sulcus responds to observed intentional actions. *Neuropsychologia* 42(11) 1435:1446.
289. Saygin, A.P., Dick, F., Wilson, W., Dronkers, F., and Bates, E. (2003). Neural resources for processing language and environmental sounds: Evidence from aphasia. *Brain* 126(Pt 4) 928:945.
290. Scherer, K.R. (1986). Vocal affect expression: a review and a model for future research. *Psychol. Bull.* 99(2) 143:165.
291. Schirmer, A., and Kotz, S.A. (2003). ERP Evidence for a Sex-Specific Stroop Effect in Emotional Speech. *J. Cogn. Neurosci.* 15(8) 1135:1148.
292. Schirmer, A., and Kotz, S.A. (2006). Beyond the right hemisphere: brain mechanisms mediating vocal emotional processing. *Trends Cogn Sci.* 10(1) 24:30.
293. Schirmer, A., Kotz, S.A., and Friederici, A.D. (2005a). On the role of attention for the processing of emotions in speech: Sex differences revisited. *Brain Res. Cogn Brain Res.* 24(3) 442:452.
294. Schirmer, A., Kotz, S.A., and Friederici, A.D. (2002). Sex differentiates the role of emotional prosody during word processing. *Brain Res. Cogn Brain Res.* 14(2) 228:233.
295. Schirmer, A., Striano, T., and Friederici, A.D. (2005b). Sex differences in the preattentive processing of vocal emotional expressions. *Neuroreport* 16(6) 635:639.
296. Schirmer, A., Zysset, S., Kotz, S.A., and Yves, v.C. (2004). Gender differences in the activation of inferior frontal cortex during emotional speech perception. *NeuroImage* 21(3) 1114:1123.
297. Schmitz, T.W., and Johnson, S.C. (2006). Self-appraisal decisions evoke dissociated dorsal-ventral aMPFC networks. *NeuroImage* 30(3) 1050:1058.
298. Schultz, R.T. (2005). Developmental deficits in social perception in autism: the role of the amygdala and fusiform area. *Int. J. Dev. Neurosci.* 23(2-3) 125:141.

299. Scott, S.K., Blank, C.C., Rosen, S., and Wise, R.J. (2000). Identification of a pathway for intelligible speech in the left temporal lobe. *Brain* 123(Pt 12) 2400:2406.
300. Scott, S.K., and Johnsrude, I.S. (2003). The neuroanatomical and functional organization of speech perception. *Trends Neurosci.* 26(2) 100:107.
301. Scott, S.K., Young, A.W., Calder, A.J., Hellawell, D.J., Aggleton, J.P., and Johnson, M. (1997). Impaired auditory recognition of fear and anger following bilateral amygdala lesions. *Nature* 385(6613) 254:257.
302. Sekiyama, K., Kanno, I., Miura, S., and Sugita, Y. (2003). Auditory-visual speech perception examined by fMRI and PET. *Neurosci. Res.* 47(3) 277:287.
303. Sevostianov, A., Horwitz, B., Nechaev, V., Williams, R., Fromm, S., and Braun, A.R. (2002). fMRI study comparing names versus pictures of objects. *Hum. Brain Mapp.* 16(3) 168:175.
304. Shannon, C., and Weaver, W. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27 379:423.
305. Small, S.L., Noll, D.C., Perfetti, C.A., Hlustik, P., Wellington, R., and Schneider, W. (1996). Localizing the lexicon for reading aloud: replication of a PET study using fMRI. *Neuroreport* 7 961:965.
306. Sokhi, D.S., Hunter, M.D., Wilkinson, I.D., and Woodruff, P.W. (2005). Male and female voices activate distinct regions in the male brain. *NeuroImage* 27(3) 572:578.
307. Specht, K., and Reul, J. (2003). Functional segregation of the temporal lobes into highly differentiated subsystems for auditory perception: an auditory rapid event-related fMRI-task. *NeuroImage* 20(4) 1944:1954.
308. Speedie, L.J., Coslett, H.B., and Heilman, K.M. (1984). Repetition of affective prosody in mixed transcortical aphasia. *Arch. Neurol.* 41(3) 268:270.
309. Springer, and Deutsch (2000). *Cerveau gauche et cerveau droit. A la lumière des neurosciences.*
310. Stowe, L.A., Broere, C.A., Paans, A.M., Wijers, A.A., Mulder, G., Vaalburg, W., and Zwarts, F. (1998). Localizing components of a complex task: sentence processing and working memory. *Neuroreport.* 9(13) 2995:2999.
311. Stromswold, K., Caplan, D., Alpert, N., and Rauch, S. (1996). Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain Lang* 52(3) 452:473.
312. Stuss, D.T., and Anderson, V. (2004). The frontal lobes and theory of mind: developmental concepts from adult focal lesion research. *Brain Cogn.* 55(1) 69:83.
313. Stuss, D.T., Gallup, G.G., Jr., and Alexander, M.P. (2001). The frontal lobes are necessary for 'theory of mind'. *Brain* 124(Pt 2) 279:286.
314. Sugiura, M., Gotoh, R., Okada, K., Yamaguchi, K., Itoh, M., Fukuda, H., and Kawashima, R. (2004). Target dependency of brain mechanism involved in dispositional inference: a PET study. *Neuroimage.* 21(4) 1377:1386.
315. Talairach, J., and Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain 3- dimensional proportional system: an approach to cerebral imaging (Stuttgart-New York).*
316. Tervaniemi, M., and Hugdahl, K. (2003). Lateralization of auditory-cortex functions. *Brain Res. Rev.* 43(3) 231:246.
317. Thompson-Schill, S.L., Aguirre, G., D'Esposito, M., and Farah, M.J. (1999). A neural basis for category and modality specific of semantic knowledge. *Neuropsychologia* 37 671:676.
318. Thompson-Schill, S.L., D'Esposito, M., Aguirre, G.K., and Farah, M.J. (1997). Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge: A reevaluation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94(26) 14792:14797.

319. Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Les réseaux neuraux dédiés au langage chez l'adulte sain. Dans *Cerveau et langage*.
320. Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., Mazoyer, B., and Joliot, M. (2002). Automated Anatomical Labeling of Activations in SPM Using a Macroscopic Anatomical Parcellation of the MNI MRI Single-Subject Brain. *Neuroimage*. 15(1) 273:289.
321. Van Lancker Sidtis, D.V. (2006). Does functional neuroimaging solve the questions of neurolinguistics? *Brain Lang* 98(3) 276:290.
322. Van Lancker, D., and Sidtis, J.J. (1992). The identification of affective-prosodic stimuli by left- and right-hemisphere-damaged subjects: all errors are not created equal. *J. Speech Hear. Res.* 35(5) 963:970.
323. Vandenberghe, R., Price, C., Wise, R., Josephs, O., and Frackowiak, R.S.J. (1996). Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature* 383 254:256.
324. Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P.-Y., Duffau, H., Crivello, F., Houde, O., Mazoyer, B., and Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage* 30(4) 1414:1432.
325. Villringer, A., and Dirnagl, U. (1995). Coupling of brain activity and cerebral blood flow: basis of functional neuroimaging. *Cerebrovasc. Brain Metab Rev.* 7(3) 240:276.
326. Vingerhoets, G., Van Borsel, J., Tesink, C., van den, N.M., Deblaere, K., Seurinck, R., Vandemaele, P., and Achten, E. (2003). Multilingualism: an fMRI study. *NeuroImage* 20(4) 2181:2196.
327. Vogeley, K., Bussfeld, P., Newen, A., Herrmann, S., Happe, F., Falkai, P., Maier, W., Shah, N.J., Fink, G.R., and Zilles, K. (2001). Mind reading: neural mechanisms of theory of mind and self-perspective. *NeuroImage* 14(1 Pt 1) 170:181.
328. Vollm, B.A., Taylor, A.N., Richardson, P., Corcoran, R., Stirling, J., McKie, S., Deakin, J.F., and Elliott, R. (2006). Neuronal correlates of theory of mind and empathy: A functional magnetic resonance imaging study in a nonverbal task. *NeuroImage* 29(1) 90:98.
329. Vouloumanos, A., Kiehl, K.A., Werker, J.F., and Liddle, P.F. (2001). Detection of sounds in the auditory stream: Event-related fMRI evidence for differential activation to speech and nonspeech. *J. Cogn. Neurosci.* 13(7) 994:1005.
330. Wada, J., and Rasmussen, T. (1960). Intracarotid injection of sodium amytal for the lateralisation of cerebral speech dominance. *J. Neurosurg.* 17 226:282.
331. Wagner, A.D., Koutstaal, W., Maril, A., Schacter, D.L., and Buckner, R.L. (2000). Task-specific repetition priming in left inferior prefrontal cortex. *Cereb. Cortex* 10(12) 1176:1184.
332. Wagner, A.D., Pare-Blagoev, E.J., Clark, J., and Poldrack, R.A. (2001). Recovering meaning: left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval. *Neuron* 31(2) 329:338.
333. Walter, H., Adenzato, M., Ciaramidaro, A., Enrici, I., Pia, L., and Bara, B.G. (2004). Understanding intentions in social interaction: the role of the anterior paracingulate cortex. *J. Cogn. Neurosci.* 16(10) 1854:1863.
334. Warburton, E.A., Wise, R.J.S., Price, C.J., Weiller, C., Hadar, U., Ramsay, S., and Frackowiak, R.S.J. (1996). Noun and verb retrieval by normal subjects. Studies with PET. *Brain* 119 159:179.
335. Warren, J.D., Jennings, A.R., and Griffiths, T.D. (2005). Analysis of the spectral envelope of sounds by the human brain. *NeuroImage* 24(4) 1052:1057.
336. Waters, G., Caplan, D., Alpert, N., and Stanczak, L. (2003). Individual differences in rCBF correlates of syntactic processing in sentence comprehension: effects of working memory and speed of processing. *NeuroImage* 19(1) 101:112.
337. Wiggs, C.L., Weisberg, J., and Martin, A. (1999). Neural correlates of semantic and episodic memory retrieval. *Neuropsychologia* 37(1) 103:118.

338. Wildgruber, D., Ackermann, H., and 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(1) 101:109.
339. Wildgruber, D., Ackermann, H., Klose, U., Kardatzki, B., and Grodd, W. (1996). Functional lateralization of speech production at primary motor cortex: a fMRI study. *Neuroreport* 7 2791:2795.
340. Wildgruber, D., Hertrich, I., Riecker, A., Erb, M., Anders, S., Grodd, W., and Ackermann, H. (2004). Distinct frontal regions subserve evaluation of linguistic and emotional aspects of speech intonation. *Cereb. Cortex* 14(12) 1384:1389.
341. Wildgruber, D., Pihan, H., Ackermann, H., Erb, M., and Grodd, W. (2002). Dynamic brain activation during processing of emotional intonation: influence of acoustic parameters, emotional valence, and sex. *NeuroImage* 15(4) 856:869.
342. Wildgruber, D., Riecker, A., Hertrich, I., Erb, M., Grodd, W., Ethofer, T., and Ackermann, H. (2005). Identification of emotional intonation evaluated by fMRI. *NeuroImage* 24(4) 1233:1241.
343. Wilson, S.M., Saygin, A.P., Sereno, M.I., and Iacoboni, M. (2004). Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nat. Neurosci.* 7(7) 701:702.
344. Wise, R.J., Scott, S.K., Blank, S.C., Mummery, C.J., Murphy, K., and Warburton, E.A. (2001). Separate neural subsystems within 'Wernicke's area'. *Brain* 124(Pt 1) 83:95.
345. Woodruff, G., and Premack, D. (1979). Intentional communication in the chimpanzee: The development of deception. *Cognition* 7 333:362.
346. Woods, R.P., Cherry, S.R., and Mazziotta, J.C. (1992). Rapid automated algorithm for aligning and reslicing PET images. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 16 620:633.
347. Yousry, T.A., Schmid, U.D., Alkadhi, H., Schmidt, D., Peraud, A., Buettner, A., and Winkler, P. (1997). Localization of the motor hand area to a knob on the precentral gyrus. A new landmark. *Brain* 120 (Pt 1) 141:157.
348. Zatorre, R.J., and Belin, P. (2001). Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cereb. Cortex* 11(10) 946:953.
349. Zatorre, R.J., Belin, P., and Penhune, V.B. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends Cogn. Sci.* 6(1) 37:46.
350. Zatorre, R.J., Evans, A.C., Meyer, E., and Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science* 256(5058) 846:849.
351. Zatorre, R.J., Meyer, E., Gjedde, A., and Evans, A.C. (1996). PET studies of phonetic processing of speech: review, replication, and reanalysis. *Cereb. Cortex* 6(1) 21:30.
352. Zysset, S., Huber, O., Ferstl, E., and Von Cramon, D.Y. (2002). The anterior frontomedian cortex and evaluative judgment: an fMRI study. *NeuroImage* 15(4) 983:991.



Publications

I. PUBLICATRIONS SCIENTIFIQUES DANS DES REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

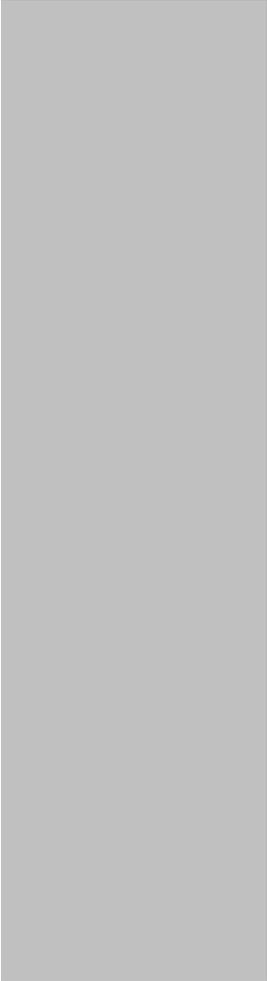
- **Beaucousin, V.**, Vigneau, M., Hervé, P-Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. Meta-anlysing left hemisphere language areas for phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*. 30(4)1414-1432.
- **Beaucousin, V.**, Lacheret-Dujour, A., Turbelin, M-R., Morel, M., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. FMRI Study of Emotional Speech Comprehension. *Cerebral Cortex* (sous presse)
- Dollfus, S., Razafimandimby, A., Maiza, O., Lebain, P., Brazo, P, **Beaucousin, V.**, Lecardeur, L., Delamillieure, P., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. Functional deficit in medial prefrontal cortex in schizophrenic patients: a cause of impaired communication and social interaction?. *Am. J. Psychiatry* (soumis).

II. CHAPITRE DE LIVRE

- **Beaucousin, V.**, Lacheret-Dujour, A., Tzourio-Mazoyer, N. (2003) La prosodie. *Cerveau et Langage*. Paris : Hermès, 223-247.

III. COMMUNICATIONS INTERNATIONALES AFFICHEES

- **Beaucousin, V., Dubois, M., Courtin, C., Perchey, G., Gorzkowski, S., Leix, J., Mazoyer, M., Tzourio-Mazoyer, N. (2005)** Language hemispheric specialization in early oral/sign language bilinguals. 11th International Conference on functional Mapping of the Human Brain, Neuroimage, Volume 26, Supplement 1.
- **Dubois, M., Courtin, C., Hervé, P-Y., Beaucousin, V., Perchey, G., Gorzkowski, S., Lawrin, E., Leix, J., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. (2005)** Functional anatomy of French Sign Language (LSF) production and comprehension in expert bilinguals 11th International Conference on functional Mapping of the Human Brain, Neuroimage, Volume 26, Supplement 1.
- **Dubois, M., Courtin, C., Vigneau, M., Beaucousin, V., Rauyer, J., Perchey, G., Gorkowski, S., Leix, J., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. (2005)** Involvement of semantic network during sign language presentation in naïve monolinguals. 11th International Conference on functional Mapping of the Human Brain, Neuroimage, Volume 26, Supplement 1.
- **Dubois, M., Courtin, C., Beaucousin, V., Perchey, G., Gorzkowski, S., Leix, J., Mazoyer, B., Mellet, E., Tzourio-Mazoyer, N. (2005)** Neural impact of French Sign Language (LSF) linguistic characteristics in native sign/oral bilinguals. 11th International Conference on functional Mapping of the Human Brain, Neuroimage, Volume 26, Supplement 1.
- **Beaucousin, V., Lacheret-Dujour, A., Turbelin, M-R., Morel, M., Joliot, M., Perchey, G., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. (2004)** Neural basis of affective sentences processing and affective prosody. 10th International Conference on functional Mapping of the Human Brain, Neuroimage, Volume 22, Supplement 1, pp e11.
- **Beaucousin, V., Lacheret-Dujour, A., Turbelin, M-R., Morel, M., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. (2004)** « Développement et validation psycholinguistique d'un corpus pour l'étude des bases neurales de la prosodie affective » 25èmes Journées d'étude sur la parole, Fès, Maroc.



Annexes

I. ANNEXE 1 : PRINCIPE DE L'IRM ET ANALYSE DES DONNEES FONCTIONNELLES

1. PRINCIPE DE L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) a été inventée au début des années 1970 par Paul Lauterbur (pour plus de détail voir Houdé *et al.*, 2002). Elle repose sur le phénomène physique de résonance magnétique nucléaire, et utilise les propriétés magnétiques des noyaux d'hydrogène, constituant de l'eau qui compose la matière organique. De part ses propriétés magnétiques, le noyau d'hydrogène va se comporter comme un petit aimant (voir Houdé *et al.*, 2002). En l'absence de champ magnétique externe, les moments magnétiques - ou spins - des noyaux d'hydrogène (correspondant à l'axe de rotation de ses noyaux) s'orientent de façon aléatoire, la résultante de l'ensemble des moments étant nulle. Lorsque le sujet est placé dans le champ magnétique de la machine - *champ B_0* -, tous les spins vont s'orienter majoritairement selon B_0 , créant ainsi un moment magnétique non nul (M_0) qui correspond à l'aimantation moyenne de l'ensemble des noyaux d'hydrogène (Figure 48).

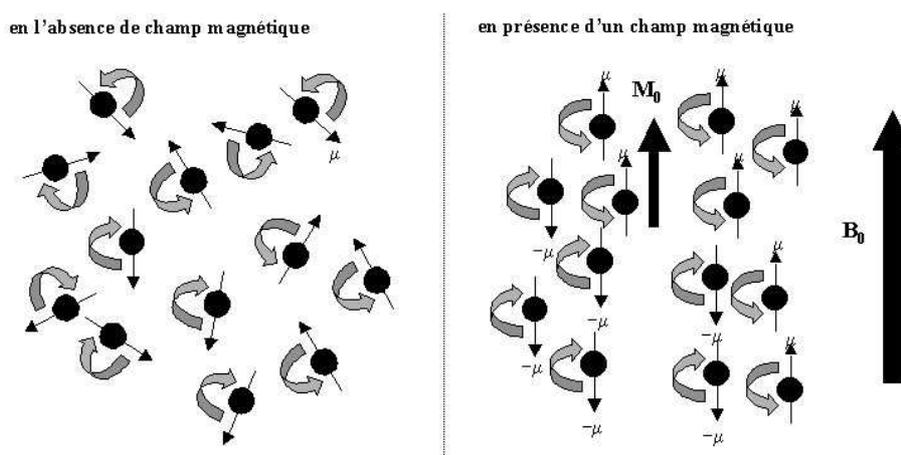


Figure 48. Principe d'orientation des moments magnétiques (ou spins) des noyaux d'hydrogène dans un champ magnétique.

A gauche : en l'absence de champ magnétique, les noyaux d'hydrogène de la matière (en noir) ont un moment magnétique orienté de manière aléatoire. La résultante M de ces moments est nulle. A droite : en présence du champ magnétique B_0 de la machine, tous ces moments magnétiques vont s'orienter suivant l'axe du champ, majoritairement dans la même direction, créant ainsi un moment magnétique non nul, appelé M_0 (repris de Houdé *et al.*, 2002).

Ce moment magnétique résultant M_0 étant négligeable par rapport au champ magnétique B_0 et, qui plus est, orienté dans le même sens, il est impossible de le mesurer en l'état. L'objectif d'une expérience d'IRM étant de disposer d'une mesure de cette composante M_0 en tout point du cerveau, il est alors nécessaire de l'orienter dans une direction différente de celle du champ B_0 . Pour y parvenir, un second champ magnétique B_1 , perpendiculaire au champ B_0 , est appliqué à l'aide d'une antenne radio-fréquence placée autour de la tête du sujet (Figure 49). Lorsque le champ magnétique B_1 tourne à la fréquence propre de rotation des spins des protons (ou fréquence de Larmor), la composante M_0 va basculer pour faire apparaître dans le plan perpendiculaire à B_0 une composante transverse : c'est le phénomène de *résonance magnétique*. Plus le temps d'application de ce champ B_1 sera long, plus l'angle de bascule de M_0 augmentera. Connaissant cet angle de bascule, il devient alors possible de calculer la valeur de M_0 à partir de la valeur mesurée de la composante transverse.

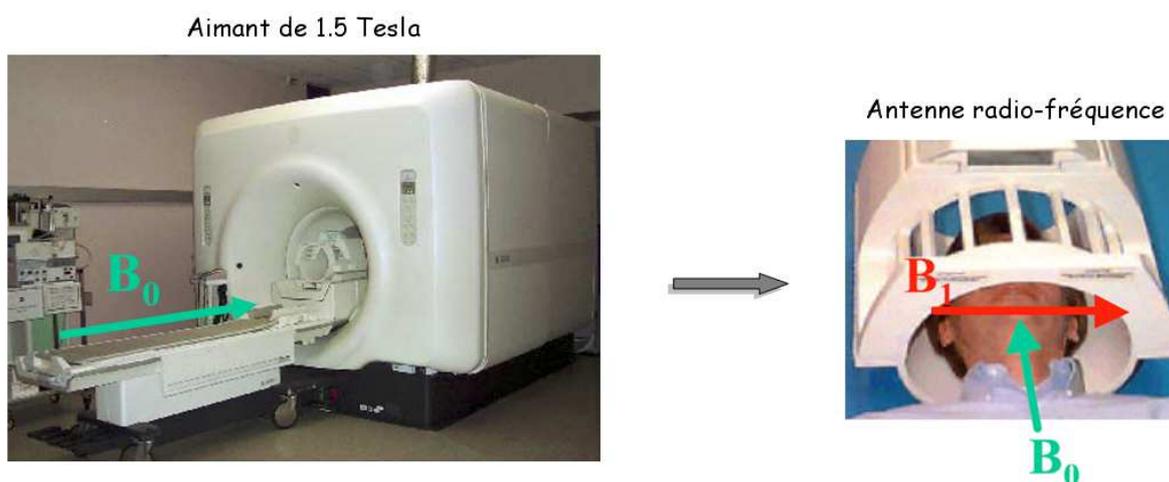


Figure 49. Caméra IRM et antenne radio-fréquence.

A gauche : photo de la caméra IRM utilisée pour l'acquisition des données d'imagerie. A droite : antenne radio-fréquence servant d'émetteur pour le champ magnétique B_1 , et de récepteur pour enregistrer les variations de champ magnétique.

La mesure de la composante transverse est réalisée à l'aide de l'antenne radio-fréquence utilisée pour générer le champ magnétique B_1 . Par induction magnétique, cette composante va induire dans l'antenne un courant alternatif dont l'amplitude pourra être mesurée. Pour disposer d'une mesure de cette composante transverse, il est nécessaire de couper le champ B_1 . L'effet observé sera un retour progressif, sous l'effet de B_0 , de la composante M à sa position d'équilibre : c'est la *relaxation*. Dans les milieux biologiques, ce phénomène de relaxation n'est pas instantané mais est caractérisé par deux constantes de temps appelées temps de relaxation : 1- le *temps de relaxation longitudinale* ou temps

T_1 , détermine la vitesse de retour de la composante M_z (composante longitudinale) à sa valeur initiale M_0 ; 2- le *temps de relaxation transversale*, noté T_2 et T_2^* , caractérise la vitesse de disparition de la composante transverse de M . Le temps T_2 est habituellement plus court que T_1 et la composante transverse disparaît donc plus rapidement que ne se reconstruit l'aimantation longitudinale M_z . Ces valeurs de temps de relaxation T_1 et T_2 ne sont pas constantes d'un tissu à un autre, mais vont varier suivant leur composition biochimique. Ce sont ces différences qui seront mises à profit en IRM pour distinguer différents types de tissus.

A. Application à l'acquisition d'images anatomiques

Le cerveau, composé à 80 % de molécules d'eau, de graisse et de protéines, est formé de trois « compartiments » : la substance grise (SG), incluant le cortex, la substance blanche (SB) et le liquide céphalo-rachidien (LCR). Ces trois compartiments présentent une composition biochimique différente. Ainsi, le LCR contient plus d'eau, la substance grise plus de protéines, et la substance blanche plus de graisse. Ces compositions différentes confèrent aux trois compartiments des temps de relaxation T_1 et T_2 différents. En mettant à profit ces différences, il devient possible de créer en IRM des images anatomiques bi- ou tridimensionnelles permettant de visualiser différents types d'information (Figure 50) :

- *les images pondérées en T_1* : elles permettent de visualiser clairement la limite anatomique entre la substance grise, la substance blanche et le LCR, car c'est pour ce paramètre que la différence entre les deux tissus est la plus élevée en terme de temps de relaxation (1000, 718 et 2060 millisecondes, respectivement pour la SG, SB et LCR)
- *les images pondérées en T_2 ou DP (en Densité de Proton)* : elles n'autorisent qu'une très faible délimitation entre la substance blanche et le cortex (100 ms et 80 ms, respectivement pour la SG et SB), mais fournit une bonne définition du LCR.

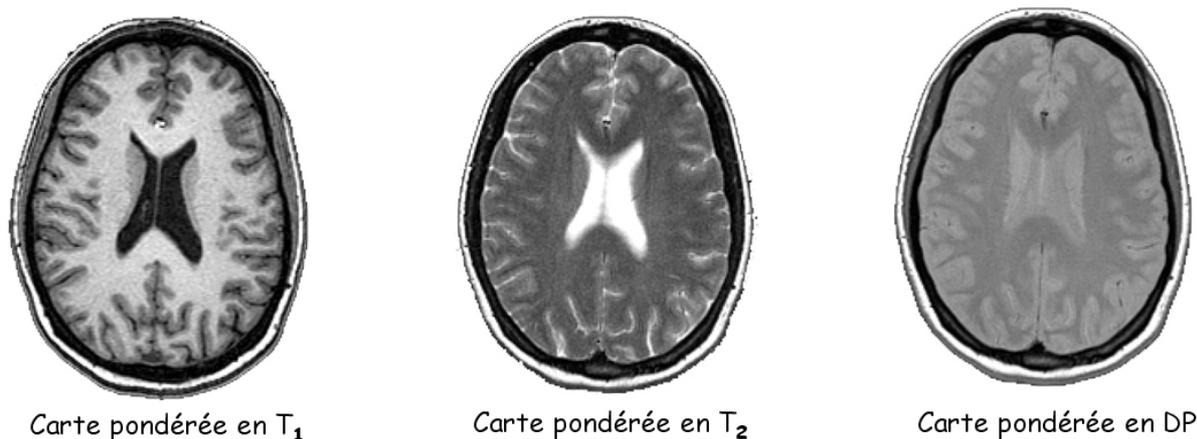


Figure 50. Coupes axiales d'une même IRM anatomique pondérée en T₁, T₂ ou DP. L'intensité de chaque compartiment va varier selon le type de pondération effectué.

B. Application à l'acquisition d'images fonctionnelles

La méthode d'IRM fonctionnelle repose sur l'étude des variations locales de débit sanguin et d'oxygénation lors de la réalisation d'une tâche cognitive particulière. L'idée d'une relation entre l'activité fonctionnelle cérébrale et les variations locales de débit sanguin cérébral est déjà ancienne. A la fin du siècle dernier, Roy et Sherrington écrivaient que « le cerveau possède un mécanisme intrinsèque par lequel son alimentation vasculaire peut varier localement avec les variations d'activité fonctionnelle » (Roy et Sherrington, 1890). C'est sur ce postulat qu'ont été développées les méthodes d'imagerie fonctionnelle utilisant des traceurs du débit sanguin cérébral.

a- L'activité électrique

L'exécution de processus cognitifs repose sur un ensemble spatio-temporel d'activités électriques, telles que la modulation des fréquences de décharge des neurones ou la modulation de la phase des trains de décharge (synchronisation, désynchronisation). Ces modulations se traduisent toutes par des modifications électrochimiques au niveau des synapses des neurones impliqués dans la tâche. En d'autres termes, un processus cognitif va conduire à une variation du re-largage de neurotransmetteurs, que ceux-ci soient excitateurs, c'est-à-dire entraînant une dépolarisation de la membrane post-synaptique, ou inhibiteurs, c'est-à-dire entraînant une hyperpolarisation de la membrane post-synaptique. Tous ces mécanismes électriques vont provoquer une augmentation de la consommation d'énergie locale sous forme de dégradation de molécules riches en énergie, comme les molécules d'ATP (Adénosine TriPhosphate), et une augmentation des produits du catabolisme. Au bilan, la mise en jeu des processus cognitifs provoque une variation de la

consommation d'oxygène et de glucose, ainsi qu'une variation du débit sanguin cérébral local.

b- L'activité métabolique

Contrairement à d'autres organes du corps humain, le cerveau n'a qu'une seule source d'énergie, le glucose. Cependant, le stock de glucose est relativement limité dans le cerveau, comme en témoignent les troubles cérébraux associés à une hypoglycémie pouvant aller jusqu'à une perte de connaissance. Tout processus cognitif implique donc un apport rapide de glucose supplémentaire.

c- L'activité hémodynamique

On appelle réponse vasculaire, l'ajustement du débit sanguin cérébral régional (DSCr) en relation avec les modifications d'activités électriques neurales sous-tendant les processus cognitifs. Notons que le couplage entre l'activité hémodynamique et l'activité neurale est encore à l'heure actuelle un sujet d'étude très ouvert. L'origine de cette réponse n'est pas claire. La réponse vasculaire sert-elle essentiellement à maintenir constant l'apport d'oxygène et de glucose, ou sert-elle principalement à éliminer les produits du catabolisme du glucose tels que le CO₂ ou l'ion H⁺ et serait-elle ainsi déclenchée par la production de ces éléments ? (voir Villringer et Dirnagl, 1995 pour une revue).

d- Relations entre activité électrique, métabolisme et réponse vasculaire

Lors de l'exécution de la tâche cognitive, l'augmentation locale de débit sanguin enrichit le réseau capillaire en sang artériel riche en oxygène, d'une façon qui dépasse largement la demande métabolique. Cette inadéquation entre l'offre et la demande en oxygène va engendrer une diminution de la concentration en hémoglobine non oxygénée (désoxy-hémoglobine, notée désoxy-Hb) dans les capillaires veineux. Cette chute de concentration en désoxy-Hb est appelée *effet BOLD*, et constitue le signal de base enregistré en IRMf (Figure 51). La molécule d'hémoglobine présente en effet la particularité de contenir un atome de fer la rendant paramagnétique sous sa forme désoxygénée. Placée dans un champ magnétique, cette molécule de désoxy-Hb va provoquer certaines inhomogénéités, lesquelles seront mesurées afin de disposer d'images fonctionnelles (voir Houdé *et al.*, 2002 pour plus de détails). Cette méthode - plus connue en anglais sous le nom de *Blood Oxygen Level Dependant*, *BOLD* - a pris son essor au début

des années 90 (Bandettini *et al.*, 1992; Kwong *et al.*, 1992) et constitue actuellement la méthode la plus répandue en IRMf.

