

UNIVERSITE Pierre et Marie Curie - Paris VI

THESE

pour obtenir le grade de
Docteur en Sciences de l'Université Paris VI
Discipline : Neurosciences
présentée et soutenue publiquement par

Anne-Dominique DEVAUCHELLE

le 29 septembre 2008

**Exploration du réseau cérébral impliqué dans les
traitements syntaxiques et lexico-sémantiques des
phrases.**

Directeur de thèse : Stanislas DEHAENE

JURY

BELIN Pascal	Rapporteur
COHEN Laurent	Examineur
DEHAENE Stanislas	Directeur de Thèse
GIRAUD Anne-Lise	Examineur
PALLIER Christophe	Encadrant Principal
RIZZI Luigi	Président
ULLMAN Michael	Rapporteur

Table des matières

1	Introduction	17
1.1	Le contexte scientifique	17
1.2	Des lésions cérébrales à l'imagerie fonctionnelle	18
1.3	Les représentations syntaxiques en linguistique et psycholinguistique	27
1.4	Les représentations syntaxiques en neurolinguistique	32
1.4.1	La variation de la complexité des phrases	32
1.4.2	Les phrases et les non-phrases	37
1.4.3	Les violations syntaxiques et sémantiques	42
1.4.4	L'adaptation syntaxique	45
1.5	Le traitement syntaxique : Où en sommes-nous ?	48
2	Etude en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle de l'adaptation à la structure syntaxique et au contenu lexico-sémantique des phrases	53
2.1	Résumé de l'article en français	53
2.2	Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory and visual modalities	59
2.2.1	Introduction	59
2.2.2	Methods	62
2.2.2.1	Participants	62
2.2.2.2	Stimuli	62
2.2.2.3	Procedure	64
2.2.2.4	Scanning and data analysis	65
2.2.3	Results	66
2.2.4	Discussion	70
2.3	Experiment 2 : Syntactic adaptation in four different syntactic structures : an fMRI study in visual modality	75
2.3.1	Methods	75
2.3.1.1	Participants	75
2.3.1.2	Stimuli	75
2.3.1.3	Procedure	76
2.3.1.4	Scanning and data analysis	76
2.3.2	Results	77
2.3.3	Discussion	78

2.4	Experiment 3 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : a behavioural study in auditory and visual modalities	81
2.4.1	Methods	81
2.4.2	Results	81
2.4.3	Discussion	83
2.5	General Discussion	83
2.6	Résultats marquants	88
3	Etude de la structure en constituants des phrases en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle	89
3.1	Résumé	89
3.2	Introduction	92
3.3	Methods	95
3.3.1	Participants	95
3.3.2	Stimuli	95
3.3.3	Procedure	96
3.3.4	Scanning and data analysis	97
3.4	Results	98
3.4.1	Behavioral results	98
3.4.2	fMRI results	99
3.4.2.1	The constituent-reading network : Basic network relative to the rest	99
3.4.2.2	A subset of these regions show monotonic activation as a function of hierarchical structure	100
3.4.2.3	Phase analysis	102
3.4.2.4	Comparison between constituents and non-constituents	105
3.5	Discussion	106
3.6	Résultats marquants	111
4	Etude des aires impliquées dans les traitements de la forme des mots, de leur sens et de celui de la phrase	113
4.1	Résumé	113
4.2	Introduction	114
4.3	Matériel et Méthodes	115
4.3.1	Sujets	115
4.3.2	Stimuli	115
4.3.3	Protocole expérimental	116
4.3.4	Paramètres de l'étude en IRM fonctionnelle et Acquisition des images	117
4.3.5	Traitement des images et Analyses statistiques	118
4.4	Résultats	120
4.4.1	Tâche comportementale	120
4.4.2	Imagerie fonctionnelle	120
4.5	Discussion	127
4.6	Résultats marquants	132

<i>Table des matières</i>	5
5 Conclusion Générale et Perspectives	133
Annexes	147
A Le modèle du traitement de la parole	147
B Le modèle de la lecture	151
B.1 Une région dédiée au traitement orthographique du mot	152
B.2 Deux voies distinctes pour accéder aux mots	158
B.2.1 La voie directe	158
B.2.2 La voie indirecte	159
B.3 L'accès au sens du mot	160
B.4 Le modèle de la lecture	163
C Les représentations syntaxiques en linguistique et psycholinguistique	167
C.1 Les représentations syntaxiques : Généralités	167
C.2 La réalité des structures syntaxiques	168
C.3 Les constituants de la phrase	170
C.4 L'analyseur syntaxique	176
C.4.1 Analyse syntaxique indépendante	177
C.4.2 Analyse syntaxique interactive	180
Références	183
Travaux Scientifiques	187
Bibliographie	199

Table des figures

1.1	Cerveau de Mr Leborgne présentant une lésion de la 3 ^{ème} circonvolution frontale gauche responsable d'une perte de la parole chez ce patient. Autopsie et constat réalisés par Paul Broca en 1861.	19
1.2	Aires de Broca et de Wernicke. L'aire de Broca correspond à l'aire de la production du langage et l'aire de Wernicke à celle de la compréhension du langage.	20
1.3	Aires de Broca et de Wernicke reliées par le faisceau arqué.	21
1.4	Le modèle connexionniste de Geschwind-Wernicke. (a) Quand on entend un mot, la sensation provenant des oreilles parvient au cortex auditif primaire, mais ce mot ne peut pas être compris jusqu'à ce que le signal soit traité dans l'aire adjacente de Wernicke. Si ce mot doit être prononcé, une certaine représentation de ce mot est transmise de l'aire de Wernicke à l'aire de Broca, par l'intermédiaire d'un faisceau de fibres appelé faisceau arqué. Dans l'aire de Broca, le mot évoque un programme détaillé d'articulations qui est transmis à l'aire du visage dans le cortex moteur. A son tour, le cortex moteur commande les muscles pour qu'ils prononcent le mot. (b) Quand on lit un mot écrit, la sensation est d'abord enregistrée par le cortex visuel. On pense qu'elle est ensuite transmise à la circonvolution angulaire, qui associe, dans l'aire de Wernicke, la forme visuelle du mot avec sa forme auditive correspondante. Les mêmes systèmes de neurones que précédemment vont alors intervenir dans la prononciation du mot. Explications données par Geschwind (1979).	22
1.5	Aires cérébrales activées lors de l'écoute de phrases. G : hémisphère gauche, D : hémisphère droit.	24
1.6	Aires cérébrales activées lors de la lecture de phrases. G : hémisphère gauche, D : hémisphère droit.	24
1.7	Aires plus activées lors de l'écoute de phrases en français que par l'écoute d'une langue étrangère inconnue chez un locuteur de langue maternelle française (Pallier <i>et al.</i> , 2003).	25
1.8	Aires cérébrales montrant une augmentation d'activité lorsque les phrases sont de plus en plus intelligibles. Echelle rose-bleu : régions cérébrales activées par des sons (par rapport au silence). Echelle jaune-rouge : régions cérébrales activées selon l'intelligibilité des phrases. Jaune : phrases non-intelligibles et rouge : phrases intelligibles (Davis & Johnsrude, 2003) . . .	26