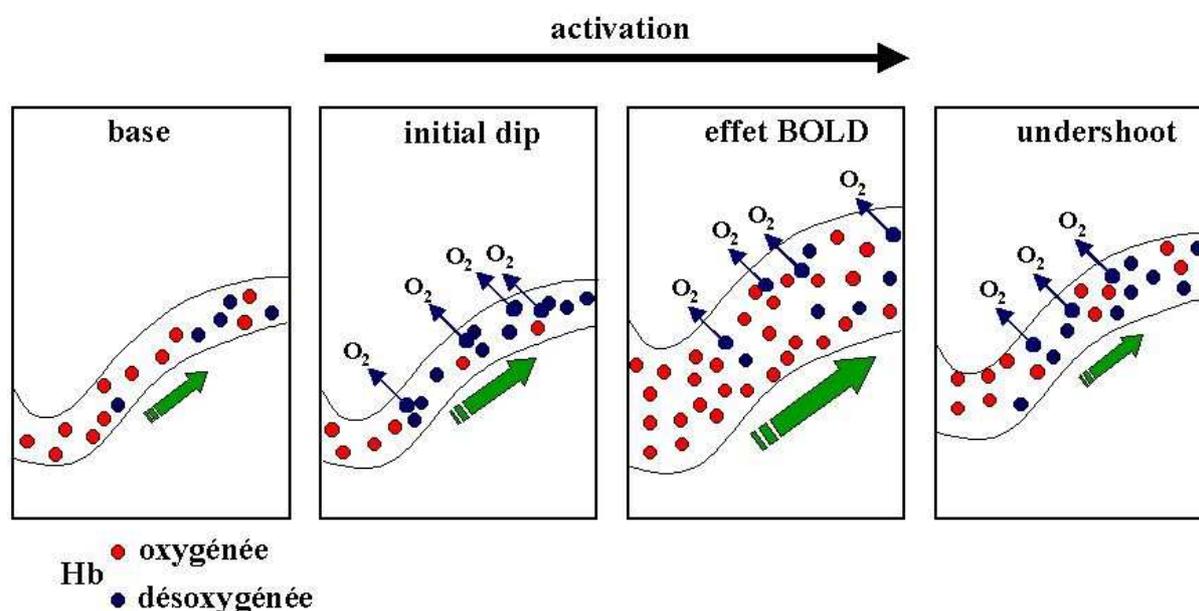


Figure 51. Bases physiologiques du signal BOLD.

A l'état de base, les vaisseaux sanguins contiennent de l'oxy- et un peu de désoxy-hémoglobine (Hb). Lorsque les neurones voisins de ces vaisseaux sont activés, un apport d'oxygène est indispensable afin de leur fournir l'énergie nécessaire pour fonctionner. Cet apport d'oxygène (initial dip) conduit à l'augmentation de la teneur en désoxy-Hb qui provoque la dilatation rapide des vaisseaux sanguins, et l'augmentation du Débit Sanguin Cérébral régional (DSCr). On assiste alors à l'effet BOLD (1-2 sec) qui est mesuré par l'IRMf, c'est-à-dire au brusque apport en oxy-Hb, et donc une diminution de désoxy-Hb. Ce phénomène prend fin avec l'undershoot, période au cours de laquelle le DSCr revient au niveau de base (repris de Houdé *et al.*, 2002).

La présence de désoxy-Hb provoque une inhomogénéité du champ magnétique, entraînant un déphasage plus rapide des moments des protons (c'est à dire un retour plus rapide de la composante M à l'état d'équilibre), soit une réduction de la valeur de T_2 ou T_2^* . Lors d'une épreuve d'activation, la concentration en désoxy-Hb diminuant, la traduction macroscopique de cette diminution sera une augmentation de la valeur de T_2 ou T_2^* . Le signal mesuré en IRMf étant corrélé à l'activité électrique des neurones (Raichle *et al.*, 2001; Bandettini et Ungerleider, 2001), une acquisition pondérée en T_2 ou T_2^* permettra ainsi de disposer, en un temps très court, d'une carte des variations régionales de l'activité cérébrale.

2. TRAITEMENT DES IMAGES ANATOMIQUES ET FONCTIONNELLES

Une fois les images anatomiques et fonctionnelles reconstruites, nous avons procédé à une série de traitements à l'aide de logiciels semi-automatiques. Un premier recalage temporel intra-sujet est effectué, afin de recalibrer les images acquises au cours de la session fonctionnelle. Un second recalage, spatial, va permettre de corriger l'orientation des images entre-elles, variations d'orientation qui sont liées aux faibles mouvements irrésistibles de la tête du sujet.

Par ailleurs, l'existence d'une variabilité anatomique interindividuelle - variabilité de volume, de taille du cerveau et de position des sillons et des gyri - rendant difficile la comparaison inter-sujet, un processus de *normalisation stéréotaxique* des données anatomiques et fonctionnelles est réalisé. Ce procédé consiste à placer le cerveau du sujet dans un espace commun, l'espace stéréotaxique. L'utilisation de cet espace, commun à la collectivité scientifique, permet ainsi de comparer les données issues de diverses études de neuroimagerie.

Les deux dernières étapes sont réalisées sur les images fonctionnelles. La première étape consiste à normaliser l'amplitude du signal contenu dans ces images, afin de s'affranchir des variations artefactuelles liées à des instabilités du champ magnétique. L'autre étape consiste en un filtrage spatial permettant d'augmenter le rapport signal sur bruit dans les images.

A. Recalage intra sujet

La première étape consiste en un recalage temporel des images fonctionnelles, c'est-à-dire en une correction des différences temporelles d'acquisition. Durant la session d'acquisition fonctionnelle, chaque volume cérébral est acquis pendant une durée prédéterminée correspondant au temps de répétition (TR), soit 6 secondes pour notre protocole. Durant un TR, les 32 coupes formant ce volume cérébral ne sont pas acquises simultanément, mais les unes après les autres. De ce fait, le signal hémodynamique de la première coupe sera différent du signal de la dernière coupe, puisque acquis avec un délai de 6 secondes. La procédure de recalage temporel va permettre de corriger ces différences en prenant comme référence temporelle la coupe acquise au milieu du TR. Ainsi recalées, ces 32 coupes formeront un volume cérébral considéré comme étant acquis à un temps t identique.

La seconde étape consiste en un recalage spatial des coupes d'un même volume. Le sujet n'étant pas totalement immobile durant les acquisitions, un réajustement spatial va permettre de corriger les déplacements de la tête effectués par le sujet durant la session d'acquisition fonctionnelle (45 min environ, le sujet peut déplacer ou tourner la tête selon les trois incidences de l'espace). Ce recalage spatial utilise un algorithme d'alignement en trois dimensions, effectué grâce au logiciel AIR5.0 (Woods *et al.*, 1992). Cet algorithme repose sur l'idée simple que si deux volumes d'images A et B (en l'occurrence deux volumes cérébraux) sont correctement alignés, alors la valeur de chaque voxel du volume A sera reliée à la valeur du voxel correspondant au volume B par un facteur multiplicatif constant que nous appellerons « R ». Si les deux volumes sont décalés l'un par rapport à l'autre, la valeur du facteur R va varier plus ou moins d'un voxel à un autre. Le principe de l'algorithme est de modifier l'alignement spatial du volume A par rapport à B, jusqu'à ce que la variation du facteur R soit la plus faible possible.

La première étape du recalage en trois dimensions consiste en une simple interpolation linéaire, selon l'incidence axiale (axe des z), des différentes images constituant le volume cérébral. Le résultat de cette interpolation est un volume en trois dimensions constitué de voxels cubiques. La valeur de chaque voxel cubique du volume A est ensuite divisée par la valeur du voxel correspondant du volume B, pour obtenir une valeur de ratio. Les valeurs de ratio obtenues pour chacune des « paires » de voxels sont normalisées par rapport à une valeur de référence, puis moyennées. Au final on obtient une valeur moyenne de ratio, ainsi qu'une valeur de déviation standard sur lesquelles l'algorithme va se baser pour aligner les deux volumes. L'alignement des deux volumes est effectué à l'aide d'une transformation rigide à six paramètres (trois translations et trois rotations).

Cet algorithme de recalage est utilisé, dans nos protocoles, pour aligner spatialement chaque volume fonctionnel acquis durant la session avec le volume anatomique, permettant ainsi de disposer d'une labellisation anatomique précise des pics d'activation. Cette procédure repose sur l'utilisation de l'anatomie épaisse (T2-DP) comme interface entre l'anatomie fine (T1) et les volumes fonctionnels (T2*). Les images anatomiques épaisses T2-DP sont dans un premier temps réorientées (recalées) sur les images anatomiques fines T1 dans l'espace du sujet. Une fois ce recalage effectué, le premier volume fonctionnel T2* de la session est à son tour réorienté sur l'anatomie épaisse T2-DP. Ce volume fonctionnel T2* ainsi recalé servira de volume de référence pour le recalage de l'ensemble des volumes fonctionnels sur l'anatomie fine T1 (Figure 52). Ainsi les acquisitions d'un même sujet sont toutes alignées entre elles dans le même espace. Une vérification permet, si nécessaire, d'effectuer une correction manuelle en cas

de décalage trop important entre les volumes fonctionnels et anatomiques. Ce recalage manuel consiste à modifier l'alignement du volume T2* sur le volume T2-DP. Une fois ce recalage effectué, l'algorithme va procéder à nouveau à l'alignement des volumes fonctionnels et anatomiques en prenant en considération la correction manuelle.

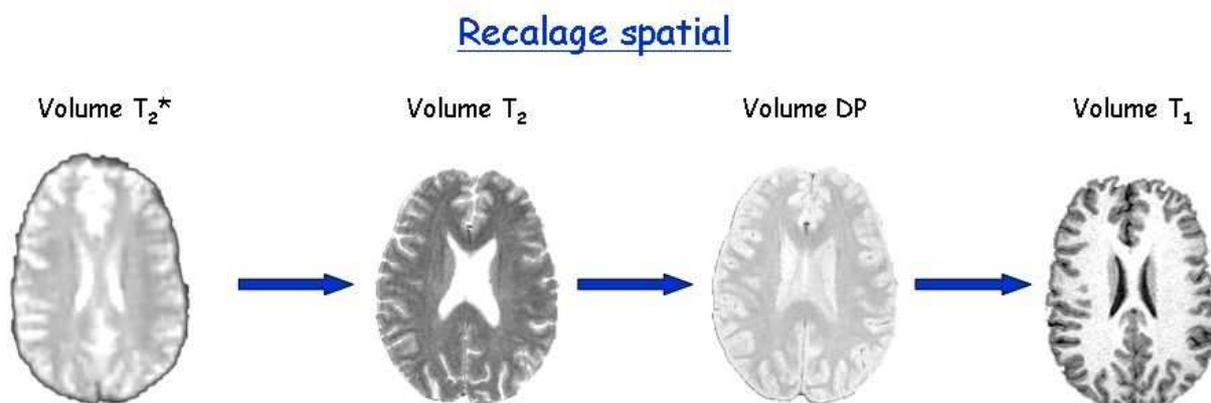


Figure 52. Procédure de recalage spatial des images fonctionnelles T2* sur les images anatomiques fine T1 et épaisse T2-DP.

B. Normalisation stéréotaxique

L'existence de variabilités cérébrales anatomiques rendant difficile la comparaison inter-sujet des données fonctionnelles, il est nécessaire de placer le cerveau de chaque sujet dans un espace de travail commun. Dans cet espace de travail, appelé espace stéréotaxique, chaque point d'une image acquise est défini selon un triplet (x, y, z) de coordonnées stéréotaxiques. Pour entrer nos données dans cet espace stéréotaxique, une étape dite de normalisation stéréotaxique va déformer le cerveau du sujet vers une cible (ou patron) pour réduire cette variabilité anatomique inter-individuelle.

a- Les étapes de la normalisation

La normalisation va permettre d'ajuster globalement la taille, la position et la forme d'un cerveau pour le mettre progressivement en correspondance avec le patron (voir plus bas pour une définition du patron). Elle nécessite six paramètres de transformations dans les trois directions de l'espace: trois translations et trois rotations qui tiennent compte de la différence de position des cerveaux. Les six autres paramètres correspondent aux opérations d'homothétie - transformation proportionnelle de la taille - et de cisaillement - l'effet d'un effort tangentiel appliqué au cerveau dans le plan de l'une de ses faces (Figure 53).

Ces transformations sont suivies de transformations non-linéaires. Elles ont pour objectif de réduire la variabilité anatomique résiduelle en déformant localement les structures du cerveau à normaliser pour les amener en correspondance spatiale avec celles du cerveau de référence.

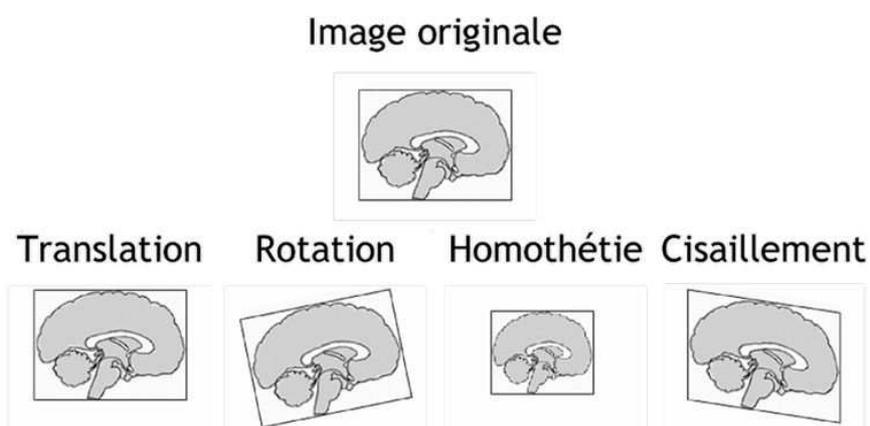


Figure 53. Opérations spatiales conduisant à la normalisation linéaire d'une image IRM.

Sur cette coupe sagittale schématisée de cerveau, sont représentées les opérations de translation, rotation, homothétie et cisaillement. Une normalisation linéaire est caractérisée par un nombre de paramètres dépendant du nombre d'opérations effectuées dans les trois dimensions de l'espace (e.g. 12 paramètres : 3 directions x 4 paramètres).

Le cerveau normalisé est ainsi placé dans un espace tridimensionnel défini selon trois axes et correspondant aux trois incidences spatiales : 1- le plan sagittal, dont le 0 est défini par la scissure inter-hémisphérique, et dans lequel les valeurs positives correspondent à des localisations hémisphériques droites et les valeurs négatives à des localisations hémisphériques gauches (axe x = -90 à +91 mm) ; 2- le plan coronal, dont le 0 est défini par le plan vertical, et pour lequel les valeurs positives correspondent à des localisations antérieures et les valeurs négatives à des localisations postérieures (axe y = -126 à 91 mm) ; 3- le plan axial pour lequel les valeurs positives correspondent à des localisations dorsales et les valeurs négatives à des localisations ventrales (axe z = -72 à 109 mm). Ces limites définissent ce que l'on nomme boîte stéréotaxique. Ainsi tout point du cerveau est défini par un triplet de coordonnées dans cette boîte. L'échantillonnage au sein de la boîte stéréotaxique est de $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ pour un voxel.

b- Le patron

Une comparaison des résultats avec ceux obtenus dans la communauté scientifique nécessite l'utilisation d'un cerveau de référence commun ou patron. L'espace stéréotaxique de référence utilisé par SPM99 pour la normalisation provient de la base de données du *Montreal Neurological Institute* (MNI, Figure 54).

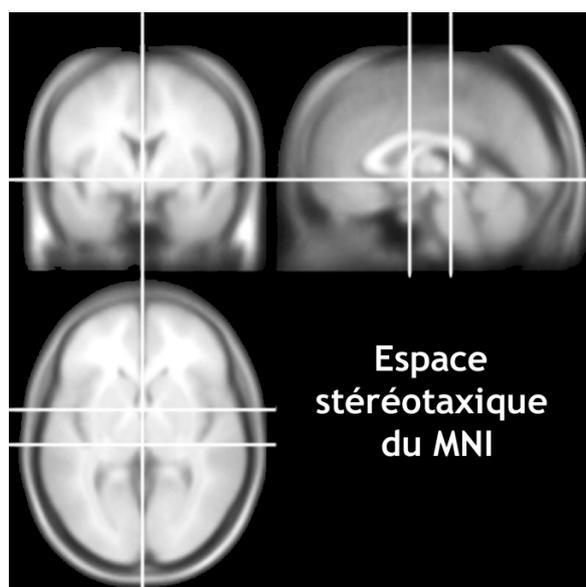


Figure 54. Espace stéréotaxique du MNI défini par l'image moyenne de 305 sujets.

Les incidences coronale (en haut à gauche), sagittale (en haut à droite) et axiale (en bas) sont représentées avec les quatre plans passant par la commissure antérieure et postérieure.

Le cerveau de référence MNI a tout d'abord été élaboré à partir de la moyenne de 305 cerveaux, tous issus de sujets sains droitiers (239 hommes et 66 femmes), d'âge moyen 23,4 plus ou moins 4,1 ans et ayant passés une imagerie par résonance magnétique anatomique à haute résolution (IRMa). Le patron ICBM152, élaboré par la suite, est issu de cerveaux moyennés de 152 sujets, tous recalés sur le MNI305 à l'aide d'une méthode linéaire automatique (Collins *et al.*, 1994).

La normalisation intervient tout d'abord sur l'anatomie T1, puis la matrice de transformation étant calculée, elle sera appliquée aux autres images fonctionnelles recalées dans l'espace du sujet (Figure 55).

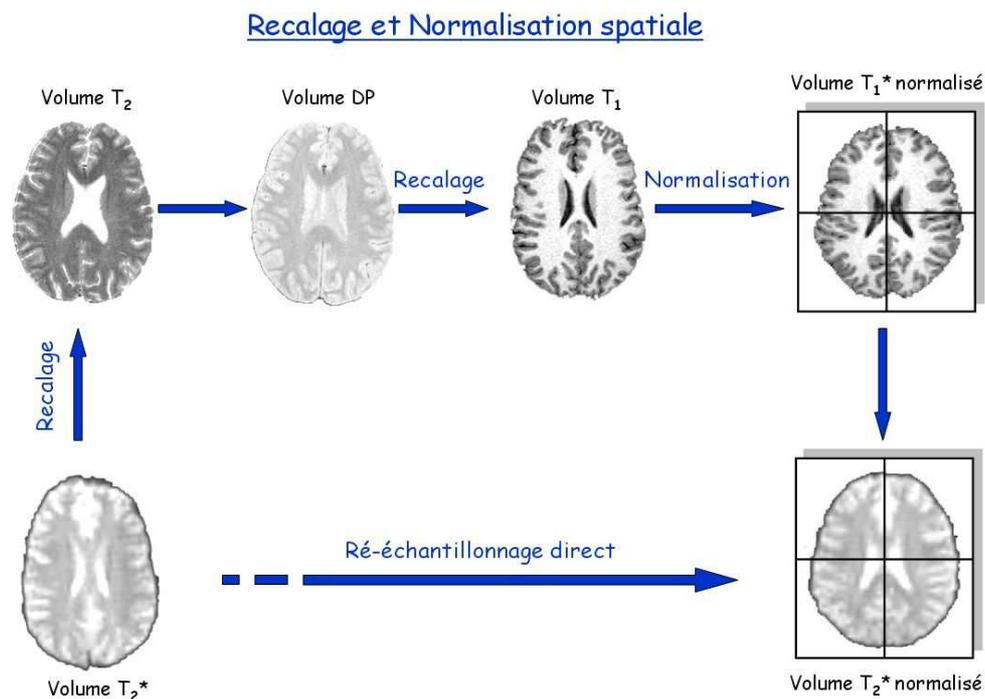


Figure 55. Procédure de recalage et de normalisation spatiale des images fonctionnelles T2* sur les images anatomiques fine T1 et épaisse T2-DP.

C. Normalisation en amplitude du débit

Le champ magnétique de l'IRM étant soumis à des instabilités, certaines variations artefactuelles du signal BOLD peuvent être enregistrées lors des acquisitions fonctionnelles. Afin de s'affranchir de ces variations, un filtrage sur le décours temporel de chaque voxel permet d'éliminer les variations temporelles du signal inférieures à une fréquence donnée (filtrage passe-haut à 0,0102 Hz). Ensuite une procédure de normalisation en amplitude du signal est mise en place : les valeurs de chaque voxel sont normalisées par la moyenne de sa valeur dans deux runs. Cette étape autorise ainsi une comparaison entre les différentes sessions fonctionnelles.

D. Filtrage spatial

Ultime étape de traitement des données fonctionnelles, le filtrage Gaussien - ou filtrage spatial - est appliqué sur l'ensemble des volumes fonctionnels et consiste à calculer la valeur d'un voxel (volume de 2 mm³) en fonction de la valeur des ses voxels voisins les plus proches. Cette procédure permet d'homogénéiser les valeurs de voxels et de diminuer le bruit, augmentant ainsi le rapport signal / bruit. Le filtre spatial utilisé lors de la reconstruction de nos données fonctionnelles était de 8 mm. Cette valeur constitue

la distance minimum en deçà de laquelle deux régions sont considérées comme étant dépendantes l'une de l'autre en terme de variation de signal (Figure 56).

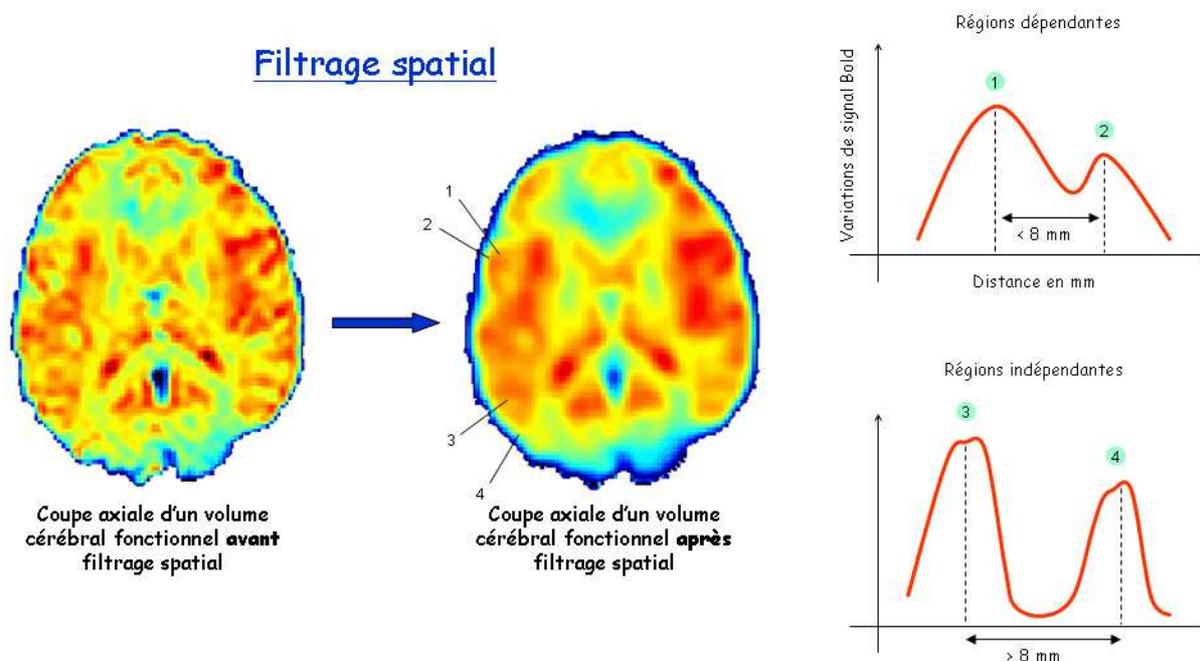


Figure 56. Exemple du filtrage Gaussien à 8 mm appliqué sur un volume fonctionnel T2* normalisé.

La coupe axiale d'un volume cérébral fonctionnel permet d'illustrer le filtrage gaussien (coupe de gauche, avant filtrage, coupe de droite après filtrage). Le filtrage Gaussien va homogénéiser la valeur de signal BOLD d'un voxel avec la valeur de ses voxels voisins distants de 8 mm au plus. Pour deux régions séparées par une distance inférieure à 8 mm, la valeur de signal de l'une va être réajustée en fonction de la valeur de signal de l'autre ; ces deux régions seront dépendantes en terme de signal (graphique, en haut à droite). Dans le cas contraire où deux régions sont distancées de plus de 8 mm, la valeur de signal de l'une n'est pas modulée par la valeur de l'autre ; ces régions sont alors indépendantes en terme de signal (graphique, en bas à droite).

3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les différents protocoles expérimentaux décrits dans cette thèse ont tous été effectués dans le cadre de la loi Huriet, et ont reçu l'aval du *Comité Consultatif de Protection des Personnes pour la Recherche Biomédicale* (CPPRB) de Basse-Normandie n°99/36. La présence d'un fort champ magnétique dans l'enceinte de l'IRM nécessite d'imposer des règles strictes concernant le recrutement des sujets témoins souhaitant participer à un protocole d'imagerie fonctionnelle. Une première visite du dispositif expérimental est proposée à tous les sujets sélectionnés, et durant laquelle ils sont informés en détail des différents risques et contraintes qu'implique un tel protocole expérimental. Chaque sujet est ensuite soumis à un questionnaire standardisé et réalisé par un médecin, permettant de s'assurer qu'il ne présente aucune contre-indication à l'IRM, telle que la présence de matériaux métalliques (éclats de plomb, plombages, dent

sur pivot) ou qu'ils n'ont pas de traitements médicamenteux susceptibles de biaiser de manière plus ou moins marquée le signal enregistré durant les différentes acquisitions. A l'issue de ces deux étapes, les sujets, ainsi informés sur le déroulement du paradigme, fournissent - ou non -leur consentement écrit.

A. Acquisition des images

L'appareil IRM que nous avons utilisé pour les acquisitions anatomiques et fonctionnelles est un imageur *General Electric 1,5 Tesla Signa Horizon Echospeed* mis à notre disposition par le Centre Hospitalier Universitaire de Caen (Figure 49).

La première phase du protocole consiste en un *repérage trois plans* : cette séquence brève d'acquisition (de l'ordre de quelques secondes) est utilisée pour déterminer la position du cerveau du sujet dans l'antenne radio-fréquence. Ce repérage permet également de sélectionner le champ de vue pour les acquisitions anatomiques et fonctionnelles suivantes :

- *l'acquisition anatomique fine T1* : elle a pour but d'obtenir des images pour lesquelles le contraste entre les différents tissus est le meilleur possible, de façon à identifier précisément les différentes structures cérébrales. Le temps nécessaire à cette acquisition en echo de gradient (SPGR-3D) est de l'ordre de 8 minutes. Elle permet d'obtenir une carte tridimensionnelle pondérée en T1 de l'ensemble du cerveau, et est constituée de 128 coupes axiales jointives de 1,5 mm d'épaisseur chacune (matrice = 256 x 256 mm², FOV = 186 mm, échantillonnage = 0,94 x 0,94 x 1,5 mm³, Temps d'inversion = 600 ms, Temps de répétition ou TR = 10,3 sec, Temps entre deux echos ou TE = 2,1 sec, angle de bascule = 10°).
- *l'acquisition anatomique épaisse en T2-DP* : d'une durée d'environ 4 minutes, cette acquisition en echo de spin (FSE-XL) permet de disposer d'une carte tridimensionnelle de l'ensemble du cerveau, pondérée en T2, et composée de 32 coupes axiales jointives de 3,8 mm d'épaisseur chacune (matrice = 256 x 256 mm², FOV = 240 mm, échantillonnage = 0,94 x 0,94 x 3,8 mm³, TR = 3500 ms, angle de bascule = 90°). Ce volume cérébral sera utilisé pour recalibrer les données fonctionnelles sur l'anatomie fine du sujet.
- *l'acquisition fonctionnelle T2** : elle fait suite aux deux acquisitions anatomiques, et utilise une séquence basée sur la commutation très rapide des gradients de champ magnétique, appelée echo-planar imaging (EPI-BOLD). L'acquisition de l'ensemble du cerveau s'étale sur une durée de 6 secondes (cette durée est appelée *temps de répétition*, TR) et permet d'obtenir un volume cérébral constitué, comme pour

l'anatomie épaisse, de 32 coupes axiales jointives de 3,8 mm d'épaisseur chacune et dans la même incidence que celle-ci (matrice = 64 x 64 mm², FOV = 240 mm). Le temps entre deux echos est fixé à 60 ms. L'angle de bascule entre B₀ et B₁ est fixé à 90°, et l'échantillonnage est de 3,75 x 3,75 x 3,8 mm³. Chaque série d'acquisition fonctionnelle (appelée « run ») se déroulant sur 6 minutes 36 secondes, 66 volumes cérébraux sont acquis, contenant les valeurs de variation de concentration en désoxy-Hb.

B. Protocole expérimental

Tous les sujets volontaires sains participant au protocole d'imagerie ont été soumis à un nombre identique de runs d'acquisitions fonctionnelles. Ce nombre de runs a été déterminé par le nombre de tâches cognitives que l'on souhaite explorer.

Un design de type bloc a été choisi pour la construction de ce protocole. Un bloc renferme des événements correspondant à une seule et même tâche. Ces blocs sont alors assemblés pour former un run. Un run correspond à une condition expérimentale et est composé d'une alternance de blocs de tâche d'intérêt et de blocs de tâche de référence.

Le protocole était composé de 8 runs durant 6 min 30 sec (65 TR de 6 s, voir chapitre 2, paragraphe II, pour le détail des tâches). Chaque run débutait par un bloc de référence de 60 sec. Ce premier bloc était suivi par une alternance de 5 blocs de tâche d'intérêt de 34 sec et de 5 blocs de référence de 32 sec (Figure 57).

Pour être certain que le signal soit stabilisé, les trois premiers volumes BOLD du début de chaque run n'ont pas été analysés. Seuls 63 TR ont été inclus dans l'analyse.

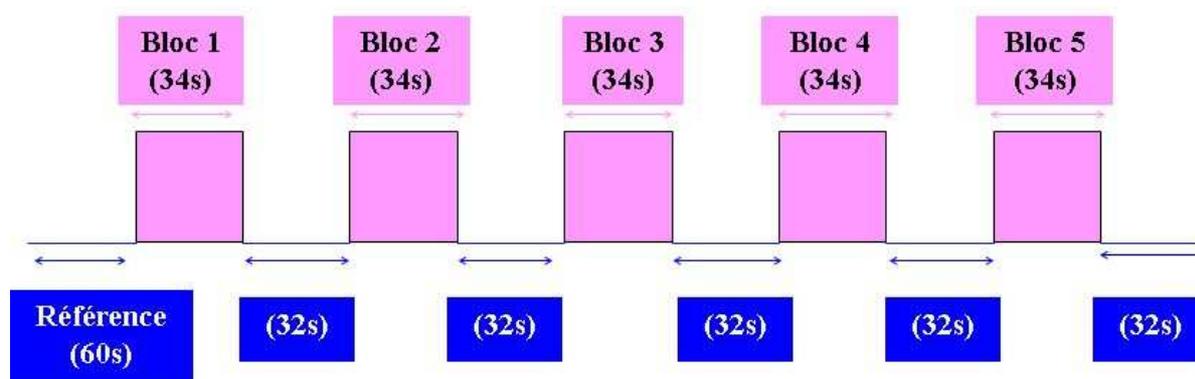


Figure 57. Schéma d'un run de 6 min 30 sec.

Il était composé de 5 blocs de 34 sec (en rose) alternant avec 6 tâches de référence de 32 sec chacune (en bleu, la première tâche de référence durait 60 sec, car au cours de l'analyse des images fonctionnelles les premières images ont été supprimées).

Afin de contrôler l'environnement visuel du sujet au cours des runs d'acquisition fonctionnelles, une tente fabriquée dans un tissu opaque est placée à l'avant de la caméra IRM, permettant ainsi d'assurer une obscurité totale. Les différents dispositifs de stimulation sont placés dans l'enceinte de la tente.

4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Toutes les analyses statistiques sur les images BOLD ont été réalisées dans SPM99 (statistical parametric mapping, Wellcome Department of Cognitive Neurology, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/)⁴⁰.

A. Analyse individuelle

a- Définition du modèle statistique individuel

L'analyse statistique des variations du signal BOLD incluses dans les images repose sur le modèle linéaire généralisé. Il permet d'exprimer simplement la liaison entre deux variables, ici un modèle de réponse hémodynamique et le paradigme. C'est un test de régression linéaire (multiple) qui permet d'établir le caractère dépendant ou non de la réponse hémodynamique (hrf : *hemodynamic response function*) vis-à-vis du paradigme.

La réponse hémodynamique modélisée est une réponse qui varie au cours du temps. Après une stimulation, cette réponse va augmenter avec un certain délai et va rester stable le temps de la stimulation. Le retour à l'état de base après l'arrêt de la stimulation se fera également avec un délai, en passant rapidement sous l'état de base (undershoot) avant de l'atteindre.

Une convolution est réalisée entre la fonction modélisant la réponse hémodynamique pour une stimulation ponctuelle et un autre régresseur théorique qui correspond au décours temporel d'un run. Ce régresseur représente le décours temporel des stimulations, c'est-à-dire une alternance de phases de présence et d'absence de stimulation (entendre par stimulation, les évènements expérimentaux correspondant à la tâche d'intérêt, l'absence de stimulation correspondant à la tâche de référence).

⁴⁰ Pour plus d'informations sur l'analyse statistique dans SPM99 voir « SPM 99 Guide Pratique pour Utilisateur Novice » sur le site http://irmfmrs.free.fr/formation/traitement_des_donnees/spm99doc/index.html

Le résultat de la convolution fournit un régresseur théorique qui modélise le déroulement temporel du signal BOLD pour chaque voxel (Figure 58). Chaque régresseur correspond donc à un run.

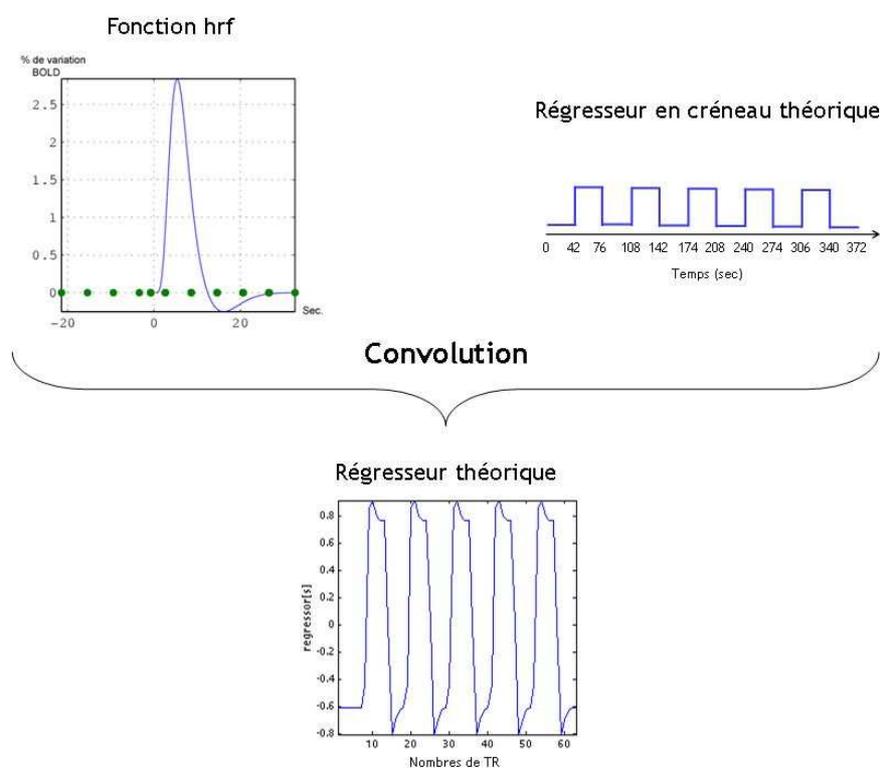


Figure 58. Définition du régresseur théorique en convoluant la fonction hémodynamique (hrf) ici définie pour une stimulation qui apparaît au temps 0 avec le régresseur théorique en créneau.

Les données individuelles ont été analysées en définissant un régresseur pour chaque run. La définition des régresseurs fournit une carte (dite « beta » dans SPM) où le coefficient de régression entre le déroulement du signal dans chaque voxel et le régresseur théorique est calculé. Ce coefficient exprime la relation entre les variations du signal BOLD et les tâches réalisées (il correspond à la part du régresseur qui explique la variation du signal dans chaque voxel). Donc la valeur de ce coefficient permet de déterminer si le signal BOLD dans cette région suit le régresseur théorique, c'est-à-dire si le signal augmente au cours de la tâche d'intérêt par rapport à la tâche de référence (corrélation significative positive), ou inversement si le signal BOLD dans cette région augmente dans la condition de référence par rapport à la tâche d'intérêt (corrélation significative négative). Ainsi, le coefficient de régression représente la variation du signal BOLD entre la tâche d'intérêt et la tâche de référence. Une variation de signal nulle correspond donc à une équivalence du signal BOLD entre la tâche d'intérêt et la tâche de référence.

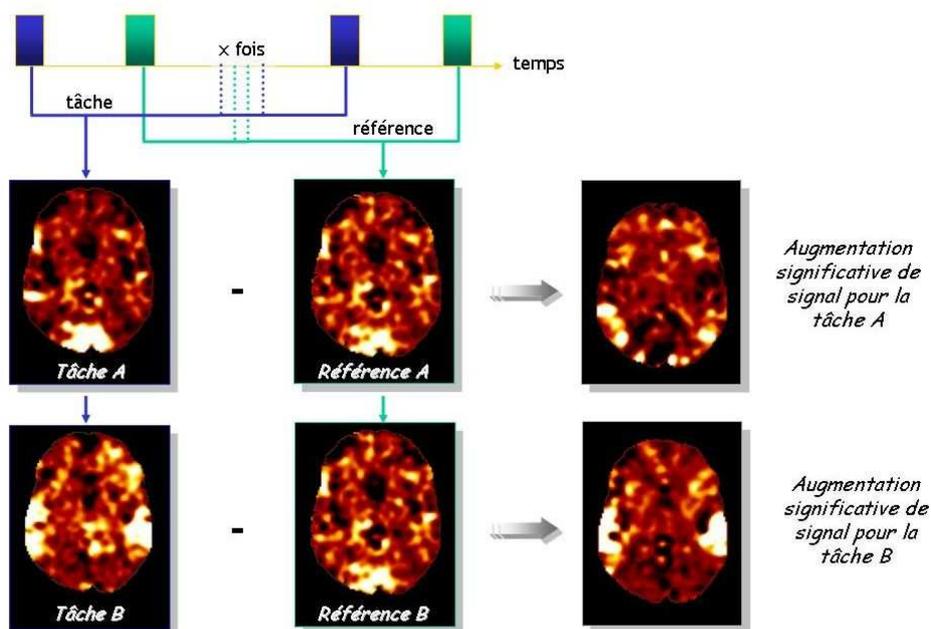
b- Analyse statistique : La définition des contrastes

Les cartes beta contenant les valeurs de variation du signal BOLD dans chaque voxel sont utilisées ensuite pour effectuer des comparaisons statistiques entre différentes tâches (exemple : le contraste écoute de mots - fixation de croix). Un test de t apparié de Student est utilisé afin de comparer, au sein de chaque voxel, la valeur du coefficient de régression de chacune des tâches. En termes d'interprétation, cette analyse permettra d'identifier tous les voxels pour lesquels il existe une différence significative entre la tâche d'intérêt (classification) et la tâche de référence (détection de bip).

Deux types de contrastes peuvent être envisagés afin d'appréhender les variations d'activité cérébrale (Figure 59) :

- le premier type de contraste ou *contraste direct* consiste à comparer les variations de signal BOLD enregistrées pendant une tâche d'intérêt avec celles enregistrées pendant sa tâche de référence correspondante. Dans ce cas, cela revient à tester l'hypothèse nulle (H_0) selon laquelle les coefficients de régression pour la tâche d'intérêt est égal à zéro, c'est-à-dire si le signal BOLD n'est ni augmenté, ni diminué dans la tâche d'intérêt par rapport à la tâche de référence. Cette comparaison directe permet de rendre compte de variations significatives de signal BOLD liées à plusieurs composantes cognitives de nature différente. Par exemple, les différences d'activité observées dans le contraste 'classification grammaticale' moins 'tâche de détection de bip' sont liées au traitement phonologique, sémantique et syntaxique.
- le second type de contraste ou *contraste multiple* consiste à comparer les variations de signal obtenues lors d'une tâche d'intérêt A, avec celles observées pour une tâche d'intérêt B. Cette comparaison consiste à tester si les coefficients de régression de la tâche A sont différents de ceux de la tâche B. Rappelons que les coefficients de régression rendent compte de la variation du signal BOLD par rapport à la tâche de référence (c'est pourquoi nous notons sur la figure 'tâche - réf'). Ce type de comparaison multiple permet d'identifier les variations significatives d'activité liées à une composante cognitive cible. Par exemple, la classification affective contrastée à la classification grammaticale permet de mettre en évidence les régions impliquées dans le traitement sémantique affectif.

Comparaisons directes



Comparaisons multiples

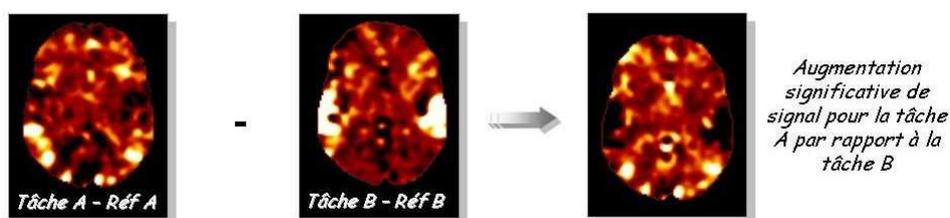


Figure 59. Cartes statistiques de t générées lors de l'analyse individuelle de contraste pour un paradigme de lecture.

Le contraste direct va permettre de comparer, au sein d'une même session, l'activité enregistrée pendant une tâche d'intérêt (lecture ou écoute) avec celle enregistrée pendant la tâche de référence (fixation de croix). Ce type de comparaison est dit « peu contraignant » car il rend compte de modulations d'activité liées à plusieurs composantes cognitives. Les comparaisons multiples comparent quant à elles l'activité enregistrée pendant deux sessions fonctionnelles distinctes. Elles sont dites « très contraignantes » car elles permettent d'appréhender les modulations d'activité liées à une seule composante cognitive.

c- La correction des seuils statistiques

L'analyse statistique peut être effectuée soit sur le cerveau entier, soit sur une région d'intérêt définie *a priori*. Les tests statistiques sont effectués pour chaque voxel, conduisant à des comparaisons multiples. Par exemple, le cerveau représente un nombre considérable de voxels, donc un nombre de tests important si l'on veut explorer la réponse hémodynamique sur l'ensemble du cerveau (découpage d'un volume moyen de 1300 cm³ en unité de 2 mm³). Dans le cas d'une région d'intérêt, le nombre de voxels est moindre, mais représente tout de même un nombre de comparaisons voxel par voxel important.

Or le signal BOLD des voxels proches spatialement est dépendant car, après l'opération de filtrage spatial, la valeur du signal dans des voxels espacés de 8mm dans les

trois incidences a été homogénéisée. On ne peut donc pas effectuer un test pour chaque voxel indépendamment. Pour chaque carte de contraste, SPM calcule le « resel » (*resolution element* en anglais) qui correspond à l'ensemble des voxels voisins dont le signal BOLD est dépendant. Ainsi les valeurs contenues dans deux resels différents peuvent être considérées comme indépendantes. Par exemple pour le contraste « lecture de mots moins écoute de mots », le nombre total de resels sur l'ensemble du cerveau est égal à 812, chaque resel étant formé de 225 voxels.

La définition des resels sert à calculer la correction des seuils statistiques pour prendre en compte le nombre de tests à effectuer et la dépendance des valeurs de signal des voxels proches. Cette correction est obtenue à partir de la théorie des champs gaussiens, correction que l'on peut assimiler à la correction de Bonferroni (division du seuil statistique par le nombre de tests effectués).

d- Le masque inclusif

Un masque inclusif permet d'observer, parmi les voxels activés dans la tâche X, ceux qui sont activés dans la tâche Y.

Lorsque l'on calcule un contraste issu d'une comparaison multiple, la significativité pour une région donnée peut refléter plusieurs phénomènes physiologiques. Les tests statistiques permettent de définir si le signal BOLD d'une région est plus important dans la tâche X que dans la tâche Y. Il met donc en évidence une différence positive, qui en aucun cas ne préjuge de la valeur du signal BOLD par rapport à la tâche de référence (Figure 60). En effet, cette différence positive peut être observée dans le cas où la région est déactivée dans les deux conditions expérimentales, c'est-à-dire dans le cas où le signal BOLD est inférieur à celui observé au cours de la tâche de référence. En d'autres termes, la région présente une déactivation plus importante dans la tâche Y que dans la tâche X. Or ce type de profil du signal BOLD n'est pas pris en compte dans les résultats car l'interprétation cognitive d'une différence de déactivation est difficile.

Pour obtenir des cartes de contrastes sans les régions déactivées, un masque inclusif est utilisé. Ce masque est une carte de contraste direct qui contient les régions activées au cours de la tâche X par rapport à la tâche de référence. En appliquant ce masque sur le contraste multiple nous allons chercher les différences d'activation entre la tâche X et la tâche Y au sein des régions déjà activées par la tâche X (Figure 60).

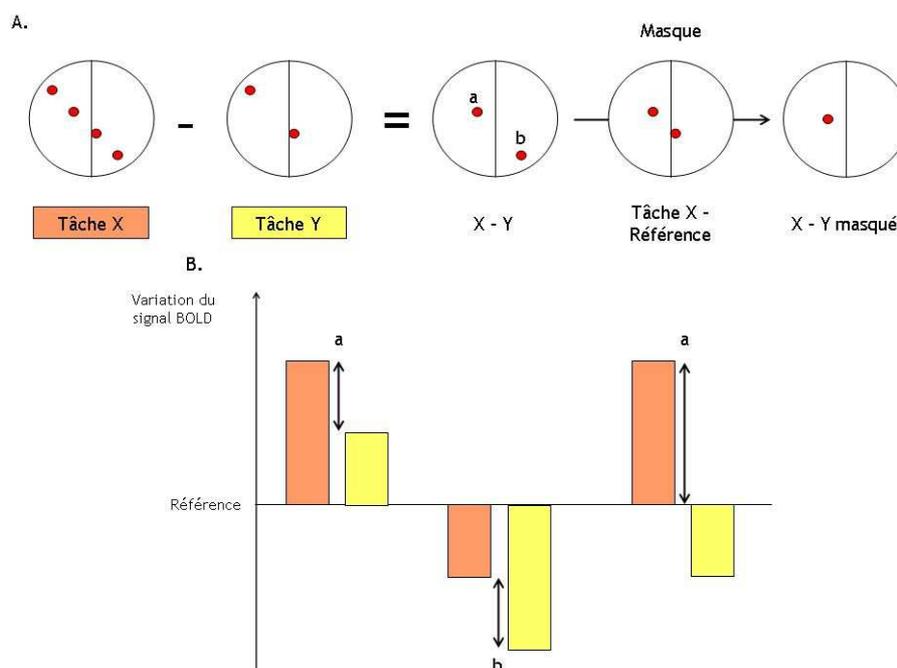


Figure 60. Masque sur les contrastes multiples.

La différence entre deux tâches X et Y met en évidence les régions dont la variation du signal BOLD est plus importante au cours de la tâche X qu'au cours de la tâche Y. Deux types de régions sont observés : a. les régions qui présentent une activation (par rapport à la tâche de référence qui représente le zéro, variation du signal BOLD positive) au cours de la X et une activation (à gauche) ou une désactivation (à droite, variation du signal BOLD négative) au cours de la tâche Y, et b. les régions qui présentent une plus faible désactivation dans la tâche X par rapport à la tâche Y. Pour observer les régions activées dans la tâche X, on utilise le masque correspondant au contraste direct tâche X versus référence. Ces régions qui présentent une plus forte activation dans la tâche X que dans la tâche de référence définissent les régions au sein desquelles la différence entre signal BOLD au cours de la tâche X et la tâche Y sera évaluée. Cette opération fournit uniquement les régions entrant dans le cas de figure a.

B. Analyse de groupe ou analyse de second niveau

L'analyse de second niveau ou analyse de groupe a été réalisée dans le protocole exposé dans le chapitre 2 (paragraphe III.1.E, p113) à partir des 8 contrastes directs pour les 23 sujets inclus dans notre protocole. Pour notre paradigme, le modèle statistique de la régression multiple sans terme constant a été utilisé. Ce modèle permet de chercher les régions qui présentent une variation d'activité significative en moyenne dans le groupe de sujets. Cette analyse permet de définir des contrastes de différence (même principe que pour l'analyse individuelle), mais également des conjonctions.

a- L'analyse moyenne

Pour connaître les régions recrutées par deux voire plusieurs conditions, une analyse moyenne peut être entreprise. Elle permet de déterminer les régions dont l'activité moyenne au cours des tâches d'intérêt est significativement supérieure à

l'activité au cours de la tâche de référence dans un groupe de sujets. Cette hypothèse nulle est alors testée grâce à un test de t univarié de Student.

b- La conjonction

Contrairement au contraste de différence, la conjonction permet de mettre en évidence les régions activées conjointement dans deux (voir plus) conditions (Figure 61). Dans ce cas, l'hypothèse nulle à tester est la suivante : déterminer si l'activité des régions dans l'une et l'autre condition est différente de l'activité au cours de la tâche de référence. Le seuil statistique non corrigé est alors défini comme le produit de probabilité : la probabilité à laquelle on aurait regardé chaque contraste direct individuellement au seuil non corrigé. Par exemple, la conjonction de deux contrastes calculée à 0,000001 non corrigé, correspond aux résultats obtenus pour chaque contraste individuellement à seuil de 0,001 non corrigé ($= 0,001 * 0,001$).

En ce qui concerne les seuils corrigés, la relation pour le calcul du seuil de conjonction n'est pas linéaire. Pour calculer le seuil corrigé d'une conjonction, il convient de déterminer le seuil auquel on aurait regardé chaque contraste individuellement, et utiliser la valeur de t correspondante à SPM qui ne dépend pas de la correction à effectuer (la correction se fait uniquement sur la valeur de p). En effet, cette valeur de t peut être fourni directement dans SPM pour effectuer la conjonction. Le seuil corrigé correspondant sera alors calculé directement.

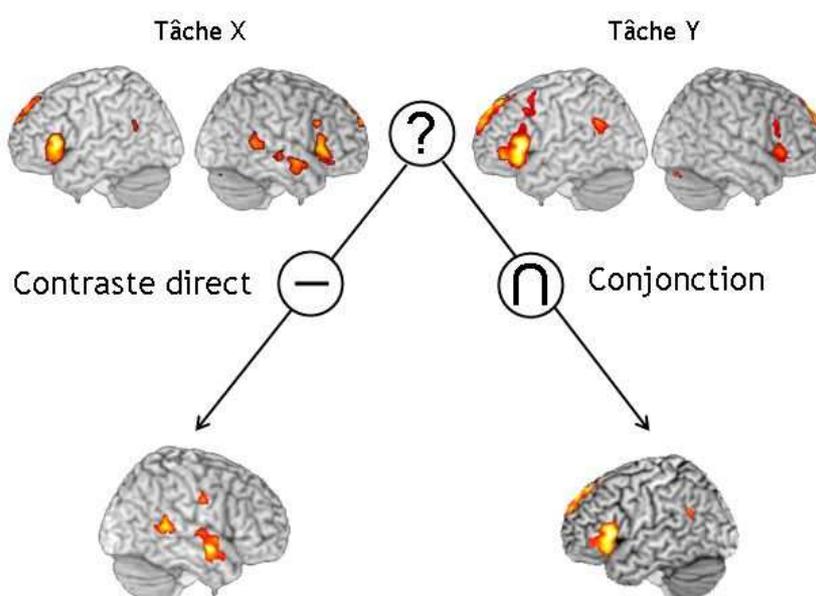


Figure 61. Résultat de la comparaison entre deux tâches à l'aide d'une différence de contraste (gauche) ou d'une conjonction (droite).

Le résultat de la différence met en évidence les régions qui présentent une plus forte activité au cours de la tâche X qu'au cours de la tâche Y, tandis que la conjonction met en évidence les régions qui sont activées communément par les deux tâches.

c- Définition de régions fonctionnelles pour une analyse post-hoc

A partir des résultats obtenus dans l'analyse de second niveau, des régions d'intérêt peuvent être définies fonctionnellement. Les cartes de contrastes obtenues dans l'analyse de second niveau servent alors de masque pour extraire la variation du signal BOLD sur les cartes de contrastes individuelles. Ainsi, la variation du signal BOLD dans ces régions est connue pour chaque sujet et pour chaque condition. Une analyse post-hoc peut alors être effectuée en dehors de SPM avec ces valeurs pour comprendre le rôle de ces régions dans les différentes conditions, et notamment tester les interactions entre différents facteurs expérimentaux par une analyse de variance.

Par exemple dans notre protocole, une ANOVA sur les régions temporelles définies par le contraste « Classification affective en présence de prosodie moins Classification affective en absence de prosodie » a permis de mettre en évidence une interaction entre la présence de prosodie et le côté de l'activation (chercher si il existe une différence d'activation entre l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche), montrant l'augmentation significative de l'activité de la région droite en présence de prosodie (voir chapitre 2, paragraphe III.1.E.b- , p115).

d- Les asymétries fonctionnelles

Une analyse d'asymétrie fonctionnelle permet d'observer la latéralisation des réseaux neuraux engagés par les différentes conditions.

Dans un premier temps, les cartes de contrastes individuelles doivent subir une transformation symétrique suivant l'axe du plan inter-hémisphérique. Ces cartes dites « flippées » représentent, à gauche, les variations du signal BOLD de l'hémisphère droit, et inversement à droite, les variations du signal BOLD de l'hémisphère gauche.

Ensuite, des cartes d'asymétrie sont calculées pour chaque contraste en soustrayant les cartes de contrastes individuelles « flippées » aux cartes non « flippées ». La partie droite de ces cartes d'asymétries correspond donc à la différence de la variation du signal BOLD droit moins gauche, et la partie gauche montre la différence gauche moins droite (Figure 62).

Une analyse de second niveau est ensuite réalisée avec ces cartes d'asymétrie individuelles à l'aide d'un modèle de régression sans terme constant.

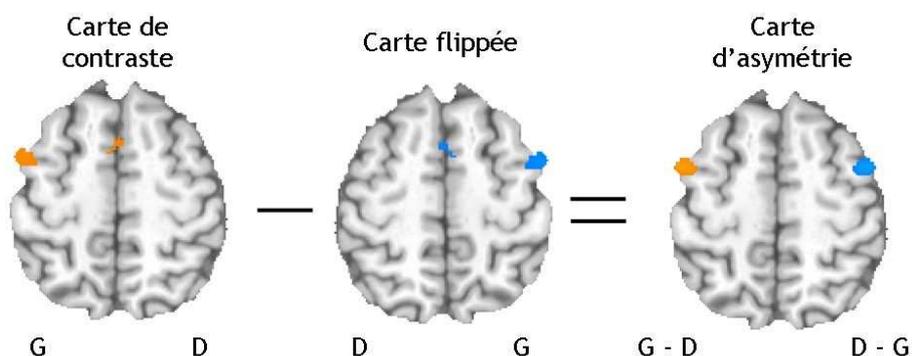


Figure 62. Principe de calcul d'une carte d'asymétrie individuelle.

La carte de contraste individuelle (superposée sur le cerveau MNI) est soustraite à la même carte de contraste mais symétrique suivant l'axe antéro-postérieur. Le résultat de cette soustraction fournit une carte d'asymétrie individuelle qui représente à gauche la différence d'activité gauche moins droite, et vice versa pour la partie droite.

C. Localisation des régions impliquées

Dans le but de garantir une reproductibilité et une uniformité des localisations anatomiques rapportées, chaque pic d'activation est étiqueté comme appartenant à une région, selon les coordonnées du maximum local. Cette labellisation repose sur l'utilisation du *patron* stéréotaxique de référence MNI dont la parcellisation anatomique a été effectuée au sein du laboratoire (Tzourio-Mazoyer *et al.*, 2002), fournissant un atlas stéréotaxique de référence. Cet atlas a été réalisé à partir de l'image moyenne d'un cerveau d'un sujet adulte sain acquise de façon répétée (27 fois, Colins27) et recalé sur le *patron* MNI305. Le cerveau moyen obtenu a été échantillonné tous les millimètres dans les trois incidences spatiales x, y, z. La labellisation de ce volume de référence repose sur l'utilisation des sillons comme repères anatomiques pour parcelliser le cortex en différentes régions - ou gyri. Chaque région ainsi délimitée a été tracée manuellement sur le plan de coupe axiale puis étiquetée, le tout conduisant à un ensemble de 45 volumes d'intérêt pour chaque hémisphère (Figure 63). Chaque triplet de coordonnées stéréotaxiques est affecté d'une localisation anatomique particulière. Il est également possible d'obtenir le pourcentage d'appartenance des clusters (ensemble des voxels continus activés) aux différentes régions de cet atlas.