1.9	Représentation syntaxique de la phrase <i>Le petit chien aboie sauvagement</i> . P : phrase ; SN : syntagme nominal ; SV : syntagme verbal ; Det : déterminant ; N : nom ; V : verbe ; Adj : adjectif ; Adv : adverbe.	28
1.10	Implication de l'aire de Broca et des régions temporales latéro-supérieures gauches lors du traitement de phrases complexes (par rapport au traitement de phrases simples) (Just <i>et al.</i> , 1996).	32
1.11	Méta-analyses des études qui comparaient les activations aux phrases complexes par rapport aux phrases simples (Kaan & Swaab, 2002).	33
1.12	Comparaison des activations aux phrases non-canoniques (A) et canoniques (B) par rapport au silence. (C) Comparaison des phrases canoniques par rapport aux phrases non-canoniques. (D) Comparaison des phrases non-canoniques par rapport aux phrases canoniques. (E) Conjonction des activations aux phrases non-canoniques et canoniques. Les graphiques correspondent à la valeur des paramètres estimés pour chacune des conditions. non-CAN : Phrases non-canoniques correctes, non-CAN* : Phrases non-canoniques incorrectes, CAN : Phrases canonique correctes et CAN* : Phrases canonique incorrectes (Wartenburger <i>et al.</i> , 2004). . .	35
1.13	(A) Régions cérébrales activées lorsque la complexité de la phrase augmente (partie postérieur des gyri temporaux supérieur et moyen gauche). (B) Régions cérébrales activées lorsque la charge en mémoire de travail augmente (région frontale operculaire gauche et insula). (C) Régions cérébrales activées dans le contraste "Phrases vs Listes de mots" (Lobe temporal antérieur bilatéral) (Stowe <i>et al.</i> , 1998).	36
1.14	Le gyrus frontal inférieur gauche est représenté en vert et la carte de probabilité de BA 45 est présentée en rouge. Un effet du mouvement et de la distance entre les mots est à noter dans le gyrus frontal inférieur gauche (Santi & Grodzinsky, 2007).	36
1.15	Méta-analyses des études qui comparaient les activations aux phrases par rapport aux listes de mots (Kaan & Swaab, 2002).	37
1.16	Implication du gyrus temporal antérieur gauche lors du traitement de phrases normales par rapport à leur version mélangée (listes de mots) dans la modalité visuelle (Vandenberghe <i>et al.</i> , 2002).	38
1.17	<i>Haut</i> : Carte d'activation de l'effet syntaxique principal. La région temporale antérieure gauche présente une plus forte activation aux phrases qu'aux listes de mots, quelque soit la condition et l'implication sémantique. <i>Bas</i> : Le graphique présente le signal BOLD moyen dans les différentes conditions. 1 ^{ère} colonne : Phrases sémantiquement congruentes ; 2 ^{ème} colonne : Listes de mots sémantiquement congruents ; 3 ^{ème} colonne : Phrases sémantiquement incongruentes ; 4 ^{ème} colonne : Listes de mots sémantiquement incongruents ; 5 ^{ème} colonne : Phrases formées de pseudomots ; 6 ^{ème} colonne : Listes de pseudomots (Humphries <i>et al.</i> , 2006).	40
1.18	Régions cérébrales impliquées dans le traitement syntaxique (phrases > listes de mots, bleu), dans le traitement sémantique des phrases (rouge) ou dans les deux traitements (jaune) (Humphries <i>et al.</i> , 2006).	41

1.19	Activations cérébrales lors de l'écoute de parole normale (A), de parole syntaxiquement correcte (B), de listes de mots réels (C) et de listes de pseudomots (D). L'activation de la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche est entouré par un cercle blanc sur l'image (B) (Friederici <i>et al.</i> , 2000).	41
1.20	Méta-analyses des études qui regardaient les activations aux phrases contenant des pseudomots (jabberwocky) et qui avaient une syntaxe correcte (Kaan & Swaab, 2002).	42
1.21	Aires cérébrales mises en jeu lors du traitement de phrases correctes (en haut), de phrases avec des anomalies syntaxiques (au milieu) et de phrases avec des anomalies sémantiques (en bas). Les histogrammes correspondent aux activations (dans une valeur arbitraire) des différentes conditions dans les régions d'intérêt. Jaune : phrases correctes, bleu : violations sémantiques et rouge : violations syntaxiques. fr oper : Operculum frontal, mid STG : partie moyenne du gyrus temporal supérieur, l ant STG : partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche, r mid STG : partie moyenne du gyrus temporal supérieur gauche, l STG : gyrus temporal supérieur gauche et l insula : cortex insulaire gauche (Friederici <i>et al.</i> , 2003).	43
1.22	Régions cérébrales activées lors du traitement de phrases ambiguës. Bleu : Traitement de phrase peu ambiguës ; Rouge : Traitement de phrases très ambiguës et Jaune : Intersection des deux traitement (Rodd <i>et al.</i> , 2005).	44
1.23	Structure de deux types de grammaire $(AB)^n$ et A^nB^n . La catégorie A correspond à des syllabes contenant les voyelles "i" ou "e" (de, gi, le, ri, se, ne, ti et mi) et la catégorie B correspond à des syllabes contenant les voyelles "o" ou "u" (bo, fo, ku, mo, pu, wo, tu et gu). les mêmes syllabes sont utilisées dans les deux types de grammaire. La position des violations grammaticales changent aléatoirement. Exemples de séquences correctes (cor) ou avec des violations (viol, violation en gras) (Friederici <i>et al.</i> , 2006b).	45
1.24	Régions cérébrales activées lors des violations de deux types de grammaires : $(AB)^n$ (à gauche) et A^nB^n (à droite) (Friederici <i>et al.</i> , 2006a).	46
1.25	Régions cérébrales présentant un effet d'adaptation syntaxique lors de la lecture de phrases (Noppeney & Price, 2004).	47
1.26	Aires cérébrales activées pendant le traitement syntaxique des phrases. La région frontale operculaire et la partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche sont impliquées dans la construction de la structure locale de la phrase (rose), L'aire de Broca (BA 44 et BA 45) est impliquée dans la mise en place des relations syntaxiques et sémantiques dans la phrase (jaune), et la partie postérieure des gyrus et sillon temporaux supérieurs sont impliqués dans l'intégration des informations lexicales et syntaxiques (jaune hachuré) (Grodzinsky & Friederici, 2006).	50
2.1	Areas showing significant decrease in activation across the four sentences, as a function of condition and modality ($p < 0.001$ uncorrected voxel-based, $p < 0.05$ for extent).	67

2.2	Areas showing more adaptation than in the “Different Sentences” condition ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).	68
2.3	A- Areas involved in reading (blue), listening (green) and their intersection (red) (contrast maps threshold at $p < 0.01$ for each modality). B- Time-course in regions of interest defined as spheres of 8 mm radius centered on the peaks defined by SPM shown in figure 2. Green line : Same Sentences adaptation, blue line : Same Syntax adaptation, black line : Same Lexico-semantic Content adaptation, red line : Different Sentences adaptation.	69
2.4	Areas showing significant decrease in activation across the four sentences in the “Same Sentences” and the “Same Syntax” conditions relative to the “Different Sentences” condition ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).	78
2.5	Mean reaction times to detect the end of the sentence according to condition and position.	82
3.1	Deux exemples de structures syntaxiques. En haut : Phrase à branchement à droite et en bas : Phrase avec enchâssement.	91
3.2	Distribution of the percentage of correct and incorrect answers according to the 8 conditions. c1 : 1-word constituent (a list of 12 words completely independent), c2 : 2-word constituent, c3 : 3-word constituent, c4 : 4-word constituent, c6 : 6-word constituent, c12 : 12-word constituent (an entire sentence of 12 words), nc3 : 3-word non-constituent and nc4 : 4-word non-constituents.	100
3.3	The basic networks relative to the rest of the 8 conditions ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).	101
3.4	Areas showing a negative or a positive correlation with the size of constituents ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).	102
3.5	Time-course and phases in regions of interest centered on the peaks defined by SPM shown in Figure 3.4 (first line), where there was a positive correlation between the activation level and the complexity. MNI coordinates : -54 -9 -12 : left middle temporal gyrus ; -42 -48 15 : Left posterior superior temporal gyrus ; -45 18 -30 : Left anterior superior temporal gyrus ; -54 21 12 : left inferior frontal gyrus ; -48 30 0 : left inferior frontal gyrus ; -18 9 6 : left putamen.	104
3.6	Phases of the 1-word constituent condition and the 12-word constituent condition. These networks were masked by the logpvalue of the respective images ($p < 0.001$) and masked by the ERR image at $p = 1.9 \times 10^{-6}$ comprising phases ranging between 3 and 10 seconds.	105
3.7	Comparison between the Constituent and the Non-Constituent conditions. Contrasts threshold at $p < 0.01$ and masked by the contrast c12 (= entire sentence of 12 words) at $p < 0.001$	107

4.1 Protocole expérimental : Chaque participant effectuait 6 sessions visuelles. Une session était composée de 30 paires de phrases (p1 et p2) correspondant aux différentes conditions (Table 4.1 page 117). Chaque phrase était séparée de la précédente par un silence de 5 secs en moyenne. A la fin de chaque session les participants devaient réaliser une tâche comportementale de reconnaissance de phrases lues/non-lues. 118

4.2 Régions cérébrales montrant un effet d'adaptation lors de la répétition de la même phrase, de la même forme du mot, du même sens du mot, de la même structure argumentale ou de la même syntaxe. $p < 0.01$ non-corrigé, masqué par le contraste "Phrases - Silence" à $p < 0.001$ 121

4.3 Graphiques représentant la valeur du signal BOLD pour les phrases amorces (p1) ou cibles (p2) lorsque les durées des phrases sont modélisées (à gauche) ou non modélisées (à droite). ph1.passive : phrase amorce passive ; ph2.active : phrase cible active ; ph1.active : phrase amorce active ; ph2.active : phrase cible active. 124

4.4 Modèle prenant en compte la durée des phrases : Valeurs des coefficients des régresseurs au niveau des régions d'intérêt (définies à partir de la Table 4.2 page 122) pour les phrases amorces (p1) à la forme active, clivée, passive et clivée-passive. 125

4.5 Modèle ne prenant pas en compte la durée des phrases : Valeurs des coefficients des régresseurs au niveau des régions d'intérêt (définies à partir de la Table 4.2 page 122) pour les phrases amorces (p1) à la forme active, clivée, passive et clivée-passive. 126

4.6 Amplitude des réponses, au niveau des régions d'intérêt (définies à partir de la Table 4.2 page 122), des phrases cibles (p2) en fonction des phrases amorces (p1) qui les précédaient : Répétition de (1) même phrase & même syntaxe, (2) même phrase & syntaxe différente, (3) structure argumentale différente & même syntaxe, (4) structure argumentale différente & syntaxe différente, (5) synonymes & même syntaxe, (6) synonymes & syntaxe différente, (7) structure argumentale différente avec synonymes & même syntaxe, (8) structure argumentale différente avec synonymes & syntaxe différente, (9) phrase différente & même syntaxe, (10) phrase différente & syntaxe différente. Les caractéristiques des différentes conditions sont détaillées dans la Table 4.1 page 117. Ces régions d'intérêt montrent des effets particuliers (voir Figure 4.2 page 121) : adaptation à la même phrase (rouge), adaptation à la même forme du mot (orange), adaptation au même sens du mot (violet) et un effet syntaxique (bleu, qui serait expliqué par la longueur/complexité différente des phrases amorces). . . . 128