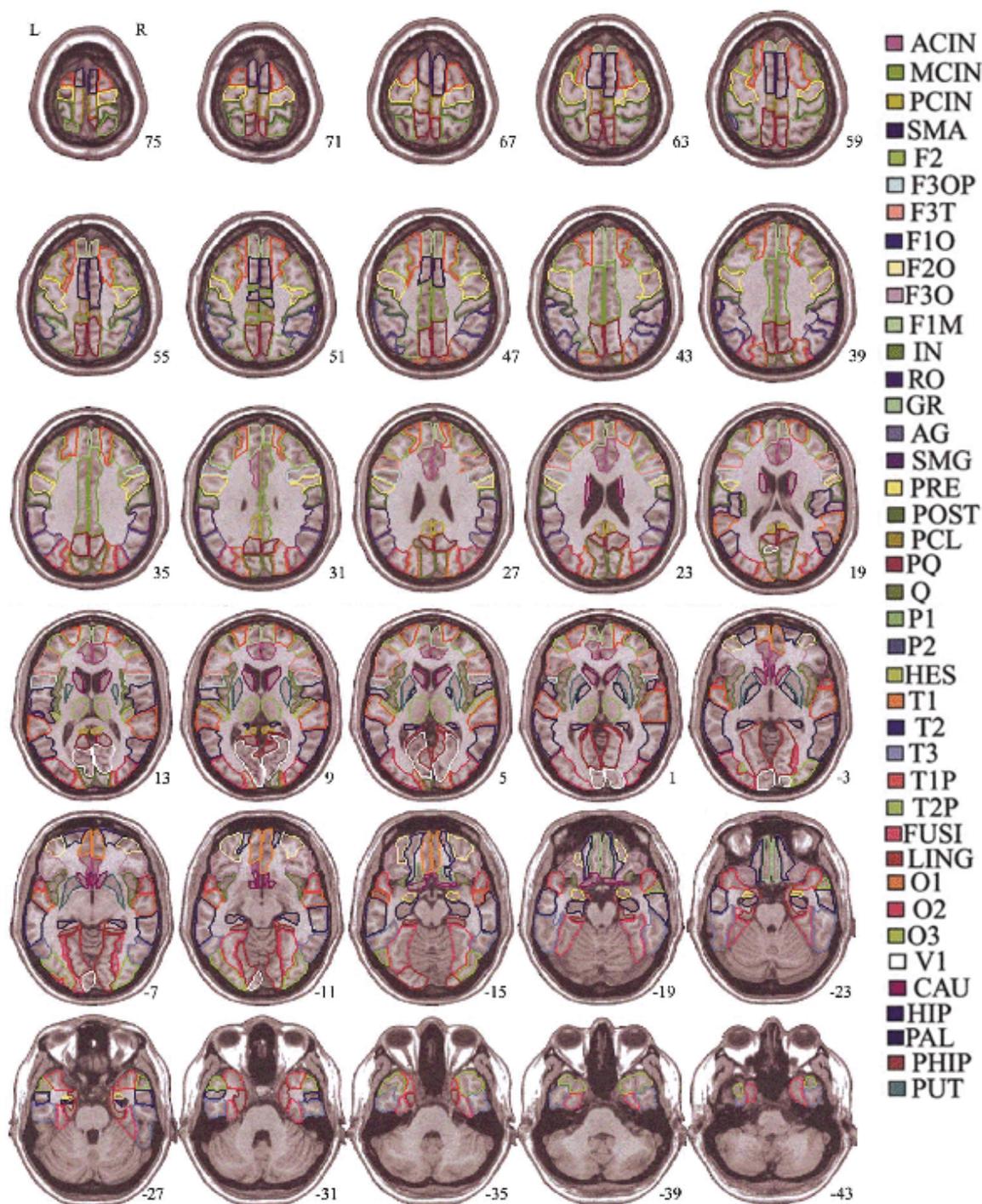


Figure 63. Régions d'intérêt délimitées sur des coupes axiales du patron MNI.

Les valeurs en bas à droite de chaque image correspondent à la hauteur de coupe (coordonnées en z). ACIN, MCIN et PCIN: gyri cingulaires antérieur, moyen et postérieur; AG: gyrus angulaire; CAU: noyau caudé; F1 et F2: gyri frontaux supérieur et moyen; F1O et F2O: gyri frontaux supérieur et moyen orbitaires; F3O, F3OP et F3T: gyri frontaux inférieurs pars orbitaris, opercularis et triangularis; FUSI: gyrus fusiforme; GR: gyrus rectus; HES: gyrus de Heschl; HIP: hippocampe; LING: gyrus lingual; PRE, POST et PCL: gyri pré-, post- et paracentraux; F1M: gyrus frontal supérieur, partie médiane; IN: insula; O1, O2 et O3: gyri occipitaux supérieur, moyen et inférieur; P1 et P2: lobules pariétaux supérieur et inférieur; PAL: globus pallidus; PHIP: parahippocampe; PUT: putamen; PQ: précuneus; Q: Cuneus; RO: opercule rolandique; SMA: aire motrice supplémentaire; SMG: gyrus supramarginal; T1, T2 et T3: gyri temporaux supérieur, moyen et inférieur; T1P et T2P: pôles temporaux supérieur et inférieur; THA: thalamus; V1: région de la Calcarine (repris de Tzourio-Mazoyer *et al.*, 2002).

II. ANNEXE 2 : TABLES DE CONTRASTES DE LA META-ANALYSE

Cette annexe rapporte les tables correspondant à la méta-analyse de la littérature sur les bases neurales du langage dans l'hémisphère gauche (chapitre 1, p26). Ces tables contiennent les pics pour chaque cluster défini par la méthode de ségrégation spatiale. Ces pics sont définies par leurs coordonnées dans l'espace stéréotaxique MNI (après conversion si nécessaire, voir méthode II.1.E, p38), les références de l'article dont ils sont issus (auteur, et date), la classification des tâches opérée dans la méta-analyse (voir paragraphe II.1.C, p29), le contraste ayant mis en évidence ce pic (tâche d'intérêt et la tâche de référence).

Table 13. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster ROLS pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-47	-6	44	RoIS	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-48.48	-8.28	43.97	Bookheimer et al., 2000	Repetition	Reciting the months of the year	Cross fixation
-48.48	-10.35	44.08	Bookheimer et al., 2000	Repetition	Repeating 5 phonemes	Cross fixation
-35.35	-18.37	60.82	Cohen et al., 1997	Working memory on letters	Interaction load * rate of presentation of the letters	
-45.45	-6.31	46.04	Cohen et al., 1997	Working memory on letters	Interaction load * rate of presentation of the letters	
-48.00	3.00	45.00	Jessen et al., 1999	Reading letters	Reading unpronounceable letter strings	Reading highly imaginable words
-50.51	-8.59	50.51	Mechelli et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words	Cross fixation
-42.42	-2.28	48.00	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words	Reading words
-48.48	-8.28	43.97	Poeppl et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-46.46	-2.28	48.00	Poeppl et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-42.42	-4.14	43.75	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime when inverted words
-42.00	-15.00	33.00	Riecker et al., 2000	Articulation	Overt word production	Rest
-39.00	-15.00	33.00	Riecker et al., 2000	Articulation	Overt pseudo-word production	Rest
-55.56	-13.35	42.06	Roskies et al., 2001	Word rhyming	Rhyme comparison with words	Synonym comparison on words
-52.53	-0.62	34.86	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 3 letters	Maintenance of 1 letter
-54.55	6.98	48.60	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 3 letters	Maintenance of 1 letter
-51.52	-7.51	49.37	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-52.53	0.41	34.80	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-52.00	-3.00	40.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation	Identification of a face
-50.00	-1.00	40.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face
-48.00	-3.00	42.00	Wildgruber et al., 2001	Repetition	Silent repetition of syllables	Rest
-39.39	-11.49	46.31	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Discriminating /b/ in pairs of words	Passive listening to words

Table 14. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster PREC pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-48	2	26	Prec	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-54.55	-5.38	26.40	Bookheimer et al., 2000	Repetition	Repeating 5 phonemes	Cross fixation
-56.00	6.00	24.00	Braun et al., 1997	Articulation	Orolaryngeal motor task	Rest
-46.00	-6.00	20.00	Braun et al., 1997	Articulation	Orolaryngeal motor task	Rest
-42.00	-2.00	32.00	Bunge et al., 2001	Working memory on letters	Sternberg item recognition on 6 letters	Sternberg item recognition on 4 letters
-43.43	6.93	27.93	Cohen et al., 1997	Working memory on letters	Interaction load * rate of presentation of the letters	
-48.00	8.00	28.00	Hautzel et al., 2002	Working memory on letters	Conjunction of 2-back task for letters, dot localizations, shapes, pictures	
-37.37	6.47	37.75	Heim et al., 2002	Articulation	Articulating syllables	Rest
-44.44	3.31	17.24	Herbster et al., 1997	Reading pseudo-words	Overt reading of pseudo-words	Overt reading of regular words
-34.00	4.00	29.00	Kotz et al., 2002	Listening to pseudo-words	Target pseudo-word in a pair word/pseudo-word	Target word in a pair word/pseudo-word
-44.44	0.62	30.44	Mechelli et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words	Cross fixation
-44.44	3.10	21.60	Paulesu et al., 2000	Reading letters	Reading words and pseudo-words for English and Italian readers	
-48.48	6.62	34.47	Paulesu et al., 2000	Reading letters	Reading words and pseudo-words for English and Italian readers	
-46.46	1.24	17.35	Paulesu et al., 1993	Working memory on letters	Maintaining string of letters	Viewing Korean letters
-46.46	-1.24	26.18	Poldrack et al., 1999	Syllables counting with words	Syllables counting with words	Uppercase judgment with words
-47.47	-0.67	14.18	Poldrack et al., 1999	Syllables counting with words	Syllables counting with words	Abstract / concrete judgment with words
-56.57	7.09	24.66	Poldrack et al., 1999	Syllables counting with pseudo-words	Syllables counting with pseudo-words	Uppercase judgment with pseudo-words
-40.40	10.97	29.89	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime when inverted words
-52.53	-3.31	26.29	Price et al., 1997	Syllables counting	Syllables counting in words	Semantic categorization
-63.00	-3.00	30.00	Riecker et al., 2000	Articulation	Horizontal tongue movement	Rest

-54.00	-6.00	27.00	Riecker et al., 2000	Articulation	Monosyllable overt production	Rest
-57.00	-3.00	27.00	Riecker et al., 2000	Articulation	Bisyllables overt production	Rest
-49.49	-2.38	28.42	Roskies et al., 2001	Word rhyming	Rhyme comparison with words	Synonym comparison on words
-49.49	2.28	17.29	Roskies et al., 2001	Word rhyming	Rhyme comparison with words	Synonym comparison on words
-45.45	-2.28	26.24	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 3 letters	Maintenance of 1 letter
-52.53	4.14	21.55	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-43.00	2.00	37.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation	Identification of a face
-43.00	2.00	37.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face
-38.00	8.00	23.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face
-50.00	6.00	19.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face
-48.00	8.00	21.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation	Identification of a face
-54.00	6.00	18.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation low SN ratio	Identification of a face
-50.00	6.00	19.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation low SN ratio	Identification of a face
-48.48	1.86	26.02	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Phonetic discrimination of the ending of a pair of words	Passive listening to syllables
-43.43	3.78	29.18	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Phonetic discrimination of the ending of a pair of words	Listening to noise burst
-44.44	6.88	29.02	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Discriminating /b/ in pairs of words	Passive listening to words
-48.48	1.86	26.02	Zatorre et al., 1992	Listening to syllables	Rhyming with syllables	Passive listening to syllables

Table 15. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F3TD pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-44	23	15	F3td	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-35.35	16.56	20.89	Beauregard et al., 1997	Reading letters	Reading random-letters block	Cross fixation
-51.00	21.00	27.00	Booth et al., 2002	Word rhyming	Rhyming task auditory	Tones identification task
-45.00	30.00	12.00	Booth et al., 2002	Word rhyming	Rhyming task visual	Non-linguistic symbols identification task
-34.00	20.00	4.00	Bunge et al., 2001	Working memory on letters	Sternberg item recognition on 6 letters	Sternberg item recognition on 4 letters
-34.00	30.00	8.00	Bunge et al., 2001	Working memory on letters	Interaction memory load and load susceptibility	
-41.41	7.45	17.02	Cohen et al., 1997	Working memory on letters	Effect of load on N-back tasks	
-48.00	32.00	20.00	Hautzel et al., 2002	Working memory on letters	Conjunction of 2-back task for letters, dot localizations, shapes, pictures	
-50.51	17.38	25.20	Heim and Friederici, 2003	Discriminating at word-level	/b/ begin a picture or an object name	
-53.54	14.43	22.09	Heim and Friederici, 2003	Discriminating at word-level	Vowel begin a picture or an object name	
-48.00	28.00	8.00	Jancke and Shah, 2002	Discriminating syllables	Attend target syllables to the right ear	Detect target syllables binaurally
-48.00	12.00	15.00	Jessen et al., 1999	Reading letters	Reading unpronounceable letter strings	Reading highly imaginable words
-48.00	21.00	9.00	Jonides et al., 1998	Working memory on letters	High recency on probe letters	Low recency on probe letters
-32.32	19.87	16.36	McGuire et al., 1996	Articulation	Generating silently sentences ending with the presented words	Reading silently presented word
-49.49	25.92	19.31	Meyer et al., 2002	Listening pseudo-words	Listening to grammatically correct sentences with pseudo-words	Listening to filtered sentences
-38.38	22.14	11.89	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading words and pseudo-words for English and Italian readers	
-46.46	17.59	20.84	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words for English readers	Reading pseudo-words for Italian readers
-42.42	24.11	13.96	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words	Reading words

-50.51	23.80	20.51	Poeppel et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-47.47	28.15	15.93	Poldrack et al., 1999	Syllables counting with words	Syllables counting with words	Uppercase judgment with words
-42.42	34.87	26.45	Poldrack et al., 1999	Syllables counting with words	Syllables counting with words	Abstract / concrete judgment with words
-48.48	19.35	27.27	Poldrack et al., 1999	Syllables counting with pseudo-words	Syllables counting with pseudo-words	Uppercase judgment with pseudo-words
-50.51	35.60	11.18	Poldrack et al., 1999	Syllables counting with pseudo-words	Syllables counting with pseudo-words	Uppercase judgment with pseudo-words
-42.42	11.80	12.44	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime when inverted words
-48.48	13.87	12.33	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime when inverted words
-38.38	22.14	11.89	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-39.39	35.60	11.18	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-48.48	44.08	6.38	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-41.00	26.00	13.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation	Identification of a face
-47.00	18.00	16.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face
-47.00	16.00	13.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation	Identification of a face
-38.00	22.00	10.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation low SN ratio	Identification of a face
-38.00	24.00	10.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation low SN ratio	Identification of a face
-34.00	24.00	8.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation low SN ratio	Identification of a face
-44.44	18.37	4.47	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Generate a verb
-34.34	30.42	11.45	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Generate a verb
-48.48	13.66	16.69	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	rest
-35.35	19.61	21.82	Zatorre et al., 1996	Rhyming	Phonetic discrimination of the ending of a pair of words	Passive listening to words
-50.51	22.20	10.80	Zatorre et al., 1992	Listening to syllables	Passive listening to syllables	Listening to noise

Table 16. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster ROLOP pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-48	8	3	RoLOP	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-51.52	0.72	6.49	Heim et al., 2002	Articulation	Articulating syllables	Rest
-39.39	1.76	6.44	Heim et al., 2002	Articulation	Articulating syllables	Rest
-48.48	6.21	-0.33	Herbster et al., 1997	Reading pseudo-words	Overt reading of pseudo-words	Viewing non-words and say "Hiya"
-60.00	12.00	8.00	Jancke and Shah, 2002	Discriminating syllables	Attend target syllables to the right ear	Detect target syllables binaurally
-49.49	2.79	6.38	Joanisse and Gati, 2003	Discriminating syllables	Rapid temporal variation in consonant and tone sweep	Spectral variation in vowel and tone pitch
-34.34	1.86	4.25	Paulesu et al., 1993	Working memory on letters	Maintaining string of letters	Viewing Korean letters
-32.32	3.93	4.15	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime when inverted words
-58.59	7.66	12.65	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime when inverted words
-37.37	-3.52	8.89	Roskies et al., 2001	Word rhyming	Rhyme comparison with words	Synonym comparison on words
-59.60	3.52	12.87	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-49.49	26.85	-0.33	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-48.00	14.00	-4.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation low SN ratio	Identification of a face
-38.38	14.59	-3.23	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Generate a verb
-48.48	-4.40	5.67	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Rest
-42.42	6.31	-2.75	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Rest
-56.57	5.74	9.49	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Phonetic discrimination of the ending of a pair of words	Pitch discrimination on syllables
-56.57	20.95	-7.17	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Phonetic discrimination of the ending of a pair of words	Listening to noise burst
-54.55	25.09	-7.41	Zatorre et al., 1992	Listening to syllables	Passive listening to syllables	Listening to noise

Table 17. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F3ORB/F2 pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-33	37	-6	F3orb/F2	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-21.21	28.87	-23.12	Beauregard et al., 1997	Reading letters	Reading random-letters block	Cross fixation
-32.32	33.37	-7.89	Beauregard et al., 1997	Reading letters	Reading random-letters block	Cross fixation
-36.00	24.00	-8.00	Hautzel et al., 2002	Working memory on letters	Conjunction of 2-back task for letters, dots localization, shapes, pictures	
-36.00	60.00	0.00	Hautzel et al., 2002	Working memory on letters	Conjunction of 2-back task for letters, dot localizations, shapes, pictures	
-44.00	24.00	-8.00	Jancke and Shah, 2002	Discriminating syllables	Attend target syllables to the right ear	Detect target syllables binaurally
-28.00	60.00	-4.00	Jancke and Shah, 2002	Discriminating syllables	Attend target syllables to the right ear	Detect target syllables binaurally
-28.00	60.00	12.00	Jancke and Shah, 2002	Discriminating syllables	Attend target syllables to the right ear	Detect target syllables binaurally
-38.38	28.41	-12.37	Joanisse and Gati, 2003	Discriminating syllables	Rapid temporal variation in consonant and tone sweep	Spectral variation in vowel and tone pitch
-36.36	49.83	-6.46	Joanisse and Gati, 2003	Discriminating syllables	Rapid temporal variation in consonant and tone sweep	Spectral variation in vowel and tone pitch
-40.40	33.53	-11.47	Mechelli et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words	Cross fixation
-25.25	25.66	3.00	Roskies et al., 2001	Word rhyming	Rhyme comparison with words	Synonym comparison on words
-26.00	22.00	-4.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation low SN ratio	Identification of a face

Table 18. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster SMG pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-42	-52	37	SMG	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-40.40	-51.74	46.26	Cohen et al., 1997	Working memory on letters	Effect of load on N-back tasks	
-28.28	-44.55	46.97	Cohen et al., 1997	Working memory on letters	Interaction memory load and load susceptibility	
-51.52	-57.95	24.82	Fiez et al., 1996	Listening to pseudo-words	Passive listening to pseudo-words	Cross fixation
-44.00	-44.00	40.00	Hautzel et al., 2002	Working memory on letters	Conjunction of 2 back task for letters, dot localizations, shapes, pictures	
-50.51	-57.38	34.59	Heim and Friederici, 2003	Discriminating at word-level	Vowel begin a picture or an object name	
-38.38	-58.88	22.70	Joanisse and Gati, 2003	Discriminating syllables	Spectral variation in vowel and tone pitch	Rapid temporal variation in consonant and tone sweep
-49.49	-37.51	50.95	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-30.30	-56.50	37.81	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-46.00	-54.00	52.00	Scott et al., 2003	Syllables counting in words	Syllables counting in words	Semantic categorization
-43.00	-55.00	17.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation low SN ratio	Identification of a syllable during audio-visual presentation

Table 19. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T1 pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-50	-38	12	T1	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-62.63	-41.91	13.09	Belin et al., 2000	Human voice selective area	Passive listening to vocal sounds	Passive listening to non-vocal sounds
-40.40	-38.96	16.20	Belin et al., 2000	Human voice selective area	Passive listening to vocal sounds	Passive listening to non-vocal sounds
-40.40	-38.08	19.42	Belin and Zatorre, 2003	Listening to syllables	Passive listening to syllables	Rest
-53.54	-44.81	8.89	Binder et al., 2000	Listening to pseudo-words	Listening to monosyllabic pseudo-words	Listening to tones
-50.51	-38.08	19.42	Bookheimer et al., 2000	Repetition	Reciting the months of the year	Cross fixation
-60.00	-48.00	12.00	Buchanan et al., 2000	Discriminating words	Detected a target phoneme in words	Detected the target emotional intonation
-56.00	-44.00	8.00	Buchanan et al., 2000	Discriminating words	Detected a target phoneme in words	Detected the target emotional intonation
-52.00	-40.00	8.00	Bunge et al., 2001	Working memory on letters	Interaction memory load and load susceptibility	
-46.46	-26.54	15.55	Calvert et al., 1999	Word repeating	Repeating numbers from an audio-visual presentation	View a static face while hearing a voice or Lip-reading
-53.54	-47.65	25.37	Heim and Friederici, 2003	Discriminating at word-level	Vowel begin a picture or an object name	
-48.48	-39.53	6.44	Howard et al., 1992	Repetition	Repeating heard words	Say "crime when inverted words
-48.00	-32.00	12.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables	Listening to vowels
-40.00	-36.00	16.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables	Listening to vowels
-56.00	-44.00	20.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables with voiceless initial consonant	Listening to voiced syllables
-40.00	-36.00	12.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables with voiceless initial consonant	Listening to voiced syllables
-44.00	-28.00	12.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables with voiceless initial consonant	Listening to voiced syllables
-44.00	-24.00	0.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables with voiceless initial consonant	Listening to voiced syllables
-48.48	-32.44	9.33	Joanisse and Gati, 2003	Discriminating syllables	Rapid temporal variation in consonant and tone sweep	Spectral variation in vowel and tone pitch
-45.45	-21.01	7.64	Meyer et al., 2002	Listening pseudo-words	Listening to grammatically correct sentences with pseudo-words	Listening to filtered sentences
-46.46	-33.94	19.20	Paulesu et al., 1993	Working memory on letters	Maintaining string of letters	Viewing Korean letters
-48.48	-37.67	10.69	Poeppl et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-38.38	-33.53	10.48	Poeppl et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-52.53	-54.02	7.20	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime" when inverted words
-62.63	-45.95	11.13	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Listening to words

-52.53	-39.94	15.17	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Listening to words
-48.48	-32.13	2.78	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 3 letters	Maintenance of 1 letter
-57.58	-55.26	11.62	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-53.54	-31.10	2.73	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-57.00	-29.00	36.00	Scott et al., 2003	Syllables counting in words	Syllables counting in words	Semantic categorization
-50.00	-34.00	5.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation low SN ratio	Identification of a face
-50.00	-35.00	2.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation low SN ratio	Identification of a face
-56.00	-49.00	9.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation low SN ratio	Identification of a syllable during audio-visual presentation
-47.00	-40.00	12.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face
-44.44	-27.16	6.88	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Generate a verb
-46.46	-35.44	7.31	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Rest

Table 20. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster PT pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-60	-27	9	PT	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-61.62	-34.36	6.17	Binder et al., 2000	Listening to syllables	Listening to reversed monosyllabic words	Listening to tones
-57.58	-34.36	6.17	Binder et al., 2000	Listening to pseudo-words	Listening to monosyllabic pseudo-words	Listening to tones
-52.53	-17.18	13.97	Bookheimer et al., 2000	Repetition	Repeating 5 phonemes	Cross fixation
-52.00	-22.00	8.00	Braun et al., 1997	Articulation	Orolaryngeal motor task	Rest
-53.54	-22.35	14.24	Fiez et al., 1996	Listening to pseudo-words	Passive listening to pseudo-words	Cross fixation
-60.61	-22.97	5.57	Herbster et al., 1997	Reading pseudo-words	Overt reading of pseudo-words	Viewing non-words and say "Hiya"
-59.60	-31.04	1.64	Hickok et al., 2003	Listening to pseudo-words	Listening and rehearsing pseudo-words	
-56.00	-28.00	12.00	Hugdahl et al., 2003	Listening to vowels, words, pseudo-words	Attended to pseudo-words	ER design
-60.00	-32.00	16.00	Jancke and Shah, 2002	Discriminating syllables	Attend target syllables to the right ear	Detect target syllables binaurally
-60.00	-20.00	16.00	Jancke and Shah, 2002	Discriminating syllables	Attend target syllables to the right ear	Detect target syllables binaurally
-60.00	-24.00	8.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables	Listening to tones
-56.00	-24.00	8.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables	Listening to vowels
-60.00	-20.00	8.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables with voiceless initial consonant	Listening to voiced syllables
-63.00	-24.00	18.00	Jessen et al., 1999	Reading letters	Reading unpronounceable letter strings	Reading highly imaginable words
-63.64	-28.92	0.48	Joanisse and Gati, 2003	Discriminating syllables	Rapid temporal variation in consonant and tone sweep	Spectral variation in vowel and tone pitch
-70.71	-31.04	1.64	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words for English and Italian readers	Reading words for English and Italian readers
-58.59	-25.04	5.67	Poeppel et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-60.61	-27.32	10.15	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Listening to words
-64.65	-36.63	10.64	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 3 letters	Maintenance of 1 letter
-66.67	-35.60	10.58	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-59.00	-30.00	8.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation	Identification of a face
-57.00	-30.00	8.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation low SN ratio	Identification of a face
-58.59	-22.15	9.87	Zatorre et al., 1992	Listening to syllables	Passive listening to syllables	Listening to noise

Table 21. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T1a pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-56	-12	-3	T1a	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-59.60	-21.11	-13.08	Beauregard et al., 1997	Reading letters	Reading random-letters block	Cross fixation
-62.00	-14.00	0.00	Belin et al., 2002	Human voice selective area	Passive listening to vocal sounds	Passive listening to non-vocal sounds
-62.63	-14.49	0.76	Belin et al., 2000	Human voice selective area	Passive listening to vocal sounds	Passive listening to nonvocal sounds
-60.61	-1.60	-10.63	Belin et al., 2000	Human voice selective area	Passive listening to vocal sounds	Passive listening to nonvocal sounds
-56.57	-24.89	2.40	Binder et al., 2000	Listening to syllables	Listening to reversed monosyllabic words	Listening to tones
-56.57	-6.16	-0.84	Binder et al., 2000	Listening to syllables	Listening to reversed monosyllabic words	Listening to tones
-53.54	-12.42	0.66	Binder et al., 2000	Listening to syllables	Listening to reversed monosyllabic words	Listening to tones
-56.57	-6.16	-0.84	Binder et al., 2000	Listening to pseudo-words	Listening to monosyllabic pseudo-words	Listening to tones
-54.55	-26.90	1.42	Binder et al., 2000	Listening to pseudo-words	Listening to monosyllabic pseudo-words	Listening to tones
-54.55	-13.45	0.71	Binder et al., 2000	Listening to pseudo-words	Listening to monosyllabic pseudo-words	Listening to tones
-54.55	-14.90	9.49	Bookheimer et al., 2000	Repetition	Reciting the months of the year	Cross fixation
-54.00	-18.00	-3.00	Booth et al., 2002	Word rhyming	Rhyming task auditory	Tones identification task
-50.00	-18.00	4.00	Braun et al., 1997	Articulation	Oralaryngeal motor task	Rest
-30.30	19.87	-29.75	Herbster et al., 1997	Reading pseudo-words	Overt reading of pseudo-words	Viewing nonwords and say "Hiya"
-64.00	-16.00	-8.00	Hugdahl et al., 2003	Listening to vowels, words, pseudo-words	Attended to pseudo-words	ER design
-60.00	-12.00	-4.00	Hugdahl et al., 2003	Listening to vowels, words, pseudo-words	Attended to vowels	ER design
-64.00	-12.00	-8.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables	Listening to tones
-56.00	-16.00	-12.00	Jancke et al., 2002	Listening to syllables	Listening to syllables	Listening to tones
-50.51	-6.31	2.51	Meyer et al., 2002	Listening pseudo-words	Listening to grammatically correct sentences with pseudo-words	Listening to normal sentences
-54.55	-4.14	0.22	Poeppl et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-55.00	-20.00	1.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during auditory presentation	Identification of a face
-55.00	-22.00	1.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation	Identification of a face

-47.00	16.00	-12.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of syllable during auditory presentation low SN ratio	Identification of a face
-54.00	-16.00	4.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation low SN ratio	Identification of a face
-57.00	-18.00	0.00	Wildgruber et al., 2001	Repetition	Silent repetition of syllables	Rest
-58.59	-13.30	-2.81	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Phonetic discrimination of the ending of a pair of words	Listening to noise burst
-58.59	-3.88	-5.74	Zatorre et al., 1992	Listening to syllables	Passive listening to syllables	Listening to noise