4.7	Sous-partie de la région antérieure du gyrus temporal moyen gauche. Vert : Gyrus temporal moyen gauche, sous-partie impliquée dans le traitement lexico-sémantique du mot ; Bleu : Gyrus temporal moyen gauche, sous-partie sensible à la répétition de la même phrase ; Rouge : Gyrus temporal moyen gauche, sous-partie impliquée dans le traitement des constituants de la phrase ; Turquoise : gyrus fusiforme gauche, impliqué dans le traitement du sens du mot.	130
5.1	Récapitulatif des régions mises en évidence lors de cette thèse. Le pole temporal gauche montre une grande diversité de fonctions regroupées dans des parties relativement proches les unes des autres.	134
5.2	Le cerveau d’Homer Simpson. Pire que Mr Leborgne qui pouvait au moins dire “Tan-Tan”, Homer lui ne dit que “Doh!”.	143
A.1	Le modèle à double voies impliqué dans le traitement de la parole. a) Diagramme schématique du modèle à double voies dans le traitement de la parole. b) Localisations anatomiques des régions impliquées dans le traitement de la parole. Analyse spectrale en vert, traitements et représentations phonologiques en jaune, voie ventrale en rose et voie dorsale en bleu. aITS : partie antérieure du sillon temporal inférieur ; aMTG : partie antérieure du gyrus temporal moyen ; anterior insula : Partie antérieure de l’insula ; Dorsal STG : partie dorsale du gyrus temporal supérieur ; Mid-post STS : parties moyenne et postérieure du sillon temporal supérieur ; Parietal-temporal Spt : région à la jonction pariéto-temporale au niveau de la fissure sylvienne ; pIFG : partie postérieure du gyrus frontal inférieur ; PM : cortex prémoteur (Hickok & Poeppel, 2007).	149
B.1	Régions cérébrales activées lors de la lecture de chaînes de caractères factices (A), de chaînes de lettres (B), de pseudomots prononcables (C) et de vrais mots (D). L’activation d’une aire occipitale médiane antérieure proche du gyrus lingual est observable uniquement lors de la lecture de mots ou de pseudomots (Petersen <i>et al.</i> , 1990).	153
B.2	Régions cérébrales plus activées lors de la lecture de pseudomots que lors de la lecture d’une seule lettre factice (1 ^{ère} ligne). Régions cérébrales plus activées lors de la lecture de pseudomots que lors de la lecture d’une chaîne de caractères factices (2 ^{ème} ligne). Régions cérébrales plus activées lors de la lecture d’une lettre factice que lors de la lecture d’une chaîne de caractères factices (3 ^{ème} ligne). R : Hémisphère droit (Indefrey <i>et al.</i> , 1997).154	

B.3	Topographie des potentiels évoqués lorsque l'on soustrait la lecture de non-mots à la lecture de mots chez un sujet contrôle et chez un patient hémialexique gauche présentant une lésion occipito-temporal inférieure gauche. Ce patient était incapable de reconnaître et de lire les lettres et des mots présentés dans son champ visuel gauche. Une négativité temporale gauche est observable chez le sujet contrôle dans les deux hémichamps et seulement dans l'hémichamps droit chez le patient hémialexique gauche (Cohen <i>et al.</i> , 2000).	155
B.4	Activation du gyrus fusiforme gauche lors de la lecture de mots chez le sujet contrôle quelque soit l'hémichamps de lecture (1 ^{ère} ligne, cercles verts). Activation occipito-temporale médiale controlatéral lors de la stimulation des hémichamps visuels chez le sujet contrôle (Cohen <i>et al.</i> , 2000).	156
B.5	Présentation subliminale d'un mot répété. Protocole expérimental utilisé par Dehaene <i>et al.</i> (2001).	156
B.6	<i>A gauche</i> : Activations controlatérales lors de la stimulation d'un hémichamps visuel dans l'étude de Cohen <i>et al.</i> (2000) (symboles bleus) et dans des études précédentes (symboles rouges, Zeki <i>et al.</i> , 1991; McKee-fry & Zeki, 1997; Hadjikhani <i>et al.</i> , 1998; Hasnain <i>et al.</i> , 1998; Howard <i>et al.</i> , 1998; Zeki & Marini, 1998). <i>A droite</i> : Activations du gyrus fusiforme gauche lors de la lecture de mots dans l'étude de Cohen <i>et al.</i> (2000) (sujet contrôle : symboles bleus, patient : symboles roses) et dans des études précédentes utilisant la Tomographie par Emission de Position ou l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (symboles rouges, Puce <i>et al.</i> , 1996; Wagner <i>et al.</i> , 1998) ou lors d'enregistrements intracrâniens (symboles jaune, Nobre <i>et al.</i> , 1994).	157
B.7	Dissociation des régions antérieures et postérieures de la voie ventrale du traitement des mots. Les activations non-spécifiques aux mots lus (c'est à dire répondant aux mots et aux non-mots lus) sont représentées en rouge sur la figure. Les activations spécifiques aux mots lus (c'est à dire répondant aux mots dans la modalité visuelle ou en braille) sont représentées en vert (Büchel <i>et al.</i> , 1998).	162
B.8	Ancien (en haut) et nouveau modèle (en bas) neurologique de la lecture. Dans le nouveau modèle les régions représentées en vert et orange ne sont pas spécifiques à la lecture (Dehaene, 2007).	164
C.1	Représentation sous forme d'arbre syntaxique des phrases : <i>Mon frère déteste cet homme mesquin</i> (en haut) et <i>Mon frère trouve cet homme mesquin</i> (en bas). P : phrase ; SN : syntagme nominal ; SV : syntagme verbal ; Det : déterminant ; N : nom ; V : verbe ; A : adjectif.	172
C.2	Exemple d'attachement minimal (en haut) à 6 noeuds et non-minimal (en bas) à 7 noeuds de la phrase : <i>Le gendarme arrête le garçon avec le sifflet.</i>	178
C.3	Analyse de la phrase <i>La fille aime le garçon et le chien aime son maître</i> selon le principe de la clôture tardive.	179