Table 22. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T3p pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-50	-60	-7	T3p	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-63.64	-49.77	-18.58	Beauregard et al., 1997	Reading letters	Reading random-letters block	Cross fixation
-54.55	-47.75	-17.50	Beauregard et al., 1997	Reading letters	Reading random-letters block	Cross fixation
-45.00	-60.00	-21.00	Booth et al., 2002	Word rhyming	Rhyming task visual	Non-linguistic symbols identification task
-46.46	-71.82	12.50	Calvert et al., 1999	Word repeating	Repeating numbers from an audio-visual presentation	View a static face while hearing a voice or Lip-reading
-43.43	-71.56	7.04	Calvert et al., 1999	Word repeating	Repeating numbers from an audio-visual presentation	View a static face while hearing a voice or Lip-reading
-46.00	-52.00	-20.00	Cappa et al., 1998	Reading pseudo-words	Detecting /e/ in written pseudo-words	Rest
-45.45	-56.09	7.31	Hickok et al., 2003	Listening to pseudo-words	Listening and rehearsing pseudo-words	
-56.00	-64.00	0.00	Hugdahl et al., 2003	Listening to vowels, words, pseudo-words	Attended to vowels	ER design
-58.59	-59.29	-13.26	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words for English readers	Reading pseudo-words for Italian readers
-54.55	-52.77	-20.79	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words for English and Italian readers	Reading words for English and Italian readers
-52.53	-61.36	-13.14	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words for English and Italian readers	Reading words for English and Italian readers
-48.48	-67.47	-15.17	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words for English and Italian readers	Reading words for English and Italian readers
-48.48	-59.71	-3.70	Paulesu et al., 2000	Reading pseudo-words	Reading pseudo-words for English and Italian readers	Reading words for English and Italian readers
-49.49	-57.74	-1.43	Rypma et al., 1999	Working memory on letters	Maintenance of 6 letters	Maintenance of 1 letter
-45.00	-65.00	-7.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation low SN ratio	Identification of a face
-47.00	-63.00	5.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face
-40.00	-55.00	-6.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation faces	Identification of a face

Table 23. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T2m pour le traitement PHONOLOGIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, date	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-51	-35	-11	T2m	Traitement phonologique	Coordonnées moyennes du cluster	
-58.59	-38.13	-1.37	Beauregard et al., 1997	Reading letters	Reading random-letters block	Cross fixation
-38.38	-26.08	-17.56	Poeppel et al., 2004	Listening syllables	Categorical perception of syllables	Button press
-56.57	-45.12	-6.93	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime" when inverted words
-48.48	-24.42	-8.12	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime" when inverted words
-46.46	-34.56	-12.30	Price et al., 1996	Repetition	Repeating words	Say "crime" when inverted words
-45.00	-28.00	-8.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during audio-visual presentation	Identification of a face
-45.00	-41.00	-7.00	Sekiyama et al., 2003	Discriminating syllables	Identification of a syllable during visual presentation low SN ratio	Identification of a face
-48.48	-43.00	-8.24	Warburton et al., 1996	Repetition	Repeating silently pseudo-words	Rest
-62.63	-35.29	-19.41	Zatorre et al., 1996	Discrimination in words	Discriminating /b/ in pairs of words	Passive listening to words
-62.63	-35.29	-19.41	Zatorre et al., 1992	Listening to syllables	Rhyming with syllables	Passive listening to syllables

Table 24. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster PRF3OP pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-42	4	36	PrF3op	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-49.00	4.00	25.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched auditory subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched auditory basic-level words
-49.00	11.00	30.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched visual subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched visual basic-level words
-46.46	13.97	31.91	Binder et al., 1996	Categorization	Listening to names of animals = respond when animals are both "found in US" and "used by people"	Listening to high and low tones = respond when sequences contained two high tones
-35.35	6.88	50.79	Binder et al., 2003	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were real words	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were pseudo-words
-48.00	3.00	45.00	Cohen et al., 2002	Word reading	Passive reading of highly imaginable words	Passive reading of consonant strings
-35.35	5.43	37.80	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-44.44	7.81	31.15	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-36.36	2.69	30.33	Gurd et al., 2002	Word generation	Covert production of words from a single predefined semantic category	Covert production of words from a single known ordered list
-45.45	5.64	33.44	James and Gauthier, 2004	Semantic retrieval	Visual presentation of a novel object for which a set of semantic features was previously learned = retrieval of these semantic feature	Visual presentation of a novel object for which no semantic feature was previously learned = retrieval of semantic features
-35.00	2.00	24.00	Kotz et al., 2002	Semantic association	Auditory presentation of a word followed an unrelated target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-words	Auditory presentation of a word followed a related target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-words

-36.36	1.86	47.79	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-34.00	3.00	51.00	McDermott et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of words related to one another semantically = think about how the word pairs could be meaningfully connected	Visual presentation of words related to one another phonologically = think about how the word pairs sounded alike
-31.00	3.00	27.00	McDermott et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of words related to one another semantically = think about how the word pairs could be meaningfully connected	Visual presentation of words related to one another phonologically = think about how the word pairs sounded alike
-49.49	6.93	27.93	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words = judge whether the word was presented in uppercase or lowercase
-39.39	-2.43	51.28	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words = judge whether the word was presented in uppercase or lowercase
-40.00	4.00	28.00	Price et al., 1996a	Word reading	Passive reading of familiar nouns	Passive reading of consonant letter strings
-51.41	6.82	49.81	Roskies et al., 2001	Semantic association	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words were synonyms	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words rhymed
-41.41	-5.90	37.31	Thompson-Schill et al., 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of living things = questions about visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-38.38	-5.90	37.31	Thompson-Schill et al., 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of non-living things = questions about visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-38.38	6.52	36.66	Thompson-Schill et al., 1997	Selection	Classification of line drawings of common objects, according to one specific attribute of the object's representation	Classification of line drawings of common objects, according to basic level object name
-49.49	6.72	32.29	Thompson-Schill et al., 1997	Selection	Covert generation of verb related to a visually presented noun with many appropriate associated responses	Covert generation of verb related to a visually presented noun with few appropriate associated responses

-45.45	2.59	32.51	Thompson-Schill et al., 1997	Selection	Visual presentation of a target word with several probe words = judge which probe was the most similar, based on specific attributes or features	Visual presentation of a target word with several probe words = judge which probe was the most similar, based on global similarity
-46.00	4.00	48.00	Vingerhoets et al., 2003	Word generation	Visual presentation of a letter stimulus = covert generation of words beginning with the designated letter	Visual presentation of a number = covert counting from the designated number
-43.43	1.50	33.66	Wagner et al., 2000	Semantic priming	Visual presentation of novel words = abstract/concrete decision semantic and uppercase/lowercase decision non semantic	Visual presentation of repeated words = abstract/concrete decision semantic and uppercase/lowercase decision non semantic
-43.43	1.65	30.38	Wagner et al., 2000	Semantic priming	Visual presentation of novel words = abstract/concrete decision semantic	Visual presentation of repeated words = abstract/concrete decision semantic
-39.00	6.00	24.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items = decide which target was most related to the cue
-32.32	8.28	43.09	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of verb-noun pairs = judge whether the pair was matched

Table 25. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F3OPD pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-44	21	24	F3opd	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-41.00	26.00	25.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched auditory subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched auditory basic-level words
-31.31	19.97	35.95	Binder et al., 2003	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were real words	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were pseudo-words
-45.00	21.00	24.00	Booth et al., 2002	Semantic association	Subjects judged whether a visually presented word matched with one of two preceding words	Subjects judged whether non-linguistic symbol was the same as one of two preceding symbols
-48.00	18.00	18.00	Booth et al., 2002	Semantic association	Subjects judged whether an auditory presented word matched with one of two preceding words	Subjects judged whether non-linguistic pure tone was the same as one of two preceding pure tones
-41.41	11.38	21.16	Braver and Bongiolatti, 2002	Categorization	Visual presentation of words = subjects semantically classified each word as concrete or abstract nouns	
-49.49	31.15	17.94	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-32.32	37.87	28.47	Gurd et al., 2002	Word generation	Covert production of words from a single predefined semantic category	Covert production of words from a single known ordered list
-42.42	15.42	23.13	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-48.48	23.44	28.15	Heun et al., 2000	Word reading	Reading and learning of a 20-item word list	Passive perception of strings of Xs
-37.37	13.04	29.78	James and Gauthier, 2004	Semantic retrieval	Visual presentation of a novel object for which a set of semantic features was previously learned = retrieval of these semantic feature	Visual presentation of a novel object for which a set of proper names was previously learned = retrieval of these proper names

-48.00	12.00	22.00	Kelley et al., 2002	Semantic retrieval	Visual presentation of trait adjectives = judge whether the adjective was of self relevance or other relevance	Visual presentation of trait adjectives = judge whether the adjective was printed in uppercase letters
-38.00	18.00	23.00	Kotz et al., 2002	Semantic association	Auditory presentation of a word followed an unrelated target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed a related target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-47.00	22.00	14.00	Kotz et al., 2002	Semantic association	Auditory presentation of a word followed an unrelated target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed a related target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-42.42	11.38	21.16	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-42.42	17.18	29.56	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of a color associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-38.38	30.01	20.18	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of a color associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-37.00	18.00	18.00	McDermott et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of words related to one another semantically = think about how the word pairs could be meaningfully connected	Visual presentation of words related to one another phonologically = think about how the word pairs sounded alike
-60.00	20.00	28.00	Noesselt et al., 2003	Categorization	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = interaction effects between word presentation rate and semantic categorization	
-48.00	28.00	16.00	Noesselt et al., 2003	Categorization	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = interaction effects between word presentation rate and semantic categorization	

-56.00	32.00	24.00	Noesselt et al., 2003	Categorization	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = interaction effects between word presentation rate and semantic categorization	
-50.00	20.00	16.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a “X” appeared
-28.00	28.00	28.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of verb and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation of nouns and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared
-36.00	30.00	20.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of verb and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation of nouns and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared
-53.54	15.26	26.40	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words and pseudo-words = judge the number of syllables
-42.00	28.00	20.00	Price et al., 1996	Word reading	Passive reading of familiar nouns	Passive reading of consonant letter strings
-38.38	13.97	31.91	Thompson-Schill et al., 1997	Selection	Classification of line drawings of common objects, according to one specific attribute of the object’s representation	Classification of line drawings of common objects, according to basic level object name
-42.42	21.73	20.62	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for physical size
-44.00	15.00	27.00	Vingerhoets et al., 2003	Word generation	Visual presentation of a letter stimulus = covert generation of words beginning with the designated letter	Visual presentation of a number = covert counting from the designated number
-44.00	17.00	23.00	Vingerhoets et al., 2003	Word generation	Visual presentation of a letter stimulus = covert generation of words beginning with the designated letter	Visual presentation of a number = covert counting from the designated number
-46.00	36.00	22.00	Vingerhoets et al., 2003	Word generation	Visual presentation of a letter stimulus = covert generation of words beginning with the designated letter	Visual presentation of a number = covert counting from the designated number
-53.54	14.64	39.49	Wagner et al., 2000	Semantic priming	Visual presentation of novel words = abstract/concrete decision semantic	Visual presentation of repeated words = abstract/concrete decision semantic

-46.46	24.42	29.18	Wagner et al., 2000	Semantic priming	Visual presentation of novel words = abstract/concrete decision semantic	Visual presentation of repeated words = abstract/concrete decision semantic
-40.40	19.76	18.55	Wagner et al., 2000	Semantic priming	Visual presentation of novel words = abstract/concrete decision semantic	Visual presentation of repeated words = abstract/concrete decision semantic
-57.00	12.00	30.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-51.00	21.00	24.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-48.00	30.00	27.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-36.00	21.00	27.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items = decide which target was most related to the cue
-51.00	18.00	27.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-46.46	23.59	24.87	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of concrete nouns = passive listening
-39.39	15.11	29.67	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = name objects
-40.40	19.66	20.73	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory	Stare at visual noise pattern

Table 26. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F3TV pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-44	20	4	F3tv	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-49.00	19.00	0.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched auditory subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched auditory basic-level words
-48.00	26.00	8.00	Bright et al., 2004	Categorization	Lexical decision words/non-words ? and semantic categorization living/non-living? on visually presented words and pictures	Target detection "find the x" and visual categorization same family? on visually presented non-words and 2D shapes
-60.00	16.00	4.00	Buchanan et al., 2000	Categorization	Auditory presentation of four words spoken in four emotions = verbal detection of on word spoken in any of the four emotional tones	Auditory presentation of four words spoken in four emotions = emotion detection of any of the four words spoken in "Happy" tone
-30.00	21.00	9.00	Cohen et al., 2002	Word reading	Passive reading of highly imaginable words	Passive reading of consonant strings
-44.44	29.34	12.60	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-56.57	-7.97	15.66	Hagoort et al., 1999	Word reading	Overt reading of concrete words	Overt reading of pronounceable pseudo-words
-37.37	0.98	1.04	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-48.48	3.78	7.42	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-39.39	26.49	7.31	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-40.40	12.62	-5.50	Herbster et al., 1997	Word reading	Reading aloud of irregular words	Say « Hiya » as each non pronounceable letter string was visually presented
-46.46	0.21	-4.78	Herbster et al., 1997	Word reading	Reading aloud of irregular and regular words	Say « Hiya » as each non pronounceable letter string was visually presented
-57.58	18.94	-8.25	Heun et al., 2000	Word reading	Reading and learning of a 20-item word list	Passive perception of strings of Xs

-52.53	-5.95	16.64	James and Gauthier, 2004	Semantic retrieval	Visual presentation of a novel object for which a set of semantic features was previously learned = retrieval of these semantic feature	Visual presentation of a novel object for which a set of proper names was previously learned = retrieval of these proper names
-39.39	35.54	12.27	James and Gauthier, 2004	Semantic retrieval	Visual presentation of a novel object for which a set of semantic features was previously learned = retrieval of these semantic feature	Visual presentation of a novel object for which no semantic feature was previously learned = retrieval of semantic features
-42.00	16.00	-4.00	Kelley et al., 2002	Semantic retrieval	Visual presentation of trait adjectives = judge whether the adjective was of self relevance or other relevance	Visual presentation of trait adjectives = judge whether the adjective was printed in uppercase letters
-32.00	24.00	11.00	Kotz et al., 2002	Semantic association	Auditory presentation of a word followed an unrelated target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed a related target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-43.43	18.32	5.56	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-34.34	48.84	14.83	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-43.00	9.00	0.00	McDermott et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of words related to one another semantically = think about how the word pairs could be meaningfully connected	Visual presentation of words related to one another phonologically = think about how the word pairs sounded alike
-44.00	24.00	-4.00	Noesselt et al., 2003	Categorization	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = response when heard animal words	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = passive listening
-54.00	21.00	-6.00	Noppeney and Price, 2004	Semantic association	Visual presentation of word triads referring to abstract concepts = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample	Visual presentation of word triads referring to hand movements, visual attributes and sounds = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample
-42.00	18.00	12.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a "X" appeared

-52.00	20.00	-8.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a “X” appeared
-38.00	24.00	8.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a “X” appeared
-34.00	24.00	8.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a “X” appeared
-44.00	14.00	-4.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of abstract words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation of concrete words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared
-46.46	20.85	-4.78	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words = judge whether the word was presented in uppercase or lowercase
-51.52	21.83	-3.65	Roskies et al., 2001	Semantic association	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words were synonyms	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words rhymed
-36.36	34.56	11.23	Savage et al., 2001	Semantic association	Auditory presentation of words related in 4 semantic categories = notice semantic categories and regroup related items together	Auditory presentation of words that did not share any obvious semantic relationships
-38.38	-4.55	8.95	Thompson-Schill et al., 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of non-living things = questions about non visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-40.40	25.71	1.91	Wagner et al., 2000	Semantic priming	Visual presentation of novel words = abstract/concrete decision semantic	Visual presentation of repeated words = abstract/concrete decision semantic
-43.43	38.70	11.02	Wagner et al., 2000	Semantic priming	Visual presentation of novel words = abstract/concrete decision semantic	Visual presentation of repeated words = abstract/concrete decision semantic
-45.00	27.00	9.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items = decide which target was most related to the cue

-51.00	21.00	-12.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items = decide which target was most related to the cue
-51.00	21.00	-3.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-40.40	20.49	3.27	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of verb-noun pairs = judge whether the pair was matched
-36.36	40.77	10.91	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of verb-noun pairs = judge whether the pair was matched
-40.40	24.63	3.05	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color in which object had been studied

Table 27. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F3TV pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-37	31	-9	F3orb	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-30.00	26.00	-5.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched auditory subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched auditory basic-level words
-34.00	22.00	0.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched visual subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched visual basic-level words
-45.45	32.96	1.53	Binder et al., 1996	Categorization	Listening to names of animals = respond when animals are both "found in US" and "used by people"	Listening to high and low tones = respond when sequences contained two high tones
-38.38	39.58	-8.25	Binder et al., 2003	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were real words	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were pseudo-words
-33.00	21.00	-9.00	Booth et al., 2002	Semantic association	Subjects judged whether an auditory presented word matched with one of two preceding words	Subjects judged whether non-linguistic pure tone was the same as one of two preceding pure tones
-45.00	36.00	-15.00	Booth et al., 2002	Semantic association	Subjects judged whether an auditory presented word matched with one of two preceding words	Subjects judged whether non-linguistic pure tone was the same as one of two preceding pure tones
-42.42	20.08	-10.70	Braver and Bongiolatti, 2002	Categorization	Visual presentation of words = subjects semantically classified each word as concrete or abstract nouns	
-38.00	30.00	-12.00	Bright et al., 2004	Categorization	Lexical decision words/non-words ? and semantic categorization living/non-living? on visually presented words and pictures	Target detection "find the x" and visual categorization same family? on visually presented non-words and 2D shapes
-48.00	32.00	-16.00	Buchanan et al., 2000	Categorization	Auditory presentation of four words spoken in four emotions = verbal detection of on word spoken in any of the four emotional tones	Auditory presentation of four words spoken in four emotions = emotion detection of any of the four words spoken in "Sad" tone

-34.34	28.15	-6.39	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-34.34	29.18	-6.45	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-36.36	23.28	-13.26	Gurd et al., 2002	Word generation	Covert production of words from a single predefined semantic category	Covert production of words from a single known ordered list
-30.30	20.70	-1.09	Jennings et al., 1998	Categorization	Visual presentation of concrete nouns = judge whether each word represented something that could be considered as living	Visual presentation of concrete nouns = judge whether each word contained the letter "A"
-30.30	35.39	-6.81	Jennings et al., 1998	Categorization	Visual presentation of concrete nouns = judge whether each word represented something that could be considered as living	Visual presentation of concrete nouns = judge whether each word contained the letter "A"
-32.00	26.00	-8.00	Kelley et al., 2002	Semantic retrieval	Visual presentation of trait adjectives = judge whether the adjective was of self relevance or other relevance	Visual presentation of trait adjectives = judge whether the adjective was printed in uppercase letters
-32.32	35.18	-1.86	Martin et al., 1995	Semantic association	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-24.24	33.53	-11.47	Martin et al., 1995	Semantic association	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of a color associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-37.00	36.00	-12.00	McDermott et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of words related to one another semantically = think about how the word pairs could be meaningfully connected	Visual presentation of words related to one another phonologically = think about how the word pairs sounded alike
-32.00	32.00	-4.00	Noesselt et al., 2003	Categorization	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = response when heard animal words	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = passive listening
-45.00	52.00	-8.00	Noesselt et al., 2003	Categorization	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = response when heard animal words	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = passive listening

-44.00	24.00	-12.00	Noesselt et al., 2003	Categorization	Auditory presentation of one- or two-syllabic concrete nouns = interaction effects between word presentation rate and semantic categorization	
-32.00	26.00	-20.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a "X" appeared
-46.46	51.69	-1.64	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words = judge whether the word was presented in uppercase or lowercase
-25.25	52.57	-22.11	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words = judge whether the word was presented in uppercase or lowercase
-37.37	29.44	-12.43	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words and pseudo-words = judge the number of syllables
-42.42	41.81	-11.95	Poldrack et al., 1999	Categorization	Visual presentation of words = judge whether the word was abstract or concrete	Visual presentation of words and pseudo-words = judge the number of syllables
-50.00	32.00	-13.00	Ronnberg et al., 2004	Semantic retrieval	Audiovisual presentation of a six lexical item in sign and speech = generate six exemplars in sign and speech of the given category	Audiovisual presentation of a six lexical item in sign and speech = recall the six lexical items in sign and speech
-41.31	42.85	-12.13	Roskies et al., 2001	Semantic association	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words were synonyms	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words rhymed
-37.37	24.53	-15.72	Roskies et al., 2001	Semantic association	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words were synonyms	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words rhymed
-46.00	33.00	-19.00	Scott et al., 2003	Categorization	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun could apply to human or not	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun had three syllables or not
-34.34	19.87	-5.92	Thompson-Schill et al., 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of living things = questions about visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-34.34	15.73	-5.68	Thompson-Schill et al., 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of living things = questions about visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions

-30.30	19.66	-1.04	Thompson-Schill et al., 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of non-living things = questions about non-visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-30.30	19.87	-5.92	Thompson-Schill et al., 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of non-living things = questions about visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-51.00	35.00	-3.00	Vingerhoets et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of a letter stimulus = covert generation of words beginning with the designated letter	Visual presentation of a number = covert counting from the designated number
-48.00	27.00	-12.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-42.00	33.00	-12.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by 2 target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by 4 target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-45.00	27.00	-12.00	Wagner et al., 2001	Selection	Visual presentation of a single cue word followed by target items with a weak associate of the cue = decide which target was most related to the cue	Visual presentation of a single cue word followed by target items with a strong associate of the cue = decide which target was most related to the cue
-20.20	45.74	-7.41	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color in which object had been studied

Table 28. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster AG pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-45	-68	26	AG	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-50.51	-67.99	18.82	Binder et al., 2003	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were real words	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were pseudo-words
-45.45	-75.08	37.70	Binder et al., 1999	Categorization	Listening to names of animals = respond when animals are both "found in US" and "used by people"	Listening to high and low tones = respond when sequences contained two high tones
-40.00	-74.00	24.00	Cappa et al., 1998	Categorization	Associative knowledge : visual presentation of words referring to animals, decide whether it was found in Italy	Visual presentation of pseudo-words : decide whether it contained the letter "e"
-34.00	-80.00	32.00	Cappa et al., 1998	Categorization	Associative knowledge : visual presentation of words referring to animals, decide whether it was found in Italy	Visual presentation of pseudo-words : decide whether it contained the letter "e"
-40.00	-78.00	24.00	Cappa et al., 1998	Categorization	Associative knowledge : visual presentation of words referring to objects, decide whether it was used for food preparation activities	Visual presentation of pseudo-words : decide whether it contained the letter "e"
-47.47	-79.58	23.79	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-38.38	-84.34	37.10	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-35.35	-85.37	37.15	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-43.43	-74.97	13.75	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-44.44	-63.33	29.46	Démonet et al., 1994	Reading, listening to words	Passive listening of concrete words	Passive listening of non-words

-56.57	-70.78	12.44	Grossman et al., 2002	Categorization	Visual presentation of words that included citation form of cognition verbs = judge the pleasantness of each stimulus	Visual presentation of words that included citation form of motion verbs = judge the pleasantness of each stimulus
-52.53	-62.45	10.91	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-44.00	-58.00	29.00	Kotz et al., 2002	Semantic priming	Auditory presentation of a word followed a related target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed an unrelated target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-53.00	-46.00	32.00	Kotz et al., 2002	Semantic priming	Auditory presentation of a pseudo-word followed a target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed a target pseudo-word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-44.00	-66.00	18.00	Kotz et al., 2002	Semantic priming	Auditory presentation of a pseudo-word followed a target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed a target pseudo-word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-50.51	-65.61	33.93	Martin et al., 1995	Semantic association	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-46.46	-62.92	20.73	Martin et al., 1995	Semantic association	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-44.44	-56.09	29.08	Menard et al., 1996	Reading, listening to words	Passive reading of familiar words	Passive viewing of a set of crosshairs
-57.58	-54.23	33.33	Menard et al., 1996	Reading, listening to words	Passive reading of familiar words	Passive viewing of a series of five X
-50.51	-71.20	21.17	Price et al., 1997	Categorization	Visual presentation of words of familiar objects = judge whether the word referred to a living object	Visual presentation of words of familiar objects = judge whether the word had one, two or three syllables
-39.49	-62.59	35.62	Roskies et al., 2001	Semantic association	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words were synonyms	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words rhymed

-51.00	-65.00	22.00	Scott et al., 2003	Categorization	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun could apply to human or not	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun had three syllables or not
-47.47	-61.00	23.90	Small et al., 1996	Reading, listening to words	Reading aloud of real words	Visual perception of false font = say « range »
-40.40	-73.68	30.01	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for physical size
-38.38	-64.36	7.75	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning
-48.48	-63.12	25.10	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate nouns
-34.34	-69.75	34.15	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of verb-noun pairs = judge whether the pair was matched

Table 29. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T1P pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-55	-48	15	T1p	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-52.53	-43.77	8.84	Binder et al., 2000	Reading, listening to words	Listening of concrete monosyllabic words	Listening of pure sine wave tones
-48.48	-48.79	5.84	Chee et al., 2000	Semantic matching	Visual presentation of concrete words = choose one of two items closer in meaning to the sample stimulus	Visual presentation of concrete words = choose one of two items closer in size to the sample stimulus
-48.00	-44.00	8.00	Etard et al., 1999	Semantic association, word generation	Generate aloud a verb semantically related to visually presented everyday life objects or animals	Name aloud visually presented everyday life objects or animals
-53.00	-54.00	9.00	Fiebach et al., 2002	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = judge whether each item was a legal word activation correlated with words	Visual presentation of words and pseudo-words = judge whether each item was a legal word activation correlated with pseudo-words
-59.60	-51.64	22.31	Fiez et al., 1999	Reading, listening to words	Overt reading of high and low frequency consistent and inconsistent words	Overt reading of pronounceable non-words
-64.65	-50.29	15.71	Grossman et al., 2002	Categorization	Visual presentation of words that included citation form of motion and cognition verbs = judge the pleasantness of each stimulus	Passive reading of pseudo-words and passive viewing of pseudo-fonts
-64.65	-50.29	15.71	Grossman et al., 2002	Categorization	Visual presentation of words that included citation form of motion and cognition verbs = judge the pleasantness of each stimulus	Passive reading of pseudo-words and passive viewing of pseudo-fonts
-41.41	-43.31	20.79	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-50.51	-50.08	11.35	Howard et al., 1992	Reading, listening to words	Reading aloud of real words	Visual perception of false font = say « crime »
-50.51	-43.88	11.02	Jennings et al., 1998	Categorization	Visual presentation of concrete nouns = judge whether each word represented something that could be considered as living	Visual presentation of concrete nouns = judge whether each word contained the letter "A"
-68.00	-44.00	22.00	Moore and Price, 1999	Reading, listening to words	Visual presentation of words of objects = overt reading	Visual presentation of strings of false font = say « Okay »

-68.00	-46.00	20.00	Moore and Price, 1999	Reading, listening to words	Visual presentation of words of objects = covert and overt reading	Visual presentation of strings of false font = say « Okay »
-60.00	-50.00	12.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a “X” appeared
-34.00	-42.00	20.00	Price et al., 1996	Reading, listening to words	Passive reading of familiar nouns	Passive reading of consonant letter strings
-55.56	-56.66	19.31	Small et al., 1996	Reading, listening to words	Reading aloud of real words	Visual perception of false font = say « range »

Table 30. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster AG pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-45	-68	26	AG	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-50.51	-67.99	18.82	Binder et al., 2003	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were real words	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were pseudo-words
-45.45	-75.08	37.70	Binder et al., 1999	Categorization	Listening to names of animals = respond when animals are both "found in US" and "used by people"	Listening to high and low tones = respond when sequences contained two high tones
-40.00	-74.00	24.00	Cappa et al., 1998	Categorization	Associative knowledge : visual presentation of words referring to animals, decide whether it was found in Italy	Visual presentation of pseudo-words : decide whether it contained the letter "e"
-34.00	-80.00	32.00	Cappa et al., 1998	Categorization	Associative knowledge : visual presentation of words referring to animals, decide whether it was found in Italy	Visual presentation of pseudo-words : decide whether it contained the letter "e"
-40.00	-78.00	24.00	Cappa et al., 1998	Categorization	Associative knowledge : visual presentation of words referring to objects, decide whether it was used for food preparation activities	Visual presentation of pseudo-words : decide whether it contained the letter "e"
-47.47	-79.58	23.79	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-38.38	-84.34	37.10	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-35.35	-85.37	37.15	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-43.43	-74.97	13.75	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-44.44	-63.33	29.46	Démonet et al., 1994	Reading, listening to words	Passive listening of concrete words	Passive listening of non-words

-56.57	-70.78	12.44	Grossman et al., 2002	Categorization	Visual presentation of words that included citation form of cognition verbs = judge the pleasantness of each stimulus	Visual presentation of words that included citation form of motion verbs = judge the pleasantness of each stimulus
-52.53	-62.45	10.91	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-44.00	-58.00	29.00	Kotz et al., 2002	Semantic priming	Auditory presentation of a word followed a related target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed an unrelated target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-53.00	-46.00	32.00	Kotz et al., 2002	Semantic priming	Auditory presentation of a pseudo-word followed a target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed a target pseudo-word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-44.00	-66.00	18.00	Kotz et al., 2002	Semantic priming	Auditory presentation of a pseudo-word followed a target word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word	Auditory presentation of a word followed a target pseudo-word = judge whether the target word was a German word or a pseudo-word
-50.51	-65.61	33.93	Martin et al., 1995	Semantic association	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-46.46	-62.92	20.73	Martin et al., 1995	Semantic association	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-44.44	-56.09	29.08	Menard et al., 1996	Reading, listening to words	Passive reading of familiar words	Passive viewing of a set of crosshairs
-57.58	-54.23	33.33	Menard et al., 1996	Reading, listening to words	Passive reading of familiar words	Passive viewing of a series of five X
-50.51	-71.20	21.17	Price et al., 1997	Categorization	Visual presentation of words of familiar objects = judge whether the word referred to a living object	Visual presentation of words of familiar objects = judge whether the word had one, two or three syllables
-39.49	-62.59	35.62	Roskies et al., 2001	Semantic association	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words were synonyms	Visual presentation of word pairs = judge whether the two words rhymed