Liste des tableaux

1.1	Les six conditions expérimentales de l'expérience de Humphries <i>et al.</i> (2006).	39
2.1	The four experimental conditions. In the "Same Syntax" condition, the same syntactic construction and similar function words were used. In the "Same Lexico-semantic Content" condition, the sentences involved the same open-class items (nouns, verbs, adjectives), and referred to the same event types and the same predicates and arguments, but this common lexico-semantic content was expressed by different syntactic constructions. In our experiment the stimuli were in French.	63
2.2	Example of one set of sixteen sentences, by crossing 4 kernel sentences (1, 2, 3 and 4) with 4 syntactic structures (a, b, c and d). Across all sets, a variety of syntactic constructions were employed : cleft sentences, Wh-questions, relative clauses (reduced or not), yes/no questions, imperative, exclamative clauses, raising construction, preposed adverbial clauses, sentential subject sentences, simple active clauses and simple passive clauses.	72
2.3	Peak voxels of activated regions showing significant adaptations ($p < 0.001$ uncorrected voxel-based ; clusters' extent > 4 voxels ; masked by the "Sentence - Silence" contrast at $p < 0.001$)	73
2.4	Peak voxels of activated regions showing more adaptation than in the "Different Sentences" condition ($p < 0.001$ uncorrected voxel-based ; clusters' extent > 4 voxels ; masked by the "Sentence - Silence" contrast at $p < 0.001$)	79
3.1	The 8 experimental conditions. The first six conditions come from right-branching sentences (like : the journalist wrote an article denouncing frauds of the outgoing mayor) and the other two come from center-embedding sentences (like : A bird who sang on the branch of a tree awakened Paul).	96
3.2	Peak voxels of activated regions showing positive or negative correlation with the size of constituents ($p < 0.05$ (FDR) voxel-based ; clusters' extent > 10 voxels ; masked by the "Phrases - Silence" contrast at $p < 0.001$). . .	103

3.3	Peak voxels of activated regions showing differences between the Constituent and the Non-Constituent conditions ($p < 0.001$ voxel-based ; clusters' extent > 10 voxels ; masked by the "c12" condition (= entire sentence of 12 words) at $p < 0.001$).	108
4.1	Répartition des différentes conditions expérimentales dans les différents facteurs : "Syntaxe", "Structure Argumentale", "Forme du Mot" et "Sens du Mot". Une phrase amorce (phrase p1) pouvaient appartenir à l'une des 20 conditions expérimentale, et la phrase cible correspondait toujours à la phrase active initiale, c'est à dire ici dans cet exemple : <i>les prisonniers ont avalé des tranquillisants.</i>	117
4.2	Liste des régions cérébrales montrant un effet d'adaptation lors de la répétition de la même phrase, de la même forme du mot, du même sens du mot, de la même structure argumentale ou de la même syntaxe. $p < 0.001$ non-corrigé, masqué par le contraste "Phrases - Silence" à $p < 0.001$	122

Chapitre 1

Introduction

1.1 Le contexte scientifique

Ce travail de thèse s'est déroulé dans un contexte européen dont le projet consistait à comprendre l'origine neuronale du langage et de la communication¹ aussi bien chez le singe que chez l'homme (adulte, enfant et nouveau-né).

Au sein du laboratoire de Neuroimagerie Cognitive dirigé par Stanislas Dehaene, notre équipe avait pour objectif dans ce projet de décrire le réseau cérébral mis en oeuvre lors de la compréhension des phrases chez des adultes sains. Les défis principaux étaient de découvrir les aires cérébrales impliquées dans le traitement des relations entre les mots (c'est à dire la syntaxe) et/ou celles impliquées dans l'accès au sens de la phrase (c'est à dire la sémantique).

Cette thématique est au coeur des solutions à rechercher pour faciliter l'apprentissage des langues et aider à la compréhension des maladies cérébrales impliquant de graves déficits langagiers tels que les maladies d'Huntington et d'Alzheimer, la Schizophrénie, la Dyslexie, ...

¹Projet NEUROCOM : Neural origins of language and communication

1.2 Des lésions cérébrales à l'imagerie fonctionnelle

Depuis une trentaine d'années, l'émergence des neurosciences², avec l'aide en particulier des techniques d'imagerie cérébrale, a permis d'approfondir nos connaissances sur le cerveau. Il est désormais possible d'identifier les régions cérébrales impliquées dans divers traitements, tels que le calcul mental, la perception d'images ou encore la production ou la compréhension de phrases.

Tout au long de cette thèse nous allons nous intéresser au traitement du langage, et comme d'autres activités cognitives, il dépend de régions spécialisées du cerveau. Les hypothèses concernant la localisation des zones corticales impliquées dans le langage ont débuté vers la fin du 19^{ème} siècle par des constats faits chez des patients atteints de lésions cérébrales. Ces lésions pouvaient entraîner des déficits limités à un domaine particulier, comme par exemple la reconnaissance des visages ou le mouvement d'un membre, ... Dans le cas des déficits qui touchaient le langage, une première distinction a été faite entre les déficits qui affectaient la production de ceux qui affectaient la compréhension de la parole.

En 1861, Paul Broca (1824-1880) accueillit dans son service de chirurgie à Bicêtre un pensionnaire, Monsieur Leborgne, pour un abcès gangréneux de la jambe dont l'issue fatale ne faisait aucun doute. Ce qui intéressa particulièrement Paul Broca, c'est le fait que cet homme était à Bicêtre depuis l'âge de 20 ans pour une brusque suspension du langage. Il ne pouvait s'exprimer que par les onomatopées "tan tan" mais n'était affecté d'aucune paralysie des muscles bucco-phonateurs³ et ne présentait aucun trouble de la compréhension. Mr Leborgne décéda le 17 avril 1861 à l'âge de 51 ans, et au lendemain du décès de son patient, Broca pratiqua une autopsie de son cerveau. Il constata une importante lésion de la troisième circonvolution frontale gauche (Figure 1.1). Dès le

²Les neurosciences regroupent toutes les sciences nécessaires à l'étude de l'anatomie et du fonctionnement du système nerveux.

³Les muscles bucco-phonateurs sont mis en jeu au moment de l'articulation des sons de la parole.

lendemain il présenta cette observation à la Société d'anthropologie et conclut que la lésion du lobe frontal était à l'origine de la perte de la parole : L'aire de Broca était découverte et la neuropsychologie⁴ était née ainsi que le terme d'aphasie⁵.

Par la suite, Paul Broca a eu l'occasion d'examiner un certain nombre de cas similaires à celui de Mr Leborgne. Il postula que cette zone du cerveau était le lieu pour le discours articulé, c'est à dire la production du langage (Broca, 1861).

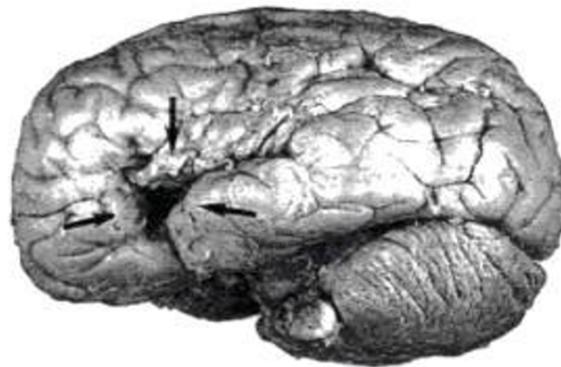


FIG. 1.1: Cerveau de Mr Leborgne présentant une lésion de la 3^{ème} circonvolution frontale gauche responsable d'une perte de la parole chez ce patient. Autopsie et constat réalisés par Paul Broca en 1861.

Plusieurs années après, Carl Wernicke (1848-1905) a étendu les recherches de Paul Broca aux aires de la compréhension du langage. Il constata chez un patient, dont la compréhension a été sévèrement altérée, une lésion dans le lobe temporal gauche postérieur et supérieur. Sur la base des observations supplémentaires de patients présentant les mêmes troubles de la compréhension, Carl Wernicke a présumé que cette zone était le lieu de la compréhension des phrases (Figure 1.2 page suivante).

A partir de ces constats, une séparation fût faite entre la production et la compréhension du langage car elles étaient prises en charge par des aires cérébrales différentes :

⁴La neuropsychologie est une discipline scientifique et clinique qui étudie les fonctions mentales supérieures dans leurs rapports avec les structures cérébrales au moyen d'observations menées auprès de patients présentant des lésions cérébrales accidentelles, congénitales ou chirurgicales.

⁵L'aphasie est un trouble du langage affectant l'expression ou la compréhension du langage parlé ou écrit survenant en dehors de tout déficit sensoriel ou de dysfonctionnement de l'appareil phonatoire.

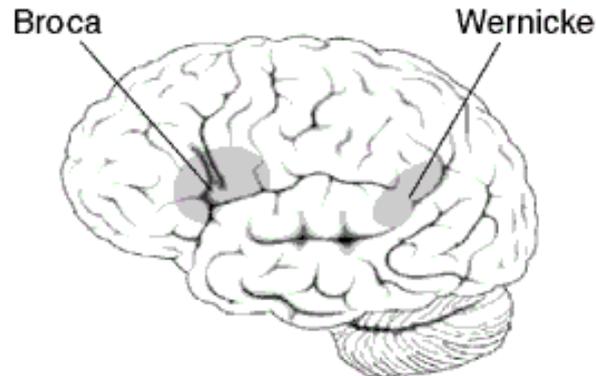


FIG. 1.2: Aires de Broca et de Wernicke. L'aire de Broca correspond à l'aire de la production du langage et l'aire de Wernicke à celle de la compréhension du langage.

L'aphasie de Broca (trouble de la production du langage) était généralement associée à des lésions du lobe frontal gauche, en particulier de la troisième circonvolution frontale (l'aire de Broca). L'aphasie de Wernicke (trouble de la compréhension du langage) était associée à des lésions cérébrales qui se trouvaient dans les régions postérieures de la circonvolution temporale supérieure gauche et s'étendaient partiellement dans le cortex pariétal adjacent, notamment dans les circonvolutions supramarginale et angulaire (l'aire de Wernicke).

Carl Wernicke a par ailleurs postulé qu'un faisceau de fibres connectait cette région à la zone identifiée par Broca et que la production de la parole était influencée par l'activité de la région de Wernicke (Figure 1.3 page ci-contre). Les dommages de ce faisceau pouvaient entraîner ce que l'on nomme une "aphasie de conduction" où les patients avaient d'extrêmes difficultés à répéter des mots ou des phrases.

Vers le milieu du XX^{ème} siècle, l'ensemble des observations anatomo-cliniques sur le langage ont finalement donné lieu à un modèle unique élaboré par le neuropsychologue américain Norman Geschwind (Figure 1.4 page 22, Geschwind, 1965, 1979). Ce modèle est devenu le principal modèle d'analyse anatomique de l'aphasie.

Vers les années 1980, alors que l'analyse du langage s'affirmait, Caramazza *et al.*

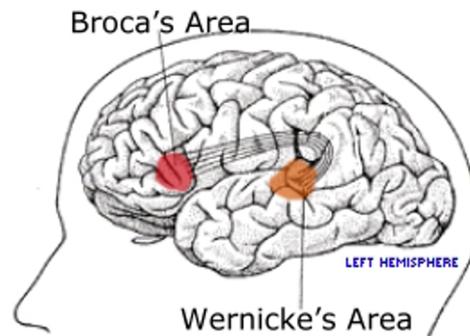


FIG. 1.3: Aires de Broca et de Wernicke reliées par le faisceau arqué.

(1981) constata que le traitement de l'information syntaxique⁶ posait problème chez des patients atteints d'une aphasie dite de Broca, mais ne posait pas problème chez un patient atteint d'une aphasie dite de Wernicke. Les rôles de l'aire de Broca et de l'aire de Wernicke furent alors remis en question ainsi que l'opposition production/compréhension du langage (Caramazza & Zurif, 1976; Caramazza *et al.*, 1981).

Telles furent les conclusions de la neuropsychologie classique basée sur l'étude des lésions et de leurs symptômes associés : deux régions principales semblaient jouer un rôle dans le langage, l'aire de Broca et l'aire de Wernicke mais leurs rôles restaient encore à être définis.

⁶Le traitement de l'information syntaxique renvoie aux relations qu'il y a entre les mots dans une phrase.