-51.00	-65.00	22.00	Scott et al., 2003	Categorization	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun could apply to human or not	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun had three syllables or not
-47.47	-61.00	23.90	Small et al., 1996	Reading, listening to words	Reading aloud of real words	Visual perception of false font = say « range »
-40.40	-73.68	30.01	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for physical size
-38.38	-64.36	7.75	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning
-48.48	-63.12	25.10	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate nouns
-34.34	-69.75	34.15	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of verb-noun pairs = judge whether the pair was matched

Table 31. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T3P pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-46	-55	-7	T3p	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-38.00	-60.00	-15.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched visual subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched visual basic-level words
-30.00	-64.00	-10.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched visually presented words	Subjects judged whether a visually presented word represented an object that could move under its own power
-59.60	-49.93	-14.99	Binder et al., 2003	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were real words	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were pseudo-words
-59.60	-48.38	-3.16	Binder et al., 2003	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were real words	Visual presentation of words and pseudo-words = decide whether items were pseudo-words
-60.00	-51.00	0.00	Booth et al., 2002	Word generation	Subjects judged whether a visually presented word matched with one of two preceding words	Subjects judged whether non-linguistic symbol was the same as one of two preceding symbols
-53.54	-53.34	-7.64	Buckner et al., 2000	Word generation	Covert word-stem completion on new letter word stems and verb generation on new nouns	Covert word-stem completion on repeated letter word stems and verb generation on repeated nouns
-43.43	-47.29	-4.42	Buckner et al., 2000	Word generation	Covert word-stem completion on new letter word stems and verb generation on new nouns	Covert word-stem completion on repeated letter word stems and verb generation on repeated nouns
-37.37	-55.41	-7.52	Chee et al., 1998	Categorization	Auditory presentation of words = judge whether it was concrete or abstract	Auditory presentation of words = judge whether it had one or multiple syllable
-50.51	-51.53	-1.79	Chee et al., 2000	Semantic association	Visual presentation of picture of objects and animals = choose one of two items closer in meaning to the sample stimulus	Visual presentation of picture of objects and animals = choose one of two items closer in size to the sample stimulus
-41.41	-68.19	1.56	Chee et al., 2000	Semantic association	Visual presentation of picture of objects and animals = choose one of two items closer in meaning to the sample stimulus	Visual presentation of picture of objects and animals = choose one of two items closer in size to the sample stimulus
-41.41	-64.57	-10.57	Chee et al., 2000	Semantic association	Visual presentation of concrete words = choose one of two items closer in meaning to the sample stimulus	Visual presentation of concrete words = choose one of two items closer in size to the sample stimulus

-42.00	-57.00	-15.00	Cohen et al., 2002	Reading, listening to words	Passive reading of highly imaginable words	Passive reading of consonant strings
-39.00	-57.00	-9.00	Cohen et al., 2002	Reading, listening to words	Passive reading of highly imaginable words	Passive reading of consonant strings
-55.56	-52.52	-2.92	Crosson et al., 1999	Word generation	Auditory presentation of a word = silent generation of emotional neutral words belonging to the same category of the sample stimulus	Silent repetition of auditory presented emotionally neutral words
-52.53	-51.07	-12.54	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-51.52	-49.05	-11.47	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-44.00	-66.00	2.00	Etard et al., 1999	Word generation	Generate aloud a verb semantically related to visually presented everyday life objects or animals	Name aloud visually presented everyday life objects or animals
-43.43	-64.99	-1.01	Fiez et al., 1999	Reading, listening to words	Overt reading of high and low frequency consistent and inconsistent words	Overt reading of pronounceable non-words
-43.43	-46.15	-6.87	Fiez et al., 1999	Reading, listening to words	Overt reading of high and low frequency consistent and inconsistent words	Overt reading of pronounceable non-words
-37.37	-58.41	-9.73	Hagoort et al., 1999	Reading, listening to words	Overt reading of concrete words	Overt reading of pronounceable pseudo-words
-39.39	-61.31	-14.33	Heun et al., 2000	Semantic retrieval	Reading 20 previously encoded words + 20 new distracter words = recognition of these 20 encoded words	Passive perception of strings of Xs
-44.44	-61.88	-1.19	Kosslyn et al., 1994	Semantic association	Visual presentation of words and objects seen from a non-canonical view = judge whether the object was paired with the correct name	Visual presentation of words and objects seen from a canonical view = judge whether the object was paired with the correct name
-44.44	-61.88	-1.19	Kosslyn et al., 1994	Semantic association	Visual presentation of words and objects seen from a non-canonical view = judge whether the object was paired with the correct name	Visual presentation of words and objects seen from a canonical view = judge whether the object was paired with the correct name
-52.53	-51.74	2.73	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of an action associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object

-46.46	-46.98	-11.59	Martin et al., 1995	Word generation	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = generate the name of a color associated with each object	Visual presentation of achromatic line drawings of common objects = name each object
-41.41	-54.27	-9.97	Thompson-Schill, 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of living things = questions about visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-45.45	-46.15	-6.87	Thompson-Schill, 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of living things = questions about non-visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-49.49	-46.36	-2.09	Thompson-Schill, 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of non-living things = questions about non-visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-41.41	-54.27	-9.97	Thompson-Schill, 1999	Semantic retrieval	Auditory presentation of nouns of non-living things = questions about visual characteristics	Auditory presentation of digitally-reversed nouns and questions
-49.49	-54.84	2.89	Thompson-Schill, 1997	Selection	Classification of line drawings of common objects, according to one specific attribute of the object's representation	Classification of line drawings of common objects, according to basic level object name
-38.38	-61.31	-14.33	Thompson-Schill, 1997	Selection	Classification of line drawings of common objects, according to one specific attribute of the object's representation	Classification of line drawings of common objects, according to basic level object name
-49.49	-57.53	-6.21	Thompson-Schill, 1997	Selection	Visual presentation of a target word with several probe words = judge which probe was the most similar, based on specific attributes or features	Visual presentation of a target word with several probe words = judge which probe was the most similar, based on global similarity
-53.00	-57.00	-9.00	Vingerhoets et al., 2003	Word generation	Visual presentation of a letter stimulus = covert generation of words beginning with the designated letter	Visual presentation of a number = covert counting from the designated number
-42.00	-60.00	-7.00	Vingerhoets et al., 2003	Word generation	Visual presentation of a letter stimulus = covert generation of words beginning with the designated letter	Visual presentation of a number = covert counting from the designated number
-56.57	-53.60	-1.67	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate nouns
-50.51	-51.12	-11.35	Warburton et al., 1996	Word generation	Auditory presentation of concrete nouns = covertly generate appropriate verbs	Auditory presentation of verb-noun pairs = judge whether the pair was matched

-48.48	-45.32	-2.15	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color in which object had been studied	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory
-48.48	-49.05	-11.47	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = name objects

Table 32. Coordonnées des pics stéréotaxique dans l'espace MNI faisant partie du cluster T2ml pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-59	-37	1	T2ml	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-57.58	-34.61	-11.11	Binder et al., 1996	Categorization	Listening of nouns designating animals = respond when animals are both "found in US" and "used by people"	Listening of high and low tones = respond when sequences contained two high tones
-59.60	-34.30	5.08	Binder et al., 2000	Reading, listening to words	Listening of concrete monosyllabic words	Listening of pure sine wave tones
-58.59	-27.94	1.47	Binder et al., 2000	Reading, listening to words	Listening of concrete monosyllabic words	Listening of pure sine wave tones
-56.57	-44.50	2.35	Buckner et al., 2000	Word generation	Covert word-stem completion on new letter word stems	Covert word-stem completion on repeated letter word
-56.57	-37.25	1.97	Chee et al., 1998	Categorization	Auditory presentation of words = judge whether it was concrete or abstract	Auditory presentation of words = judge whether it had one or multiple syllable
-63.00	-42.00	-3.00	Davis et al., 2004	Semantic matching	One back visual presentation of words = judge whether the current word was related in meaning to the preceding word	One back visual presentation of letter strings = detect whether the current item contained the same letter that the preceding stimulus
-55.56	-42.53	4.42	Fiez et al., 1996	Word generation	Visual presentation of nouns = overt generation of appropriate verbs	Passive listening to words
-55.56	-42.53	4.42	Fiez et al., 1996	Word generation	Visual presentation of nouns = overt generation of appropriate verbs	Passive listening to words
-52.53	-40.15	-2.45	Heim et al., 2002	Categorization	Visual presentation of line drawings of real objects = define the grammatical gender	Name visually presented line drawings of real objects
-58.00	-45.00	0.00	McDermott et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of words related to one another semantically = think about how the word pairs could be meaningfully connected	Visual presentation of words related to one another phonologically = think about how the word pairs sounded alike
-68.00	-38.00	10.00	Moore and Price, 1999	Reading, listening to words	Visual presentation of words of objects = overt reading	Visual presentation of strings of false font = say « Okay »
-60.00	-42.00	-6.00	Noppeney and Price, 2004	Semantic association	Visual presentation of word triads referring to abstract concepts = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample	Visual presentation of word triads referring to hand movements, visual attributes and sounds = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample

-54.55	-32.91	-2.87	Price et al., 1996b	Reading, listening to words	Passive listening to words	Passive listening to reversed words
-59.00	-41.00	-3.00	Scott et al., 2003	Categorization	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun could apply to human or not	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun had three syllables or not
-63.00	-31.00	-2.00	Specht and Reul, 2003	Reading, listening to words	Passive listening to mono or bisyllabic words	Listening to sounds of animals and instruments
-63.00	-35.00	2.00	Specht and Reul, 2003	Reading, listening to words	Passive listening to mono or bisyllabic words	Listening to pure tones with a frequency range of 400 - 1600 Hz
-58.59	-39.12	-2.51	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for physical size
-58.59	-31.04	1.64	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning
-63.64	-35.29	4.04	Wise et al., 2001	Reading, listening to words	Correlation of activity with the rate of hearing stimuli and the rate of words generated in response to hearing concrete nouns	
-63.64	-38.60	8.57	Wise et al., 2001	Reading, listening to words	Passive listening to bisyllabic nouns	Passive listening to signal correlated noise
-61.62	-36.53	8.46	Wise et al., 2001	Reading, listening to words	Passive listening to bisyllabic nouns	Passive listening to signal correlated noise

Table 33. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster FUSA pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-38	-35	-13	Fusa	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-26.00	-34.00	-15.00	Adams and Janata, 2002	Semantic association	Subjects judged whether objects matched auditory subordinate-level words	Subjects judged whether objects matched auditory basic-level words
-45.45	-35.65	-11.05	Binder et al., 1996	Categorization	Listening to names of animals = respond when animals are both "found in US" and "used by people"	Listening to high and low tones = respond when sequences contained two high tones
-26.26	-35.39	-17.02	Binder et al., 1999	Categorization	Listening to names of animals = respond when animals are both "found in US" and "used by people"	Listening to high and low tones = respond when sequences contained two high tones
-48.48	-34.35	-17.08	Bookheimer et al., 1995	Reading, listening to words	Silent reading of words depicting concrete nouns	Perception of random lines drawings
-32.00	-38.00	-20.00	Bright et al., 2004	Categorization	Lexical decision words/non-words ? and semantic categorization living/non-living? on visually presented words and pictures	Target detection "find the x" and visual categorization same family? on visually presented non-words and 2D shapes
-36.36	-40.36	-21.51	Büchel et al., 1998	Reading, listening to words	Tactile presentation Braille of words = passive reading	Tactile presentation Braille of consonant strings = passive reading
-42.42	-38.49	-16.85	Büchel et al., 1998	Reading, listening to words	Visual presentation of words = passive reading	Visual presentation of consonant strings = passive reading
-43.43	-33.68	-8.78	Buckner et al., 2000	Word generation	Covert word-stem completion on new letter word stems and verb generation on new nouns	Covert word-stem completion on repeated letter word stems and verb generation on repeated nouns
-15.15	-50.34	-5.43	Crosson et al., 1999	Word generation	Auditory presentation of a word = silent generation of emotional words belonging to the same category of the sample stimulus	Silent repetition of auditory presented emotionally neutral words
-42.42	-32.39	-14.81	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-40.40	-30.27	-16.13	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed with an implement manipulable tools	Orientation judgment on visually presented unknown faces

-45.00	-42.00	-12.00	Davis et al., 2004	Semantic association	One back visual presentation of words = judge whether the current word was related in meaning to the preceding word	One back visual presentation of letter strings = detect whether the current item contained the same letter that the preceding stimulus
-40.40	-30.63	-7.76	Démonet et al., 1994	Reading, listening to words	Passive listening of concrete words	Passive listening of non-words
-23.00	-46.00	-11.00	Fiebach et al., 2002	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = judge whether each item was a legal word activation correlated with words	Visual presentation of words and pseudo-words = judge whether each item was a legal word activation correlated with pseudo-words
-28.00	-35.00	-16.00	Fiebach et al., 2002	Categorization	Visual presentation of words and pseudo-words = judge whether each item was a legal word activation correlated with words	Visual presentation of words and pseudo-words = judge whether each item was a legal word activation correlated with pseudo-words
-34.34	-33.94	-26.64	Herbster et al., 1997	Reading, listening to words	Reading aloud of irregular words	Reading aloud of pronounceable non-words
-38.38	-40.15	-26.28	Herbster et al., 1997	Reading, listening to words	Reading aloud of irregular words	Say « Hiya » as each non pronounceable letter string was visually presented
-34.34	-38.08	-26.40	Herbster et al., 1997	Reading, listening to words	Reading aloud of regular words	Say « Hiya » as each non pronounceable letter string was visually presented
-36.36	-29.80	-26.88	Herbster et al., 1997	Reading, listening to words	Reading aloud of regular words	Reading aloud of pronounceable non-words
-40.40	-27.94	1.47	James and Gauthier, 2004	Semantic retrieval	Visual presentation of a novel object for which a set of semantic features was previously learned = retrieval of these semantic feature	Visual presentation of a novel object for which a set of proper names was previously learned = retrieval of these proper names
-34.00	-45.00	-18.00	McDermott et al., 2003	Semantic association	Visual presentation of words related to one another semantically = think about how the word pairs could be meaningfully connected	Visual presentation of words related to one another phonologically = think about how the word pairs sounded alike
-50.00	-24.00	-2.00	Moore and Price, 1999	Reading, listening to words	Visual presentation of words of objects = covert and overt reading	Visual presentation of strings of false font = say « Okay »
-46.00	-26.00	2.00	Moore and Price, 1999	Reading, listening to words	Visual presentation of words of objects = covert and overt reading	Visual presentation of strings of false font = say « Okay »
-36.00	-24.00	6.00	Moore and Price, 1999	Reading, listening to words	Visual presentation of words of objects = covert and overt reading	Visual presentation of strings of false font = say « Okay »
-46.00	-36.00	-8.00	Price et al., 1996	Reading, listening to words	Passive reading of familiar nouns	Passive reading of consonant letter strings

-44.44	-26.59	-5.61	Sevostianov et al., 2002	Semantic retrieval	One back visual presentation of words depicting common objects = judge whether the present stimulus was identical to the previous	One back visual presentation of pictures depicting common objects = judge whether the present stimulus was identical to the previous
-46.46	-46.56	-21.15	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for physical size
-42.42	-32.70	-7.64	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color in which object had been studied	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory
-40.40	-38.91	-7.29	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = name objects
-40.40	-32.49	-12.42	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory	Stare at visual noise pattern

Table 34. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster POLE pour le traitement SEMANTIQUE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-41	3	-24	pole	Traitement sémantique	Coordonnées moyennes du cluster	
-30.00	10.00	-22.00	Bright et al., 2004	Categorization	Lexical decision words/non-words ? and semantic categorization living/non-living? on visually presented words	Target detection "find the x" on visually presented non-words
-34.00	-14.00	-30.00	Bright et al., 2004	Categorization	Lexical decision words/non-words ? and semantic categorization living/non-living? on visually presented words and pictures	Target detection "find the x" and visual categorization same family? on visually presented non-words and 2D shapes
-30.00	20.00	-32.00	Bright et al., 2004	Categorization	Lexical decision words/non-words ? and semantic categorization living/non-living? on visually presented words and pictures	Target detection "find the x" and visual categorization same family? on visually presented non-words and 2D shapes
-29.29	20.90	-29.81	Damasio et al., 2001	Word generation	Visual presentation of picture of human action = retrieval of words denoting an action performed without an implement body movement	Orientation judgment on visually presented unknown faces
-46.46	5.48	-7.47	James and Gauthier, 2004	Semantic retrieval	Visual presentation of a novel object for which a set of semantic features was previously learned = retrieval of these semantic feature	Visual presentation of a novel object for which a set of proper names was previously learned = retrieval of these proper names
-51.00	9.00	-24.00	Noppeney and Price, 2004	Semantic association	Visual presentation of word triads referring to abstract concepts = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample	Visual presentation of word triads referring to hand movements, visual attributes and sounds = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample

-51.00	18.00	-27.00	Noppeney and Price, 2004	Semantic association	Visual presentation of word triads referring to abstract concepts = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample	Visual presentation of word triads referring to hand movements, visual attributes and sounds = decide which of the two words was more similar in meaning to the word sample
-50.00	10.00	-12.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a "X" appeared
-42.00	-18.00	-32.00	Perani et al., 1999	Categorization	Visual presentation of four categories of words and pseudo-words = silent reading and response when a pseudo-word appeared	Visual presentation consonant letter strings = silent reading and response when a letter string containing a "X" appeared
-46.46	12.83	-10.28	Price et al., 1996b	Reading, listening to words	Passive listening to words	Passive listening to reversed words
-34.00	-22.00	-21.00	Scott et al., 2003	Categorization	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun could apply to human or not	Visual presentation of single nouns = judge whether each noun had three syllables or not
-56.57	23.59	-20.43	Sevostianov et al., 2002	Semantic retrieval	One back visual presentation of words depicting common objects = judge whether the present stimulus was identical to the previous	One back visual presentation of pictures depicting common objects = judge whether the present stimulus was identical to the previous
-44.44	-8.90	-32.86	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for physical size
-42.42	1.45	-33.46	Vandenberghe et al., 1996	Semantic association	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for meaning	Visual presentation of word and picture triplets belonging to the same category = match the stimuli for physical size
-36.36	-19.66	-22.70	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color in which object had been studied	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory

-36.36	-2.90	-28.44	Wiggs et al., 1999	Semantic retrieval	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color in which object had been studied	Visual presentation of achromatic line drawings of objects which had been previously studied = retrieve color names from semantic memory
--------	-------	--------	--------------------	--------------------	--	--

Table 35. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F2P pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-37	10	48	F2p	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-30.00	24.00	48.00	Baumgaertner et al., 2002	Sentence comprehension	Lexical decision on sentences ending with an expected or unexpected word	Lexical decision on sentences ending with a pseudo-word
-32.32	9.72	56.08	Bottini et al., 1994	Sentence comprehension	Plausibility judgment of metaphors or sentences	Lexical decision on a string of words
-36.00	4.00	46.00	Constable et al., 2004	Syntactic processing	Plausibility judgment of object-relative sentences	Plausibility judgment of subject-relative sentences
-39.00	3.00	42.00	Hashimoto and Sakai, 2002	Syntactic processing	Syntactic decision on sentences	Short-term memory task on sentences
-27.00	15.00	57.00	Hashimoto and Sakai, 2002	Sentence comprehension	Syntactic decision on sentences	Short-term memory task on words
-39.00	6.00	36.00	Hashimoto and Sakai, 2002	Sentence comprehension	Short-term memory task on sentences	Short-term memory task on words
-27.00	15.00	48.00	Hashimoto and Sakai, 2002	Sentence comprehension	Short-term memory task on sentences	Short-term memory task on words
-45.00	6.00	54.00	Homae et al., 2002	Text comprehension	Reading a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-45.00	9.00	48.00	Homae et al., 2002	Text comprehension	Listening to a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-42.00	24.00	48.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Reading a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-45.00	15.00	48.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Listening to a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-26.26	-2.49	52.37	Kircher et al., 2001	Sentence comprehension	Generate the final word of a sentences	Choose among two the final word
-46.46	4.29	40.04	Kircher et al., 2001	Sentence comprehension	Generate the final word of a sentences	Reading the last word
-36.00	5.00	53.00	Vingerhoets et al., 2003	Text comprehension	Reading a text in non-native language	Reading a text with pseudo-words

Table 36. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F3OPD pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-49	16	24	F3opd	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-45.45	6.98	26.84	Ben Shachar et al., 2004	Syntactic processing	Listening to embedded sentences with syntactic movement	Listening to embedded sentences with no syntactic movement
-41.41	9.98	28.86	Ben Shachar et al., 2004	Syntactic processing	Listening to embedded sentences with syntactic movement	Listening to embedded sentences with no syntactic movement
-42.42	17.38	25.20	Caplan, 2001	Syntactic processing	Plausibility judgment of object-subject sentences	Plausibility judgment of subject-object sentences
-52.53	17.38	25.20	Caplan et al., 1999	Syntactic processing	Plausibility judgment of cleft subject sentences	Plausibility judgment of cleft object sentences
-49.00	11.00	13.00	Constable et al., 2004	Syntactic processing	Plausibility judgment of object-relative sentences	Plausibility judgment of subject-relative sentences
-51.52	10.50	17.95	Embick et al., 2000	Syntactic processing	Reading sentences with grammatical errors	Reading sentences with orthographic errors in words
-54.00	27.00	21.00	Hashimoto and Sakai, 2002	Sentence comprehension	Syntactic decision on sentences	Short-term memory task on words
-57.00	24.00	12.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Reading a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-50.51	8.90	30.00	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-45.45	25.51	28.04	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-50.51	8.90	30.00	Luke et al., 2002	Sentence comprehension	Judging the semantic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-47.47	18.11	31.69	Luke et al., 2002	Sentence comprehension	Judging the semantic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-38.38	29.39	33.27	Nathaniel-James and Frith, 2002	Sentence comprehension	Generate a final word that do not fitted with the sentence	Generate a final word that fitted with the sentence
-50.91	13.24	16.71	Stromswold et al., 1996	Sentence comprehension	Plausibility judgment of right-branching embedded sentences	Plausibility judgment of sentences containing pseudo-words

Table 37. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster F3TV pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-44	26	2	F3tv	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-28.28	20.23	8.73	Ben Shachar et al., 2004	Syntactic processing	Listening to embedded sentences with syntactic movement	Listening to embedded sentences with no syntactic movement
-44.44	21.32	7.58	Ben Shachar et al., 2004	Syntactic processing	Listening to embedded sentences with syntactic movement	Listening to embedded sentences with no syntactic movement
-43.43	21.37	6.49	Ben Shachar et al., 2004	Syntactic processing	Listening to embedded sentences with syntactic movement	Listening to embedded sentences with no syntactic movement
-27.27	22.30	8.62	Ben Shachar et al., 2004	Syntactic processing	Listening to embedded sentences with syntactic movement	Listening to embedded sentences with no syntactic movement
-38.38	28.97	-1.53	Bottini et al., 1994	Sentence comprehension	Plausibility judgment of metaphors or sentences	Lexical decision on a string of words
-46.46	26.70	2.94	Caplan, 2001	Syntactic processing	Plausibility judgment of object-subject sentences	Plausibility judgment of subject-object sentences
-52.53	29.39	-11.23	Cooke et al., 2002	Syntactic processing	Gender discrimination on object-relative sentences with a long gap	Gender discrimination on subject-relative sentences with a short gap
-56.57	12.62	-5.50	Cooke et al., 2002	Syntactic processing	Gender discrimination on object-relative sentences with a long gap	Gender discrimination on object-relative sentences with a short gap
-44.44	22.25	9.71	Dapretto, Bookheimer, 1999	Syntactic processing	Judging the meaning of sentences with different syntactic construction	Judging the meaning of sentences with different semantic content
-48.48	20.90	-5.98	Dapretto, Bookheimer, 1999	Sentence comprehension	Judging the meaning of sentences with different semantic content	Judging the meaning of sentences with different syntactic construction
-54.00	27.00	-6.00	Homae et al., 2002	Text comprehension	Reading a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-54.00	33.00	-3.00	Homae et al., 2002	Text comprehension	Listening to a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-51.00	27.00	-6.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Listening to a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases

-45.00	24.00	-9.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Listening to a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-46.46	22.30	8.62	Kircher et al., 2001	Sentence comprehension	Generate the final word of a sentence	Reading the last word of a sentence
-43.43	24.11	-8.55	Kotz et al., 2003	Sentence comprehension	Emotional judgment of normal sentences	Emotional judgment of filtered sentences
-23.23	25.97	-3.89	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of pragmatically incoherent sentences
-45.45	38.91	6.65	Luke et al., 2002	Sentence comprehension	Judging the semantic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-45.45	42.58	16.25	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-47.47	25.61	4.09	Meyer et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to normal sentences	Listening to filtered sentences with no semantic content
-51.52	24.58	4.14	Meyer et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to sentences with flat intonation	Listening to filtered sentences with no semantic content
-40.40	40.25	21.82	Nathaniel-James, Frith, 2002	Sentence comprehension	Generate a final word that do not fitted with the sentence	Generate a final word that fitted with the sentence
-38.38	49.46	1.74	Nathaniel-James, Frith, 2002	Sentence comprehension	Generate a final word that do not fitted with the sentence	Generate a final word that fitted with the sentence
-38.38	13.87	12.33	Stowe et al., 1998	Sentence comprehension	Reading syntactically ambiguous sentences	Reading a list of words
-38.38	13.87	12.33	Stowe et al., 1998	Syntactic processing	Reading embedded sentences	Reading simple sentences
-37.98	20.28	7.64	Stromswold et al., 1996	Syntactic processing	Reading center-embedded sentences	Reading sentences containing pseudo-words
-46.97	9.93	3.83	Stromswold et al., 1996	Syntactic processing	Reading center-embedded sentences	Reading right-branching embedded sentences
-50.00	20.00	0.00	Waters et al., 2003	Syntactic processing	Reading objects-subjects sentences	Reading subjects-objects sentences
-34.00	24.00	-8.00	Waters et al., 2003	Syntactic processing	Reading objects-subjects sentences	Reading subjects-objects sentences
-50.00	38.00	0.00	Waters et al., 2003	Syntactic processing	Reading objects-subjects sentences	Reading subjects-objects sentences

Table 38. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster STSP pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-50	-54	22	STSp	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-36.00	-64.00	31.00	Constable et al., 2004	Syntactic processing	Plausibility judgment of object-relative sentences	Plausibility judgment of subject-relative sentences
-54.00	-52.00	24.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Giving the number of narrators of stories	Listening to reversed stories
-56.00	-56.00	18.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Passive listening to stories	Listening to reversed stories
-49.49	-53.60	20.24	Embick et al., 2000	Syntactic processing	Reading sentences with grammatical errors	Reading sentences with orthographic errors in words
-43.43	-66.59	32.90	Ferstl, von Cramon, 2002	Sentence comprehension	Understanding physical stories	Listening to sentences containing pseudo-words
-60.61	-60.38	10.80	Ferstl, von Cramon, 2002	Sentence comprehension	Understanding physical stories	Listening to sentences containing pseudo-words
-48.48	-49.26	15.66	Gandour et al., 2003	Syntactic processing	Judging the grammatical prosody of English sentences	Passive listening to English sentences
-42.42	-56.92	24.77	Goel et al., 1998	Text comprehension	Reading syllogisms	Reading texts
-60.00	-54.00	15.00	Homae et al., 2002	Text comprehension	Reading a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-57.00	-54.00	27.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Listening to a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-60.00	-54.00	12.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Reading a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-48.00	-54.00	30.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Reading a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-39.39	-59.81	42.33	Just et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to sentences with high imagery content	Listening to sentences with low imagery content
-46.46	-55.36	35.57	Just et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to sentences with high imagery content	Listening to sentences with low imagery content
-50.51	-52.15	11.46	Kansaku et al., 2000	Text comprehension	Listening to narratives women	Listening to reversed narratives
-54.55	-48.22	15.60	Kansaku et al., 2000	Text comprehension	Listening to permuted narratives women	Listening to reversed narratives
-49.49	-55.62	19.26	Kircher et al., 2001	Sentence comprehension	Choose among two the final word	Reading the last word
-55.56	-49.10	12.39	Kircher et al., 2001	Sentence comprehension	Choose among two the final word	Reading the last word
-43.43	-41.39	23.95	Kircher et al., 2001	Sentence comprehension	Generate the final word of a sentences	Reading the last word
-49.49	-55.31	12.71	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of syntactically incoherent sentences
-46.46	-49.41	18.93	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of syntactically incoherent sentences