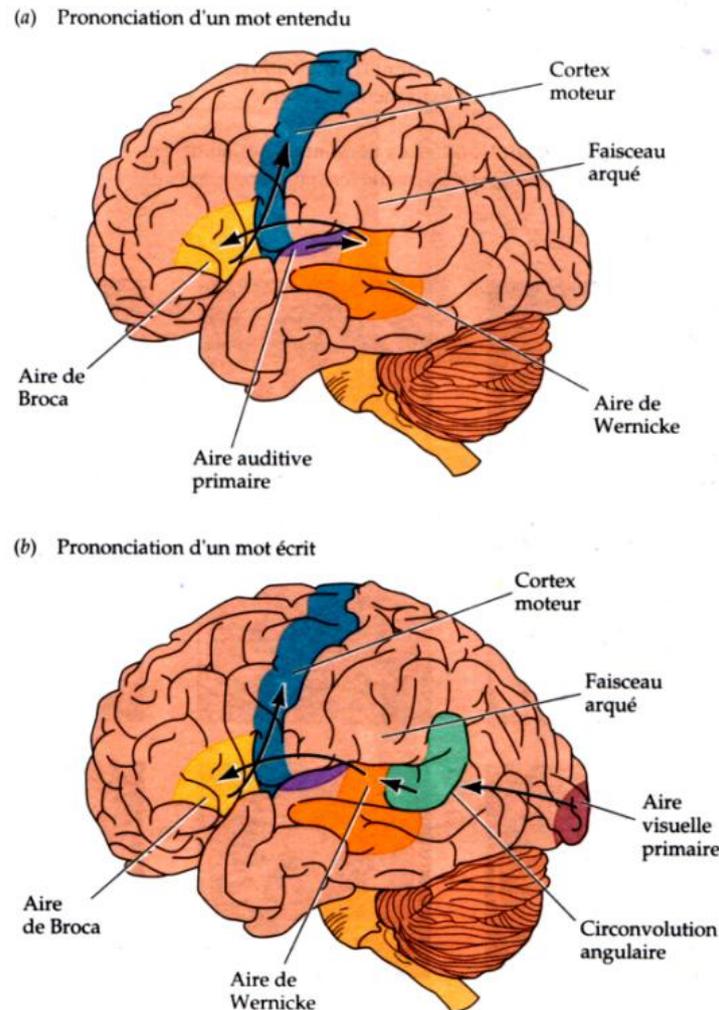


FIG. 1.4: Le modèle connexionniste de Geschwind-Wernicke. (a) Quand on entend un mot, la sensation provenant des oreilles parvient au cortex auditif primaire, mais ce mot ne peut pas être compris jusqu'à ce que le signal soit traité dans l'aire adjacente de Wernicke. Si ce mot doit être prononcé, une certaine représentation de ce mot est transmise de l'aire de Wernicke à l'aire de Broca, par l'intermédiaire d'un faisceau de fibres appelé faisceau arqué. Dans l'aire de Broca, le mot évoque un programme détaillé d'articulations qui est transmis à l'aire du visage dans le cortex moteur. A son tour, le cortex moteur commande les muscles pour qu'ils prononcent le mot. (b) Quand on lit un mot écrit, la sensation est d'abord enregistrée par le cortex visuel. On pense qu'elle est ensuite transmise à la circonvolution angulaire, qui associe, dans l'aire de Wernicke, la forme visuelle du mot avec sa forme auditive correspondante. Les mêmes systèmes de neurones que précédemment vont alors intervenir dans la prononciation du mot. Explications données par Geschwind (1979).

Dans les années 1970, des techniques d'imagerie cérébrale ont contribué aux avancées de la neuropsychologie. Il s'agit de l'imagerie tomographique aux rayons X assistée par ordinateur (le scanner), qui a été inventée au début des années 1970 par Allan Cormack et Godfrey Hounsfield (prix nobel de physiologie et de médecine en 1979), puis l'imagerie par résonance magnétique (IRM) mise au point par Paul Lauterbur au début des années 1980.

Ces deux méthodes permettent d'obtenir des images en trois dimensions de l'anatomie du cerveau du patient. Ces techniques permettent de réaliser l'examen anatomique du cerveau du patient dans les heures ou jours qui suivent l'apparition des symptômes afin de constater les éventuelles lésions.

Il y a un peu moins de 30 ans, les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle (Tomographie par Emission de Positons (TEP) et Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf)) ont été inventées pour observer le fonctionnement cérébral aussi bien chez l'homme sain que chez le patient. Elles ont immédiatement supplanté les approches neuropsychologiques afin de déterminer les relations entre les structures cérébrales et les fonctions mentales.

Grâce à l'imagerie cérébrale fonctionnelle, il devenait possible de passer de la représentation la plus simpliste des aires du langage (Figure 1.3 page 21) à une représentation plus vaste qui met en relation différentes régions cérébrales lors du traitement des phrases. La Figure 1.5 page suivante représente les aires cérébrales activées lors de l'écoute passive de phrases et la Figure 1.6 page suivante représente les aires cérébrales activées lors de la lecture de phrases.

Un premier constat a été de noter que l'aire de Broca et celle de Wernicke n'étaient plus les seules impliquées dans le traitement des phrases, les régions temporales semblent elles aussi y être largement impliquées.

Les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle permettent également de com-

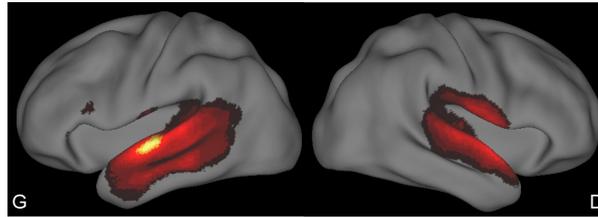


FIG. 1.5: Aires cérébrales activées lors de l'écoute de phrases. G : hémisphère gauche, D : hémisphère droit.

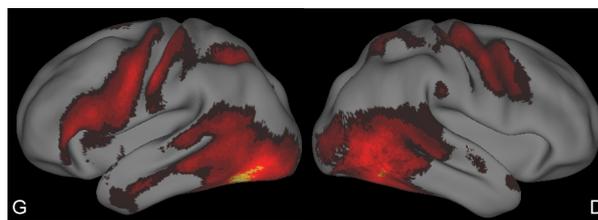


FIG. 1.6: Aires cérébrales activées lors de la lecture de phrases. G : hémisphère gauche, D : hémisphère droit.

parer les activations de régions cérébrales dans différentes conditions. Par exemple la Figure 1.7 page suivante représente les aires cérébrales qui sont plus activées lors de l'écoute de phrases françaises que lors de l'écoute de phrases étrangères (Pallier *et al.*, 2003). Le sillon temporal supérieur (principalement gauche) est donc impliqué dans le traitement du langage, mais plus particulièrement dans le traitement de la langue maternelle⁷. L'implication des régions temporales gauches lors de la compréhension des phrases a été observé dans de nombreuses expériences d'imagerie fonctionnelle ((Mazoyer *et al.*, 1993; Tulving *et al.*, 1994; Bottini *et al.*, 1994; Stromswold *et al.*, 1996; Bookheimer *et al.*, 1998; Mellet *et al.*, 1998).