-43.43	-55.88	24.71	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Listening to string of words
-53.54	-47.60	24.28	Luke et al., 2002	Sentence comprehension	Judging the semantic plausibility of English sentences	Judging the length of words in English sentences
-54.00	-51.00	30.00	Maguire and Frith, 2004	Sentence comprehension	Detected a person name in factual sentences	Listening to list of function words and prepositions
-42.42	-70.57	29.84	Meyer et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to sentences with flat intonation	Listening to filtered sentences with no semantic content
-48.00	-57.00	21.00	Vingerhoets et al., 2003	Text comprehension	Reading a text in native language	Reading a text with pseudo-words
-46.00	-44.00	22.00	Vogelely et al., 2001	Text comprehension	Understanding physical stories with self references	Listening to theory of mind stories with self referential

Table 39. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T1A pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-57	-13	-8	T1a	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-48.48	-9.93	-8.96	Bottini et al., 1994	Sentence comprehension	Plausibility judgment of metaphors or sentences	Lexical decision on a string of words
-58.00	-6.00	-14.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Giving the number of narrators of stories	Listening to reversed stories
-56.00	-10.00	-10.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Passive listening to stories	Listening to reversed stories
-62.63	-20.90	5.46	Kansaku et al., 2000	Text comprehension	Listening to narratives men	Listening to reversed narratives
-62.63	-20.49	-3.58	Kansaku et al., 2000	Text comprehension	Listening to permuted narratives men	Listening to reversed narratives
-52.53	-22.66	-1.07	Kircher et al., 2001	Sentence comprehension	Generate the final word of a sentences	Choose among two the final word
-63.00	-18.00	-3.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a target semantic content	Attend to a target speech envelope noise
-63.00	-15.00	-3.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a speaker voice	Attend to a target speech envelope noise
-60.00	-9.00	-15.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a speaker voice	Attend to a target speech envelope noise
-38.38	-7.60	-15.06	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Listening to pragmatically incoherent sentences
-62.63	-8.90	-9.02	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-51.00	-9.00	-21.00	Maguire and Frith, 2004	Sentence comprehension	Detected a person name in factual sentences	Listening to list of function words and prepositions
-53.54	-11.07	-6.51	Meyer et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to sentences	Listening to filtered sentences with no semantic content
-53.54	-11.07	-6.51	Meyer et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to sentences with flat intonation	Listening to filtered sentences with no semantic content
-66.00	-12.00	-12.00	Scott et al., 2000	Sentence comprehension	Listening to intelligible semantic content	Listening to unintelligible semantic content
-55.00	-18.00	-11.00	Vingerhoets et al., 2003	Text comprehension	Reading a text in native language	Reading a text with pseudo-words

Table 40. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster T2P pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-40	-63	5	T2p	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-51.00	-58.00	3.00	Constable et al., 2004	Syntactic processing	Plausibility judgment of object-relative sentences	Plausibility judgment of subject-relative sentences
-40.40	-78.44	-0.23	Cooke et al., 2002	Syntactic processing	Gender discrimination on object-relative sentences with a long gap	Gender discrimination on subject-relative sentences with a long gap
-48.48	-69.95	-5.49	Cooke et al., 2002	Syntactic processing	Gender discrimination on object-relative sentences with a short gap	Gender discrimination on subject-relative sentences with a short gap
-42.42	-67.06	20.95	Fletcher et al., 1995	Text comprehension	Reading stories without theory of mind	Reading unlinked sentences
-44.44	-51.79	3.82	Just et al., 2004	Mental imagery	Listening to sentences with high imagery content	Listening to sentences with low imagery content
-30.30	-65.97	-2.15	Just et al., 2004	Mental imagery	Reading sentences with high imagery content	Reading sentences with low imagery content
-40.40	-57.28	-12.18	Kircher et al., 2001	Sentence completion	Choose among two the final word	Generate the final word of a sentence
-30.00	-63.00	-6.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a target semantic content	Attend to a speaker voice
-27.00	-60.00	-3.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a target semantic content	Attend to a target speech envelope noise
-40.40	-58.41	12.88	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of pragmatically incoherent sentences
-35.35	-54.74	0.78	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of pragmatically incoherent sentences
-35.35	-71.87	13.59	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of syntactically incoherent sentences
-47.47	-61.73	17.41	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the semantic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-51.00	-66.00	18.00	Maguire and Frith, 2004	Sentence comprehension	Detected a person name in factual sentences	Listening to list of function words and prepositions
-34.34	-60.23	7.53	Stowe et al., 1998	Syntactic processing	Reading syntactic ambiguous sentences > complex sentences > simple sentences > string of words	
-47.47	-70.52	6.99	Zysset et al., 2002	Sentence comprehension	Reading evaluative sentences	Reading factual sentences

Table 41. Coordonnées des pics stéréotaxique dans l'espace MNI faisant partie du cluster T2ML pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-57	-40	2	T2ml	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-60.00	-48.00	-12.00	Baumgaertner et al., 2002	Sentence comprehension	Lexical decision on sentences ending with an expected or unexpected word	Reading sentences ending with a pseudo-word
-63.00	-42.00	0.00	Baumgaertner et al., 2002	Sentence comprehension	Lexical decision on sentences ending with an expected or unexpected word	Reading sentences ending with a pseudo-word
-56.57	-43.82	9.93	Ben Shachar et al., 2004	Syntactic processing	Listening to embedded sentences with syntactic movement	Listening to embedded sentences with no syntactic movement
-56.57	-41.60	6.55	Bottini et al., 1994	Sentence comprehension	Plausibility judgment of metaphors or sentences	Lexical decision on a string of words
-54.55	-38.49	-16.85	Bottini et al., 1994	Sentence comprehension	Plausibility judgment of metaphors or sentences	Lexical decision on a string of words
-60.00	-40.00	2.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Listening to stories	Listening to reversed stories
-58.00	-46.00	4.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Passive listening to stories	Listening to reversed stories
-58.59	-34.67	12.71	Embick et al., 2000	Syntactic processing	Reading sentences with grammatical errors	Reading sentences with orthographic errors in words
-52.53	-46.72	5.73	Gandour et al., 2003	Syntactic processing	Judging the grammatical prosody of Chinese sentences	Passive listening to chinese sentences
-55.56	-48.89	8.02	Gandour et al., 2003	Sentence comprehension	Judging the emotion in chinese sentences	Passive listening to chinese sentences
-52.53	-39.32	2.08	Goel et al., 1998	Text comprehension	Reading syllogisms	Reading texts
-58.00	-40.00	-2.00	Goel et al., 2000	Text comprehension	Reading syllogism with word	Reading syllogism with letters
-63.00	-36.00	-6.00	Homae et al., 2003	Text comprehension	Listening to a dialog and detected a probe phrase	Detected a probe non-word in a dialog with inverted phrases
-51.52	-30.42	10.31	Just et al., 2004	Sentence comprehension	Listening to sentences with high imagery content	Listening to sentences with low imagery content
-53.54	-32.34	7.15	Just et al., 2004	Sentence comprehension	Reading sentences with high imagery content	Reading sentences with low imagery content
-58.59	-43.88	11.02	Kansaku et al., 2000	Text comprehension	Listening to narratives men	Listening to reversed narratives
-60.00	-39.00	-3.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a target semantic content	Attend to a target speech envelope noise
-57.00	-45.00	-3.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a target semantic content	Attend to a speaker voice
-40.40	-33.79	-6.39	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of pragmatically incoherent sentences
-49.49	-45.17	-5.73	Kuperberg et al., 2000	Sentence comprehension	Plausibility judgment of coherent sentences	Plausibility judgment of semantically incoherent sentences
-55.56	-34.77	14.89	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of English sentences	Judging the length of words in English sentences

-44.44	-26.39	-10.39	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of English sentences	Judging the length of words in English sentences
-61.62	-28.87	-0.71	Luke et al., 2002	Sentence comprehension	Judging the semantic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-65.00	-42.00	8.00	Vingerhoets et al., 2003	Text comprehension	Reading a text in non-native language	Reading a text with pseudo-words
-68.00	-46.00	8.00	Waters et al., 2003	Syntactic processing	Reading objects-subjects sentences	Reading subjects-objects sentences

Table 42. Les coordonnées stéréotaxiques des pics dans l'espace MNI faisant partie du cluster POLE pour le traitement de la PHRASE sont données avec les références de l'article, le type de traitement en fonction de la classification (p29) et une description succincte des contrastes.

Coordonnées stéréotaxiques			Auteurs, année	Type de classification	Tâche d'intérêt	Tâche de référence
x	y	z				
-46	6	-24	Pole	Traitement de la phrase	Coordonnées moyennes du cluster	
-54.00	-3.00	-30.00	Baumgaertner et al., 2002	Sentence comprehension	Lexical decision on sentences ending with an expected or unexpected word	Reading sentences ending with a pseudo-word
-34.34	7.45	-29.04	Bottini et al., 1994	Sentence comprehension	Plausibility judgment of metaphors or sentences	Lexical decision on a string of words
-42.00	-16.00	-34.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Giving the number of narrators of stories	Listening to reversed stories
-52.00	8.00	-20.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Giving the number of narrators of stories	Listening to reversed stories
-44.00	20.00	-24.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Giving the number of narrators of stories	Listening to reversed stories
-42.00	-18.00	-36.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Passive listening to stories	Listening to reversed stories
-52.00	8.00	-20.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Passive listening to stories	Listening to reversed stories
-44.00	20.00	-24.00	Crinion et al., 2003	Text comprehension	Passive listening to stories	Listening to reversed stories
-40.40	17.18	-15.30	Fletcher et al., 1995	Text comprehension	Reading stories without theory of mind	Reading unlinked sentences
-54.00	6.00	-27.00	von Kriegstein et al., 2003	Sentence comprehension	Attend to a speaker voice	Attend to a target speech envelope noise
-31.31	2.54	-34.71	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of English sentences	Judging the length of words in English sentences
-57.58	9.11	-19.60	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of English sentences	Judging the length of words in English sentences
-49.49	1.66	-14.40	Luke et al., 2002	Sentence comprehension	Judging the semantic plausibility of English sentences	Judging the length of words in English sentences
-45.45	23.23	-35.91	Luke et al., 2002	Syntactic processing	Judging the syntactic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-51.52	19.25	-15.42	Luke et al., 2002	Sentence comprehension	Judging the semantic plausibility of Chinese sentences	Judging the length of words in Chinese sentences
-54.00	6.00	-16.00	Scott et al., 2000	Sentence comprehension	Listening to intelligible semantic content	Listening to unintelligible semantic content
-40.40	3.11	-24.02	Stowe et al., 1998	Sentence comprehension	Reading sentences	Reading liste of words
-55.00	1.00	-14.00	Vingerhoets et al., 2003	Text comprehension	Reading a text in non-native language	Reading a text with pseudo-words

III. ANNEXE 3 : CORPUS DE PHRASES

1. PHRASES NEUTRES

- J'ai rangé mes vêtements dans le placard.
- J'ai étendu le filet de pêche sur la plage.
- J'ai écouté la radio, étendu sur mon lit.
- J'ai battu les blancs en neige dans un saladier.
- J'ai feuilleté les nouvelles revues qui viennent d'arriver.
- J'ai accroché mon imperméable sur le portemanteau.
- J'ai porté son colis dans une boîte aux lettres.
- J'ai changé mon bracelet de montre.
- J'ai pris mon petit déjeuner dans la cuisine, ce matin.
- J'ai repeint notre chambre hier.
- J'ai emmené les enfants à l'école aujourd'hui.
- J'ai posé la valise sur le porte-bagages.
- Je vais mettre du carrelage dans ma salle de bain.
- Je vais pousser le lit contre le mur de la chambre.
- Je vais coudre des boutons sur ma chemise.
- Cet après midi, j'ai ciré tous les meubles de la maison.
- Avant de partir, j'ai fait une liste de course.
- Pour venir ce matin, j'ai pris l'autoroute.
- Ce matin, au bureau, j'ai classé mes papiers.
- Ce matin, j'ai acheté des chaussures neuves.
- Pour le goûter, j'ai préparé un gâteau au chocolat.
- Tiens, j'ai vu un lapin blanc dans le jardin.
- Au fait, j'ai mis la vaisselle dans la machine.
- Ca y est, j'ai garé la voiture dans le garage.

- Comme d'habitude, j'ai nourri les animaux ce matin.
- Ca y est, j'ai secoué le tapis par la fenêtre.
- Au fait, j'ai installé la machine à laver dans la cuisine.
- Après le travail, je me suis arrêtée chez le boulanger.
- La semaine dernière, j'ai lavé la baignoire.
- C'est dans ce grand magasin que je fais mes courses.
- Tu as vu, j'ai garé la voiture dans le garage.
- Tu as tapé une lettre sur ton ordinateur portable.
- Tu as repeint la barrière du jardin.
- Tu as acheté une armoire ancienne à la brocante.
- Tu as repassé les vêtements dans la chambre.
- Tu as écrit la lettre sur du papier blanc.
- Tu as fait les lits avec des draps propres.
- Tu as remonté l'horloge mécanique du salon.
- Tu vas réparer la fenêtre cassée.
- Quand tu es rentré, tu as allumé la télé.
- Il va ranger le vieux divan dans le grenier.
- Elle joue à la balançoire dans le jardin.
- Ils ont fixé un panneau d'affichage dans la salle d'attente.
- Ils ont rénové la promenade le long des quais.
- Ce matin, il a déposé le journal dans la boîte aux lettres.
- Ma sœur, pour prendre son bain, elle a rempli la baignoire.
- Mon fils, il a rangé ses affaires d'école dans le bureau.
- Papy, il a semé de la salade dans le potager.
- Mon père, il a toujours une carte dans sa voiture.
- Ma sœur, elle a rangé ses chaussettes de sport dans son sac.
- Le concierge, il a ramassé les papiers devant l'immeuble.
- Le coiffeur, il m'a fait un brushing.
- Le facteur, il a distribué le courrier ce matin.
- Le dentiste, il m'a donné rendez-vous demain.
- Le voisin, il va tailler sa haie dans la matinée.
- Mon père, il va installer une échelle pour monter dans la grange.
- Ce moineau, il va faire son nid dans le noisetier.
- La table de la cuisine, elle est recouverte d'une toile cirée.
- Le balai-brosse, il est accroché dans le placard.

- Le cendrier, il est posé sur la table du salon.
- Quand il est rentré, le repas était prêt.
- Quand il est parti, la lumière était éteinte.
- Maman, elle a fait ses courses dans le supermarché du quartier.
- Ma mère, elle s'est servie d'un couteau pour éplucher les carottes.
- Ma grand-mère, elle m'a tricoté un pull.
- Les couvertures, elles sont toutes dans le placard.
- Les ouvriers, ils sont sur le chantier.
- Les moutons, ils sont couchés dans la bergerie.
- Mes rendez-vous, ils sont notés dans mon agenda.
- Le cheval court dans la prairie.
- Le cerisier fleurit au printemps.
- La carafe est remplie de jus d'orange.
- Le fil pour étendre le linge est derrière la maison.
- Le grenier est rempli de cartons vides.
- Mon bureau est situé dans ce bâtiment.
- Mon carnet de croquis est rempli de dessins.
- Les escaliers ont été nettoyés avec un produit spécial.
- Les caddies sont tous rangés au même endroit sur le parking.
- Le bus m'a déposé devant la gare.
- Le bateau de pêche file sur la rivière calme.

2. PHRASES EMOTIONNELLES

A. Gaïeté, joie :

- J'ai été reçu premier au concours, quelle réussite.
- J'ai pris un grand plaisir à admirer les tableaux du musée.
- Je suis tombée en extase devant ce tableau.
- J'ai la chance d'avoir des enfants merveilleux.
- Je suis heureux à l'idée de m'installer avec toi.
- Je suis content de venir manger avec toi.
- Je prépare une superbe surprise pour mon amie.
- Je vais réaliser mon rêve : partir en vacances dans les îles.

- Super, j'ai gagné beaucoup d'argent au loto.
- Avec mes amies, j'ai vécu des moments inoubliables.
- Génial, j'ai trouvé exactement la commode que je cherchais.
- Moi, j'ai eu tous mes partiels en juin.
- Youpi, ce soir je sors avec ma chère et tendre.
- Demain, je vais me marier à Venise, le rêve.
- A ma grande joie, je vais prendre un verre avec un ami d'enfance.
- Tu as remarqué avec quel amour il regarde ses enfants.
- Tu as trouvé la maison de mes rêves à la campagne, merci beaucoup.
- Tu vas marcher avec plaisir dans la lande.
- Ce roman, tu l'as dévoré avec passion.
- Ce que tu vends, c'est un bouquet de bonheur.
- Il a passé une super soirée avec ses amis.
- Il a explosé de joie en annonçant la naissance de sa fille.
- Il a reçu tous les cadeaux qu'il souhaitait pour sa fête.
- Il a appelé sa mère pour lui annoncer la bonne nouvelle.
- Il a été heureux d'offrir des cadeaux à son fils.
- Il a sauté au plafond en apprenant la nouvelle de ta nomination.
- Génial, il a insisté pour que je sois l'invité d'honneur.
- Mon meilleur ami, il a remporté la médaille d'or au 100m.
- Son retour, il l'a appris avec enthousiasme.
- Heureux, il a assisté au mariage de sa fille.
- Le copain de ma fille, il est génial.
- Je suis heureux pour eux, ils s'aiment d'un amour rayonnant.
- Nos vacances, elles sont vraiment formidables.
- Mes enfants, ils m'ont fait un super cadeau dimanche.
- C'est chouette, ils t'ont augmenté avec ce nouveau travail.
- La nouvelle de ton retour m'a comblé de joie.
- Avec excitation, mon frère a attendu son goûter d'anniversaire.
- Quel bonheur, ma fille a trouvé son prince charmant.
- Mon bonheur, c'est de boire un verre de bon vin.
- Ça a été super, mes vacances avec mon amie.

B. Tristesse :

- J'ai senti les larmes couler sur mon visage.
- J'ai finalement compris que je ne la reverrais plus.
- J'ai pleuré à l'idée de quitter mes enfants chéris.
- J'ai compté le peu de jours qu'il nous reste à vivre ensemble.
- J'ai fini par perdre tous mes amis à cause de cette guerre.
- J'ai oublié son beau visage avec les années.
- J'ai été complètement perdu après notre rupture.
- J'ai appris une très mauvaise nouvelle, ce matin.
- Je ne comprends pas pourquoi mon meilleur ami est parti sans un au revoir.
- Je vais devoir vendre la maison familiale que j'aime tant.
- Pendant des années, je me suis fait des illusions sur lui.
- Impuissant, j'ai assisté à l'agonie de mon père.
- Récemment, j'ai perdu ma mère d'un cancer.
- Pour la troisième fois, j'ai échoué au CAPES.
- Contre ma volonté, je vais devoir m'éloigner de ma famille.
- Tu vas laisser tous tes meilleurs souvenirs ici, si tu t'en vas.
- Tu n'as gardé qu'une unique lettre d'amour en souvenir d'elle.
- Tu te sens abandonné, quand tu es alcoolique.
- Malgré tous tes efforts, tu as échoué dans ton parcours professionnel.
- Depuis que ton mari est en prison, tu es complètement anéantie.
- Il a apporté un bouquet de fleurs sur la tombe de sa fille.
- Il a ruiné toute sa famille qu'il aimait tant, par pure négligence.
- Il a perdu tous ceux qu'il aimait dans ce terrible accident.
- On a vainement tout essayé pour son cancer.
- Elle me manque, ma famille, depuis que je suis ici.
- A la campagne, il a vécu une enfance pauvre et solitaire.
- Même pour le réveillon, il restera tout seul.
- Après sa chute, il est resté très handicapé.
- Pauvre gosse, il ne sait même pas lire.
- Il y a deux mois, il a été licencié, quel malheur.
- Depuis son accident, il ne voit plus personne.
- Quand j'ai eu le plus besoin d'elle, elle n'est même pas venue.
- Ma mère, elle est épuisée par sa chimiothérapie.

- Les fins de mois, elles sont dures, dures.
- Ce matin, on lui a annoncé la grave maladie de sa fille.
- Sa famille l'a abandonné, au cours de sa petite enfance.
- Depuis sa maladie, la plupart de ses plus proches amis s'éloignent de lui.
- Pour une bêtise, ma meilleure amie m'a quittée.
- Ma vie, c'est un véritable enfer !
- Ca a été affreux le départ de ma famille.

C. Colère :

- J'ai du mal à me contrôler devant cette nullité.
- J'ai encore retrouvé ma voiture neuve toute rayée, c'est inadmissible.
- J'ai travaillé comme un forcené sur un projet qui ne sera même pas réalisé.
- J'ai attendu pendant une heure dans le froid, c'est une honte.
- Je ne peux plus les supporter ces loubards.
- J'enrage de mettre fait avoir par ce charlatan.
- Je ne décolère pas d'avoir dû payer pour ces imbéciles.
- Je ne suis pas du tout d'accord avec ta décision.
- Je suis contre ce renvoi vraiment injustifié.
- Je lui ferais la peau à cet imbécile.
- Je le coincerais un jour celui qui a saccagé ma maison.
- Attends un peu que j'ai retrouvé ces voleurs, ça va être leur fête.
- Une heure de queue devant la poste, comme si j'avais du temps à perdre.
- Il y en avait marre de traîner ce boulet, je l'ai viré !
- Je suis furieux, j'ai encore eu une prune aujourd'hui.
- Tu as exagéré, me punir pour cette broutille.
- Tu te rends compte, il n'y a eu qu'un seul guichet d'ouvert aujourd'hui.
- Tu arrêtes de faire de l'œil à ma copine, abruti.
- Ca tu me le paieras de m'avoir giflé devant tout le monde.
- Espèce de peste, tu as encore fouillé dans ma chambre.
- Il n'a pas arrêté de se plaindre de toute la journée, ça commence à bien faire.
- Ils m'ont jeté comme un malpropre dans la rue, ils vont le regretter.
- Ils auraient pu nous prévenir de leur retard, ils vont m'entendre.
- Regardes, il s'est encore garé devant la porte de notre garage.
- Ce goinfre, il a avalé mes gâteaux préférés.

- Le prof, il m'a encore saqué à l'examen.
- Le salaud, il a vendu des drogues dures à mes enfants.
- Non seulement il m'a fait une queue de poisson, mais, en plus, il m'a klaxonné.
- Pendant tout le séjour, il a été infect avec moi.
- Par pur plaisir, il m'a insulté et humilié devant mes chefs.
- Pendant la guerre, il a torturé des civils innocents.
- Ces voyous, ils m'ont craché dessus en passant.
- Ces salauds, ils ont cambriolé la petite dame d'à côté.
- Ces salauds, ils m'ont grugé une fois de plus.
- Ta décision, elle m'a révolté au plus haut point.
- Ces nanas qui nous ont doublés dans la queue, je n'en décolère pas.
- Une heure arrêté en pleine campagne sans aucune explication, c'est intolérable !
- Ca suffit ces fermetures intempestives de la banque.
- Ces crottes dans la rue, c'est infect.
- C'est encore une grève des transports en commun, quelle bande de feignants.

3. PHRASES ATTITUDINALES

A. Doute :

- J'ai vraiment ramassé ce papier dans la rue ?
- J'ai skié avec des chaussons de danse ?
- J'ai écrit une lettre de menace à mon patron ?
- J'ai demandé mon chemin à un aveugle ?
- J'ai roulé sans phare en pleine nuit ?
- J'ai mangé du rhinocéros cru, moi ?
- J'ai claqué la porte au nez de mon chef, moi ?
- Moi, j'ai teint mes cheveux en vert-pomme ?
- Moi, je n't'ai pas aidé quand tu en avais besoin ?
- Moi, j'ai vu un pingouin danser ?
- Moi, je t'ai raconté une chose pareille ?
- Moi, je t'ai insulté pendant la fête ?
- Moi, j'ai suivi les conseils de ce charlatan ?
- Moi, j'ai donné un coup de pied dans sa voiture neuve ?

- Moi, je me suis baigné dans l'étang glacé?
- En partant, j'ai oublié de fermer la porte, moi ?
- Tu es sûre que c'est moi qui ais vendu cette boite à musique ?
- Tu es sûr que j'ai oublié de te prévenir pour la fête ?
- Tu crois vraiment que c'est lui qui a fait ça ?
- Tu connais des bonnes sœurs mariées, toi?
- C'est toi qui vas acheter cet horrible collier ?
- Il a vraiment entendu des fantômes dans la maison ?
- Il a vu des cocotiers dans le désert ?
- Il garde réellement sa perruque pour dormir ?
- Il escalade cet immeuble sans s'assurer avec une corde ?
- Lui, il a entendu un chien parler?
- Vraiment, il cache un trésor sous son lit ?
- Tout l'hiver, il a porté un simple T-shirt ?
- Tout l'été, il a gardé son anorak ?
- En pleine canicule, il n'a pas bu une seule goutte d'eau ?
- Pour s'envoler, il va utiliser des ailes en papier?
- Pour le dîner, il va préparer des gros insectes ?
- Cet été, il va neiger à la campagne ?
- C'est bizarre, il a enfilé un smoking neuf pour aller courir ?
- Le chat est vraiment passé dans la machine à laver ?
- C'est étrange, un tigre s'est réellement baladé dans son jardin?
- Cette casserole, elle a chanté à l'opéra de Paris ?
- Ca aboie une souris ?
- Ca existe les éléphants roses ?
- N'importe qui peut marcher sur des braises ?

B. Evidence :

- J'ai attendu le feu vert avant de démarrer le jour de mon permis.
- J'ai laissé les places réservées à une vieille dame et suis allé m'asseoir plus loin.
- J'ai tourné la clé pour mettre le contact.
- J'ai rangé les allumettes à leur place, tu me connais maniaque comme je suis.
- Je vais prendre mon parapluie avec ce sale temps.
- Je vais bien cacher le chocolat avec les goinfres qui vont arriver.

- Avant de prendre l'avion, j'ai acheté les billets.
- Avant d'allumer la cafetière, je l'ai remplie avec de l'eau.
- Pour conduire, j'ai bien entendu passé mon code.
- Avant de bricoler la prise, j'ai coupé l'électricité.
- En sortant, j'ai vérifié que le gaz était fermé.
- En partant, j'ai pensé à fermer la porte à clé, avec tous ces cambriolages.
- Pour faire de la moto, j'ai mis un casque, avec tous ces chauffards.
- Pour monter dans le train, j'ai composté mon billet.
- Avant de devenir pompier, j'ai dû passer un examen médical.
- Tu as trouvé tes papiers là où ils sont rangés d'habitude.
- Tu as fait cuire les pâtes dans l'eau salée.
- Tu as payé tes impôts avant la date limite.
- Tu dois valider ton ticket dans le composteur.
- Il doit bien obéir au règlement intérieur de l'école.
- Tu vas mettre ton mégot de cigarette dans le cendrier que j'ai apporté.
- Il est pressé de finir ses devoirs pour pouvoir aller jouer.
- Elle a toujours été à l'écoute de ses enfants.
- On roule sans casque, en voiture.
- On paie ses impôts quand on est un bon citoyen.
- Avec ce vent glacial, il a mis un manteau pour sortir.
- Avant de partir, il a réservé l'hôtel.
- Avant de manger, il a essuyé la table.
- Quand il a eu son angine de poitrine, il a arrêté de fumer.
- Pour gagner de l'argent, il a beaucoup travaillé.
- Juste après l'accident, il a appelé les secours.
- Comme d'habitude, il n'a pas rangé sa chambre.
- Par prudence, il va suivre les conseils avisés du médecin.
- Pour entrer dans la centrale, il faut présenter un laissez-passer.
- Avec ses blessures, les médecins nous ont pris en urgence.
- Ça n'peut pas s' marier, un curé.
- Ça miaule, un chat.
- Ça ne pilote pas d'avion un enfant !
- Ça marche à quatre pattes un quadrupède.
- Un oiseau, ça vole !

C. Ironie :

- J'ai dévalé l'escalier sur les fesses avec élégance.
- J'ai adoré la douceur de ce livre d'horreur.
- J'ai immédiatement jeté ce délicieux gâteau à la poubelle.
- J'ai rangé son magnifique cadeau dans la cave.
- J'ai reçu mon meilleur ennemi avec un plaisir consommé.
- J'ai sauté le portail avec une souplesse digne d'un éléphant.
- J'ai parfaitement réussi cette soupe immangeable.
- J'ai réussi ma chute en pleine rue, brillamment.
- J'ai impressionné les BCBG avec cette tenue toute défraîchie.
- J'ai vraiment l'air intelligent avec mon bonnet sur les yeux.
- Moi, j'ai bonne mine avec ce ruban dans les cheveux.
- Avec ce fusil à eau, j'ai l'air vraiment effrayant.
- C'est très approprié, mes lunettes de soleil avec tous ces nuages.
- C'est bien joué d'avoir pris mon parapluie avec ce soleil radieux.
- Ca fait très distingué ma voiture toute rouillée pour aller aux Oscars.
- Super propre ce jean que tu as porté pendant 3 mois.
- T'as l'air malin avec tes bigoudis sur la tête.
- Bravo, tu as bien nettoyé la voiture en roulant dans la boue.
- Pour nous perdre dans cette forêt, tu fais un merveilleux guide.
- Trop fort, tu n'as évité aucune flaque de boue avec ton vélo.
- Il a enfin découvert le papier à lettre pour m'écrire.
- Il a peint ce paysage avec un véritable sens artistique, pour le mauvais goût.
- Il a filmé avec génie son doigt devant l'objectif.
- Il est magnifique ton pantalon, on dirait un sac poubelle.
- Il est ridicule et prétentieux son magnifique discours.
- S'il a réussi dans la vie, c'est sûrement grâce à ses mauvaises notes.
- Pour salir le canapé, il a été d'une grande aide.
- Ce feignant, il a travaillé avec zèle.
- Ton fils, il a l'air fin avec son kilt écossais.
- Pour mettre la pagaille, il a été drôlement efficace.
- Hum, il a l'air succulent ce soufflet tout raplapla.
- Mon père, il sera mignon avec son gros nez de clown.
- Dans l'eau verdâtre, ils ont l'air en pleine forme ces poissons.

- Avec sa barbe décollée, il sera très convaincant en père Noël.
- Appétissant ce plat, on dirait de l'herbe à lapin.
- Ce village m'a paru très accueillant avec toutes ces rues désertes.
- Ton sublime autoportrait ressemble à s'y méprendre à un singe.
- Ce poisson est frais depuis au moins deux semaines.
- Ce sera certainement un dragueur de première ce boutonneux.
- Wouah, ce château hanté m'a semblé très accueillant.

IV. ANNEXE 4 : POST-TESTS DE L'ÉTUDE PSYCHOLINGUISTIQUE

1. POST-TESTS DES DONNEES COMPORTEMENTALES ACQUISES AU COURS DE L'ÉTUDE PSYCHOLINGUISTIQUE (CHAPITRE 2, PARAGRAPHE II)

	Diff. moy.	Diff. crit.	Valeur p
C, G	-17,491	43,129	,4217
C, T	-41,427	43,129	,0595
C, E	-48,795	43,129	,0271
C, D	-96,074	43,129	<,0001
C, I	9,204	43,129	,6720
G, T	-23,935	43,129	,2725
G, E	-31,304	43,129	,1524
G, D	-78,583	43,129	,0005
G, I	26,696	43,129	,2214
T, E	-7,369	43,129	,7345
T, D	-54,648	43,129	,0137
T, I	50,631	43,129	,0220
E, D	-47,279	43,129	,0321
E, I	57,999	43,129	,0091
D, I	105,279	43,129	<,0001

Figure 64. Post-tests sur l'effet catégorie, sur les temps de réponses de l'étude psycholinguistique, sur l'effet de la catégorie affective.

Un test PLSD de Fisher (Protected Least Significant Difference) a été calculé sur les temps de réponses correctes de l'étude psycholinguistique 3 (N = 16 sujets) pour les différentes catégories quelque soit le locuteur et l'ordre de passation : phrases de colère (C), de gaieté (G), de tristesse (T), neutre (N), d'évidence (E), de doute (D), d'ironie (I). Ce tableau donne la différence moyenne, différence critique et valeur de p de la loi de Fisher.

2. POST-TESTS DES DONNEES COMPORTEMENTALES ACQUISES DANS L'ETUDE FONCTIONNELLE SUR LE DISCOURS AFFECTIF (CHAPITRE 2, PARAGRAPHE III)

	Ecart moyen	t _{tc}	P
CA, GA	-1,900	-2,433	,0250
CA, TA	-1,850	-2,169	,0430
CA, EA	-1,250	-1,318	,2031
CA, DA	1,650	2,000	,0600
CA, IA	-,650	-,728	,4752
CA, CK	1,050	1,831	,0828
CA, GK	-,500	-,588	,5636
CA, TK	,800	,881	,3892
CA, EK	,400	,415	,6827
CA, DK	5,200	4,720	<,0001
CA, IK	2,700	2,568	,0188
GA, TA	,050	,165	,8708
GA, EA	,650	1,628	,1199
GA, DA	3,550	3,863	,0010
GA, IA	1,250	3,865	,0010
GA, CK	2,950	4,077	,0006
GA, GK	1,400	2,483	,0225
GA, TK	2,700	5,156	<,0001
GA, EK	2,300	5,006	<,0001
GA, DK	7,100	7,421	<,0001
GA, IK	4,600	7,781	<,0001
TA, EA	,600	1,747	,0967
TA, DA	3,500	4,114	,0006
TA, IA	1,200	3,479	,0025
TA, CK	2,900	3,746	,0014
TA, GK	1,350	2,797	,0115
TA, TK	2,650	6,430	<,0001
TA, EK	2,250	4,530	,0002
TA, DK	7,050	8,443	<,0001
TA, IK	4,550	7,579	<,0001

	Ecart moyen	t _{tc}	P
EA, DA	2,900	3,265	,0041
EA, IA	,600	1,301	,2088
EA, CK	2,300	2,881	,0096
EA, GK	,750	1,246	,2280
EA, TK	2,050	3,760	,0013
EA, EK	1,650	3,273	,0040
EA, DK	6,450	7,346	<,0001
EA, IK	3,950	5,756	<,0001
DA, IA	-2,300	-2,369	,0286
DA, CK	-,600	-,860	,4003
DA, GK	-2,150	-2,737	,0131
DA, TK	-,850	-1,011	,3247
DA, EK	-1,250	-1,250	,2263
DA, DK	3,550	4,220	,0005
DA, IK	1,050	1,015	,3230
IA, CK	1,700	2,121	,0473
IA, GK	,150	,289	,7759
IA, TK	1,450	3,103	,0058
IA, EK	1,050	1,749	,0964
IA, DK	5,850	5,989	<,0001
IA, IK	3,350	5,432	<,0001

	Ecart moyen	t _{tc}	P
CK, GK	-1,550	-2,006	,0593
CK, TK	-,250	-,307	,7621
CK, EK	-,650	-,736	,4708
CK, DK	4,150	4,284	<,0001
CK, IK	1,650	1,893	,0736
GK, TK	1,300	2,436	,0249
GK, EK	,900	1,363	,1890
GK, DK	5,700	6,456	<,0001
GK, IK	3,200	3,905	,0010
TK, EK	-,400	-,639	,5303
TK, DK	4,400	4,804	<,0001
TK, IK	1,900	3,671	,0016
EK, DK	4,800	5,126	<,0001
EK, IK	2,300	3,397	,0030
DK, IK	-2,500	-2,907	,0090

Figure 65. Post-tests sur l'effet catégorie et l'effet Voix sur le pourcentage de réponses correctes de l'étude d'imagerie fonctionnelle.

Des tests de t appariés ont été réalisés sur les réponses correctes (/15) de l'étude d'imagerie fonctionnelle (N = 20 sujets) dans les différentes conditions : phrases de colère (C), de gaieté (G), de tristesse (T), neutre (N), d'évidence (E), de doute (D), d'ironie (I) énoncées par les acteurs (A) ou produites par Kali (K). Ces comparaisons sont au nombre de 91, ce qui revient selon Bonferroni à corriger le seuil statistique de significativité à 0,0005 ($p = 0,05/91$). En rouge et en gras sont représentées les comparaisons significatives à ce seuil. Par ailleurs, ce tableau donne l'écart moyen entre les valeurs à comparer, la valeur de t et de p.

	Ecart moyen	t ₁₆	P		Ecart moyen	t ₁₆	P		Ecart moyen	t ₁₆	P
CA, GA	-148,957	-3,703	,0021	NA, EA	-78,594	-,414	,6846	CK, GK	-54,794	-,448	,6605
CA, TA	-74,406	-1,836	,0863	NA, DA	302,776	2,182	,0454	CK, TK	-80,577	-,504	,6214
CA, NA	-519,921	-3,731	,0020	NA, IA	482,974	3,247	,0054	CK, NK	-878,575	-3,192	,0061
CA, EA	-598,516	-5,003	,0002	NA, CK	265,078	1,705	,1087	CK, EK	-581,614	-3,809	,0017
CA, DA	-217,145	-3,269	,0052	NA, GK	210,284	1,292	,2159	CK, DK	-813,228	-3,461	,0035
CA, IA	-36,947	-,526	,6069	NA, TK	184,501	1,096	,2902	CK, IK	-229,297	-1,023	,3224
CA, CK	-254,843	-2,075	,0556	NA, NK	-613,497	-2,221	,0422	GK, TK	-25,783	-,261	,7974
CA, GK	-309,637	-2,282	,0375	NA, EK	-316,536	-1,805	,0912	GK, NK	-823,781	-3,354	,0043
CA, TK	-335,420	-2,841	,0124	NA, DK	-548,150	-2,039	,0595	GK, EK	-526,820	-4,336	,0006
CA, NK	-1133,418	-3,293	,0049	NA, IK	35,781	,161	,8740	GK, DK	-758,434	-3,752	,0019
CA, EK	-836,457	-5,000	,0002	EA, DA	381,371	3,912	,0014	GK, IK	-174,503	-,967	,3488
CA, DK	-1068,071	-4,814	,0002	EA, IA	561,569	5,577	<,0001	TK, NK	-797,998	-2,599	,0201
CA, IK	-484,140	-2,882	,0114	EA, CK	343,673	1,778	,0957	TK, EK	-501,037	-3,301	,0048
GA, TA	74,551	1,854	,0826	EA, GK	288,879	1,939	,0715	TK, DK	-732,651	-4,515	,0004
GA, NA	-370,964	-2,713	,0160	EA, TK	263,096	2,405	,0295	TK, IK	-148,720	-1,400	,1819
GA, EA	-449,559	-3,609	,0026	EA, NK	-534,902	-1,523	,1487	NK, EK	296,960	1,278	,2208
GA, DA	-68,188	-1,209	,2454	EA, EK	-237,942	-1,193	,2513	NK, DK	65,346	,185	,8555
GA, IA	112,010	1,549	,1421	EA, DK	-469,556	-2,139	,0493	NK, IK	649,278	1,851	,0840
GA, CK	-105,886	-,916	,3742	EA, IK	114,376	,747	,4668	EK, DK	-231,614	-1,152	,2672
GA, GK	-160,680	-1,324	,2052	DA, IA	180,198	3,124	,0070	EK, IK	352,318	1,929	,0729
GA, TK	-186,463	-1,583	,1342	DA, CK	-37,698	-,278	,7847	DK, IK	583,932	3,001	,0090
GA, NK	-984,461	-2,932	,0103	DA, GK	-92,492	-,767	,4548				
GA, EK	-687,500	-4,073	,0010	DA, TK	-118,275	-1,161	,2636				
GA, DK	-919,114	-4,008	,0011	DA, NK	-916,273	-2,747	,0150				
GA, IK	-335,183	-1,910	,0754	DA, EK	-619,312	-3,558	,0029				
TA, NA	-445,515	-3,614	,0026	DA, DK	-850,926	-3,877	,0015				
TA, EA	-524,110	-4,466	,0005	DA, IK	-266,995	-1,589	,1329				
TA, DA	-142,739	-2,744	,0151	IA, CK	-217,896	-1,373	,1900				
TA, IA	37,459	,720	,4825	IA, GK	-272,690	-1,977	,0667				
TA, CK	-180,437	-1,387	,1858	IA, TK	-298,473	-3,263	,0052				
TA, GK	-235,231	-1,772	,0967	IA, NK	-1096,471	-3,151	,0066				
TA, TK	-261,014	-2,354	,0327	IA, EK	-799,510	-4,765	,0003				
TA, NK	-1059,012	-3,145	,0067	IA, DK	-1031,124	-5,123	,0001				
TA, EK	-762,051	-4,445	,0005	IA, IK	-447,193	-3,490	,0033				
TA, DK	-993,665	-4,429	,0005								
TA, IK	-409,734	-2,527	,0232								

Figure 66. Post-tests sur l'effet catégorie et l'effet Voix sur les temps de réponses de l'étude d'imagerie fonctionnelle.

Des tests de t appariés ont été réalisés sur les temps de réponses correctes de l'étude d'imagerie fonctionnelle (N = 20 sujets) dans les différentes conditions : phrases de colère (C), de gaieté (G), de tristesse (T), neutre (N), d'évidence (E), de doute (D), d'ironie (I) énoncées par les acteurs (A) ou produites par Kali (K). Ces comparaisons sont au nombre de 91, ce qui revient selon Bonferroni à corriger le seuil statistique de significativité à 0,0005 ($p = 0,05/91$). En rouge et en gras sont représentées les comparaisons significatives à ce seuil. Par ailleurs, ce tableau donne l'écart moyen entre les valeurs à comparer, la valeur de t et de p.

V. ANNEXE 5 : LISTE DES ABBREVIATIONS

- a : antérieur
- AAL : Automated Anatomical Labelling (Tzourio-Mazoyer *et al.*, 2002)
- Acteur 1 ou 2 : première ou deuxième session de classification de phrases énoncées par les acteurs
- AffAct : tâche de classification AFFECTive opérée sur des phrases au contenu lexical affectif énoncées par les ACTeurs
- AffKali : tâche de classification AFFECTive opérée sur des phrases au contenu lexical affectif produites par KALI
- AG: gyrus angulaire
- ANOVA (ANalysis Of VARIance) : analyse de variance
- BOLD : Blood Oxygen Level Dependent
- C : colère
- CCPPRB : Comité Consultatif pour la Protection des Personnes dans la Recherche Biomédicale
- d : dorsal
- D : doute
- DP : densité de protons
- DS : Déviation Standard
- E : évidence
- ED : Distance Euclidienne
- ES : Erreur Standard à la moyenne
- MF1 : partie médiane du gyrus frontal supérieur
- F0 : fréquence fondamentale
- F2 : gyrus frontal moyen
- F3 : gyrus frontal inférieur (F3t/F3op/F3O: partie triangulaire/operculaire/orbitaire de F3)
- Fusa: gyrus fusiforme antérieur

- G : gaieté
- GrAct : tâche de classification GRammaticale opérée sur des phrases au contenu lexical neutre affectivement énoncées par les ACTeurs
- GrKali : tâche de classification GRammaticale opérée sur des phrases au contenu lexical neutre affectivement produites par KALI
- hrf : réponse hémodynamique
- Hz : hertz
- I : ironie
- IA : Index d'Asymétrie
- IRM : Imagerie par Résonance Magnétique (IRMa / IRMf : IRM anatomique / fonctionnelle)
- Kali 1 ou 2 : première ou deuxième session de classification de phrases produites par Kali
- l : latéral
- MNI : Montreal Neurological Institute
- M : moyen
- p : postérieur
- PrF3op: jonction gyrus précentral /F3op
- PT : *Planum Temporale*
- Prec: gyrus précentral
- RC : nombre de Réponses Correctes
- RolS : sillon de Rolando
- RolOp : Opercule Rolandique
- SMG: gyrus supramarginal
- SPM (Statistical Parametric Mapping) : logiciel d'analyse d'images
- STS: sillon temporal supérieur
- T : tristesse
- T1, T2, et T3: gyrus temporal supérieur, moyen, et inférieur, respectivement
- TEP : Tomographie par Emission de Positons
- TR : Temps de réponses pour les réponses correctes
- v : ventral
- VLSM : Voxel-based Lesion-Symptom Mapping: cartographie des lésions cérébrales en fonction des symptômes associés.

VI. ANNEXE 6 : GLOSSAIRE

- **Agenesis** : malformation du corps calleux
- **Amusie** : trouble de la perception ou de la production musicale.
- **Callosotomie** : résection des fibres du corps calleux.
- **Champ lexical** : groupement de termes exprimant une même idée.
- **Distance Euclidienne** : elle est calculée à partir de la différence dans chaque incidence (x, y, z) des coordonnées du pic A avec celles du pic B, différence élevée ensuite au carré. La somme de ces trois différences au carré a été effectuée. La distance euclidienne entre les deux pics est la racine carrée de cette somme :

$$ED_{A-B} = \sqrt{[(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2]}$$

- **Dominance ou spécialisation hémisphérique** : elle est définie lorsque après une atteinte d'un hémisphère, un déficit important apparaît pour une fonction cognitive donnée, alors qu'une lésion équivalente de l'autre hémisphère ne provoque pas de trouble de cette fonction.
- **Ecoute dichotique** : présentation de stimuli différents à chaque oreille.
- **Fonction expressive ou attitudinale de la prosodie** : elle reflète l'intention du locuteur. C'est ce que l'on désigne par le terme **prosodie émotionnelle** en neurosciences.
- **Fonction impressive ou identificatrice de la prosodie** : elle permet à l'auditeur de se rendre compte de l'état émotionnel de son interlocuteur. C'est ce que l'on désigne sous le terme de **prosodie attitudinale** en neurosciences.
- **Fonctions ortholinguistiques** : elles sont associées à 5 composantes : la composante *phonétique* concerne les sons du langage ; la *composante phonologique* représente l'organisation de ses sons au sein du message ; la *composante morphologique* correspond à la combinaison des morphèmes (plus petites unités de sons porteuses de sens) pour former des éléments du lexique (ensemble des mots) ; la *composante syntaxique* représente le niveau d'organisation des morphèmes pour former les énoncés ; et enfin la *composante sémantique* concerne les signifiés (ou concept) du

message. On parle de *composante lexicale* en ce qui concerne les mots et de *composante sémantique* dans le cas d'accès aux sens d'un matériel verbal et non-verbal (des mots et des objets).

- **Fonctions pragmatiques** (ou paralinguistiques) : éléments qui accompagnent le discours et permettent de l'étoffer et de compléter le message contenu dans les éléments ortholinguistiques. Ce sont les expressions faciales, les gestes, le contexte énonciatif (thème, sujet de la conversation, humour), les inférences et la prosodie affective (intonation émotionnelle de la voix).
- **Fréquence fondamentale** : estimation du son laryngien à partir du signal acoustique à un instant donné. Elle représente le contour intonatif d'un énoncé.
- **Gating** : expérience qui permet d'enregistrer les réponses des sujets au cours de la présentation d'un stimuli.
- **Linguistique** : étude des fonctions du langage.
- **Neuroimagerie** : cartographie des fonctions cognitives chez l'homme.
- **Neurolinguistique** : études des représentations neurales du langage.
- **Neuropsychologie** : études des patients cérébrolésés et de leurs troubles cognitifs associés.
- **Schémes** : Structure d'une conduite opératoire
- **SPM** : logiciel utilisé entre autre pour le traitement des images anatomiques et fonctionnelles et l'analyse statistique des données fonctionnelles.
- **SuperLabtm Pro** : logiciel qui permet la présentation des stimuli au cours d'une expérience, et l'enregistrement des réponses et temps de réponses des sujets.
- **Supramodal** : qualifie une région corticale qui traite des informations quelque soit leur modalité (visuelle, auditive...).
- **Test de Kolmogorov et Smirnov** : test statistique qui permet de vérifier si la distribution d'une variable diffère d'une distribution normale. Ce test oriente donc le choix des tests statistiques à effectuer sur ces variables : des tests paramétriques si les données suivent la distribution normale ; tests non paramétriques dans le cas contraire.
- **Test t de Student** : test statistique qui permet la comparaison d'une moyenne observée à une moyenne théorique (test univarié), ou la comparaison de deux moyennes observées (test apparié).
- **Test de Wada** : Test qui permet de déterminer la spécialisation hémisphérique d'une fonction cognitive donnée. Il consiste à anesthésier, par l'injection dans une carotide d'amobarbital de sodium, un hémisphère. Ce narcoleptique injecté dans la carotide, au niveau du cou, va suivre la circulation sanguine jusqu'au système

d'irrigation de l'hémisphère cérébral ipsilatéral à l'injection, et induire « l'endormissement » de cet hémisphère, arrêtant l'activité cognitive qu'il contrôle.

- **Théorie sur la latéralisation des traitements acoustiques ou cued-lateralized theory (CLT)** : théorie développée par Robert Zatorre qui postule que le traitement des informations spectrales est opéré par les régions corticales auditives droites tandis que le traitement des informations est traité de manière optimale par les régions gauches (Zatorre et Belin, 2001; Zatorre *et al.*, 2002; Tervaniemi et Hugdahl, 2003).
- **Valence émotionnelle** : elle définit si un élément est positif, neutre ou négatif émotionnellement.

VII. ANNEXE 7 : TABLE DES FIGURES

Figure 1. Modèle standard des niveaux et des éléments traités par le cerveau au cours de la communication humaine (adapté de Van Lancker Sidtis, 2006).	6
Figure 2. Représentation tridimensionnelle des paramètres prosodiques d'une phrase	11
Figure 3. Les différents types d'aprosodie en fonction des sites de lésion corticale (extrait de Ross, 1981).	17
Figure 4. Autres sites de lésions qui ont donné lieu à une aprosodie de compréhension (extrait de Ross <i>et al.</i> , 1997).	20
Figure 5. Régions fronto-temporales impliquées au cours de la classification émotionnelle des phrases à contenu lexical neutre énoncées avec une prosodie émotionnelle (repris de Wildgruber <i>et al.</i> , 2002).	21
Figure 6. Atlas anatomique de la méta-analyse.	38
Figure 7. Illustration des différences morphologiques observées entre les 2 espaces stéréotaxiques de référence Talairach (à gauche) et MNI (à droite).	40
Figure 8. Exemple d'arbre hiérarchique obtenu suite à la procédure de ségrégation spatiale.	42
Figure 9. Vue d'ensemble des pics inclus dans la méta-analyse.	44
Figure 10. Vue d'ensemble des clusters issus de la ségrégation spatiale.	45
Figure 11. Les clusters impliqués dans le traitement phonologique.	47
Figure 12. Les clusters impliqués au cours du traitement sémantique	48
Figure 13. Les clusters impliqués dans le traitement syntactico-sémantique de la phrase et du texte	49
Figure 14. La boucle phonologique de coordination audio-motrice	57
Figure 15. Voie temporelle postérieure d'intégration du matériel verbal le long du gyrus temporal supérieur.	62
Figure 16. Voie antérieure d'intégration du matériel verbal le long du gyrus temporal supérieur.	67

Figure 17. Les clusters F3opd impliqués dans le traitement sémantique et de la phrase.	69
Figure 18. Intégration syntactico-sémantique dans les régions frontales.	72
Figure 19. Réseaux phonologiques et d'intégration syntactico-sémantique au cours de la compréhension du discours oral.	73
Figure 20. Ordre de passation des tâches de classification affective pour les deux groupes de sujets.	88
Figure 21. L'effet Genre sur les réponses correctes (sur 45, A) et les temps de réponses correctes (TR, ms, B) lors de la classification grammaticale.	91
Figure 22. L'effet Genre sur les réponses correctes (/45, A) et les temps de réponses correctes (TR, ms, B) lors de la classification affective.	92
Figure 23. Effet Voix sur les réponses correctes (/45, A) et les temps de réponses correctes (TR, ms, B) lors de la classification grammaticale.	93
Figure 24. Nombre moyen de réponses correctes (/15 ± ES) en fonction de l'ordre de passation.	94
Figure 25. Temps de réponses correctes moyens (ms ± ES) en fonction de l'ordre de passation.	96
Figure 26. Temps de réponses correctes moyen (ms + ES) par catégorie quelle que soit la session.	97
Figure 27. Récapitulatif des résultats comportementaux obtenus pour la classification affective.	98
Figure 28. Carte de contrastes dans SPM lors de la tâche de classification grammaticale de phrases neutres produites par des acteurs chez les cinq sujets atypiques.	108
Figure 29. Schéma d'un run de 6 min 30 sec.	112
Figure 30. Résultats comportementaux	118
Figure 31. Réseau cortical engagé au cours de la classification grammaticale des phrases à contenu lexical neutre quel que soit le locuteur	120
Figure 32. Les régions cérébrales plus activées lors de la classification affective que grammaticale.	123
Figure 33. Les régions temporales droites et la prosodie affective	126
Figure 34. Régions corticales qui présentent une diminution d'activité lorsque les phrases à contenu lexical affectif sont dépourvues de prosodie affective.	127
Figure 35. Carte d'asymétries obtenues pour la classification affective des phrases énoncées par les acteurs.	129

Figure 36. Latéralisation des régions temporales dans le traitement prosodique affectif	130
Figure 37. Réseau neural de la classification grammaticale de phrases neutres. ..	133
Figure 38. Localisation du cluster STSp par rapport au réseau neural de la classification grammaticale.	134
Figure 39. Le cluster Pole par rapport au réseau neural de la classification grammaticale.....	135
Figure 40. Méta-analyse des études de neuroimagerie sur la prosodie affective dans l'hémisphère gauche.	136
Figure 41. Région F3orb activée par le traitement émotionnel.....	138
Figure 42. Meta-analyse dans le gyrus frontal médian.	140
Figure 43. Meta analyse dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur..	143
Figure 44. IRM d'un sujet aprosodique présentant une lésion frontale médiane (repris de Heilman <i>et al.</i> , 2004).....	145
Figure 45. La région sélective de la voix humaine et la prosodie affective	147
Figure 46. Contours intonatifs du corpus de la présente étude.....	152
Figure 47. Modèle d'organisation neurale de la compréhension de la phrase affective.	161
Figure 48. Principe d'orientation des moments magnétiques (ou spins) des noyaux d'hydrogène dans un champ magnétique.	191
Figure 49. Caméra IRM et antenne radio-fréquence.....	192
Figure 50. Coupes axiales d'une même IRM anatomique pondérée en T1, T2 ou DP.	194
Figure 51. Bases physiologiques du signal BOLD.....	196
Figure 52. Procédure de recalage spatial des images fonctionnelles T2* sur les images anatomiques fine T1 et épaisse T2-DP.	199
Figure 53. Opérations spatiales conduisant à la normalisation linéaire d'une image IRM.	200
Figure 54. Espace stéréotaxique du MNI défini par l'image moyenne de 305 sujets.	201
Figure 55. Procédure de recalage et de normalisation spatiale des images fonctionnelles T2* sur les images anatomiques fine T1 et épaisse T2-DP.	202
Figure 56. Exemple du filtrage Gaussien à 8 mm appliqué sur un volume fonctionnel T2* normalisé.....	203
Figure 57. Schéma d'un run de 6 min 30 sec.	205

Figure 58. Définition du régresseur théorique en convoluant la fonction hémodynamique (hrf) ici définie pour une stimulation qui apparaît au temps 0 avec le régresseur théorique en créneau.	207
Figure 59. Cartes statistiques de t générées lors de l'analyse individuelle de contraste pour un paradigme de lecture.	209
Figure 60. Masque sur les contrastes multiples.	211
Figure 61. Résultat de la comparaison entre deux tâches à l'aide d'une différence de contraste (gauche) ou d'une conjonction (droite).	212
Figure 62. Principe de calcul d'une carte d'asymétrie individuelle.	214
Figure 63. Régions d'intérêt délimitées sur des coupes axiales du patron MNI.	215
Figure 64. Post-tests sur l'effet catégorie, sur les temps de réponses de l'étude psycholinguistique, sur l'effet de la catégorie affective.	289
Figure 65. Post-tests sur l'effet catégorie et l'effet Voix sur le pourcentage de réponses correctes de l'étude d'imagerie fonctionnelle.	290
Figure 66. Post-tests sur l'effet catégorie et l'effet Voix sur les temps de réponses de l'étude d'imagerie fonctionnelle.	291

TITRE: Bases neurales de la compréhension de la phrase affective: des fonctions ortholinguistiques à la prosodie affective.

RESUME:

Ce travail porte sur les bases neurales de la compréhension de phrases affectives qui repose sur le traitement ortholinguistique de la composante phonologique, sémantique et syntaxique, et le traitement paralinguistique de la prosodie affective.

Le premier chapitre présente les résultats d'une méta-analyse de 129 études de neuroimagerie portant sur le langage. 727 pics d'activation dans l'hémisphère gauche ont été soumis à un algorithme de ségrégation spatiale afin de cartographier les régions corticales en charge des processus phonologiques, sémantiques et syntaxiques. Le deuxième chapitre explore, au cours de deux études psychoexpérimentales et d'une étude en IRMf, la compréhension de la phrase affective au moyen de tâches de classification affective et grammaticale. Après validation du corpus de phrases à contenu lexical affectif et neutre, un impact de la présence de prosodie affective est observé sur les réponses et temps de réponses des sujets à la tâche de classification affective. L'étude en IRMf met en évidence trois réseaux neuraux qui interagissent au cours de la compréhension de phrases affectives: 1- le réseau neural du traitement ortholinguistique mis en place pour la classification affective et grammaticale des phrases affectives et neutres; 2- les régions corticales d'inférence d'états mentaux recrutées uniquement par la classification de phrases à contenu lexical affectif avec ou sans prosodie affective; 3- les aires temporales supérieures droites impliquées dans le traitement de la prosodie affective. La communication verbale affective requiert l'intégration des éléments ortho- et paralinguistiques mais aussi l'inférence d'états mentaux.

TITLE: Neural basis of affective sentence comprehension: from ortholinguistic functions to affective prosody.

SUMMARY:

We investigate the neural basis of affective sentence comprehension that requires the ortholinguistic processing of phonology, semantics and syntax, and the paralinguistic processing of affective prosody.

The first chapter presents a meta-analysis of 129 neuroimaging studies on language. 727 activation peaks in the left hemisphere were submitted to a spatial segregation algorithm to map left cortical areas implicated in phonological, semantic and syntactic processing. The second chapter describes through two psycholinguistic studies and one fMRI study the comprehension of affective sentence during two tasks of affective and grammatical classification. After the validation of the corpus of sentences with neutral and affective lexical content, an impact of affective prosody is observed on the response and response time of the subjects to the affective classification of sentences with affective lexical content. The fMRI study highlights the interaction of three neural networks during affective sentences comprehension: 1- the cortical network in charge of ortholinguistic processing during the affective and grammatical classification of sentences with affective and neutral lexical content; 2- the cortical areas of mental state inferences only recruited by the classification of affective sentences with or without prosody; 3- right superior temporal areas implicated in affective prosody processing. Affective verbal communication requires the integration of ortho- and paralinguistic elements and also mental state inferences.

MOTS-CLE: Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle, langage, émotion, prosodie, ortholinguistique, neurolinguistique.

DISCIPLINE: Physiologie, biologie des organismes, populations, interactions.

LABORATOIRE: Groupe d'Imagerie Neurofonctionnelle (GIN), UMR6194, CNRS, CEA, Universités de Caen et Paris V, BP 5229, 14 074 Caen cedex.