Certaines régions étaient d'autant plus activées que les phrases entendues étaient intelligibles. Dans leur étude Davis & Johnsrude (2003) ont mis en évidence des activations qui corrélaient avec le niveau d'intelligibilité des phrases (c'est à dire les régions permettant d'accéder au sens de la phrase) au niveau des gyri temporaux moyen et su-

⁷La langue maternelle désigne la première langue qu'un enfant apprend.

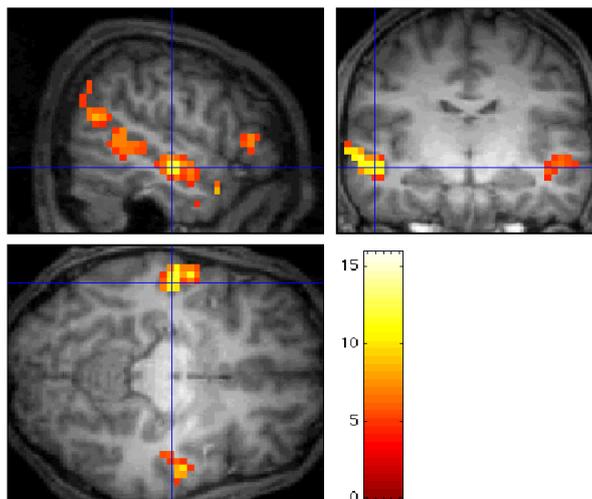


FIG. 1.7: Aires plus activées lors de l'écoute de phrases en français que par l'écoute d'une langue étrangère inconnue chez un locuteur de langue maternelle française (Pallier et al., 2003).

périeur (principalement dans l'hémisphère gauche), du gyrus frontal inférieur gauche et de l'hippocampe gauche (Figure 1.8 page suivante).

Grâce à de telles techniques d'étude, les chercheurs en neurolinguistique⁸ se sont donnés le défi de comprendre le rôle des différentes aires cérébrales mises en jeu lors de la compréhension du langage et de savoir si elles ont des fonctions distinctes correspondant aux différentes étapes du traitement des phrases telles que :

1. Décoder les sons de la parole⁹ (audition) ou les lettres (lecture¹⁰),
2. Identifier les mots,
3. Récupérer la structure syntaxique de la phrase (c'est à dire les relations entre les mots),
4. Calculer la représentation sémantique de la phrase (c'est à dire le sens des mots et de la phrase),

⁸La neurolinguistique est l'étude de l'ensemble des corrélations établies entre les caractéristiques cliniques et anatomopathologiques des maladies acquises de la parole et du langage d'une part, et leurs caractéristiques purement linguistiques d'autre part.

⁹Le traitement de la parole est détaillé en Annexe A page 147.

¹⁰Le modèle de la lecture est détaillé en Annexe B page 151.

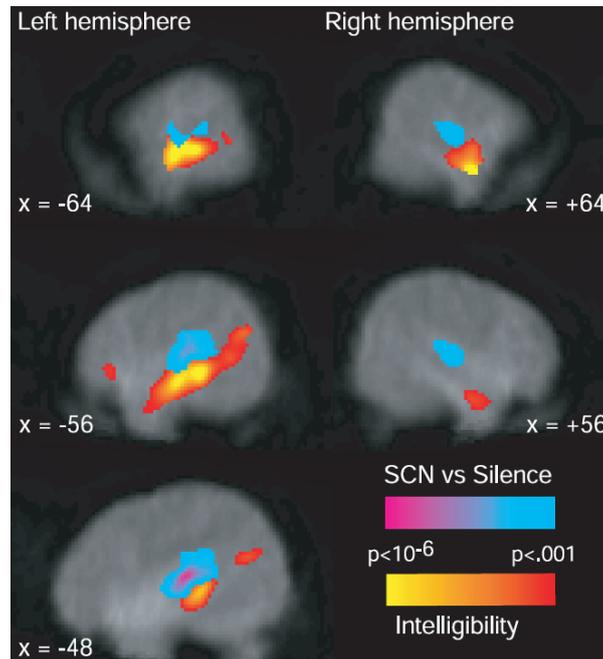


FIG. 1.8: Aires cérébrales montrant une augmentation d'activité lorsque les phrases sont de plus en plus intelligibles. Echelle rose-bleu : régions cérébrales activées par des sons (par rapport au silence). Echelle jaune-rouge : régions cérébrales activées selon l'intelligibilité des phrases. Jaune : phrases non-intelligibles et rouge : phrases intelligibles (Davis & Johnsrude, 2003)

5. Et enfin, intégrer toutes ces informations pour interpréter la phrase dans sa globalité.

Ce travail de thèse avait pour but de mettre en évidence les régions cérébrales impliquées dans les traitements sémantiques et surtout syntaxiques des phrases lues ou entendues par des sujets sains en utilisant l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle.

Pour réaliser ce travail, il était indispensable dans un premier temps, de comprendre les éléments de base de la linguistique¹¹. La section suivante en fait un bref descriptif.

¹¹Pour plus de clarté du manuscrit, une description plus complète des éléments essentiels à connaître sur les représentations syntaxiques est reporté en Annexe C page 167.

1.3 Les représentations syntaxiques en linguistique et psycholinguistique

L'une des caractéristiques majeures du langage humain est qu'il permet de construire un nombre infini de phrases à partir d'un nombre fini de règles de grammaire et de mots. Il est intéressant de noter que toutes les phrases (ou plutôt toutes les suites de mots) ne sont pas grammaticalement acceptables. Un processus inconscient et intuitif nous permet de juger instantanément si une phrase est correcte ou non grammaticalement. Si on considère les deux phrases suivantes :

- (a) Marc et Sophie sont à la plage.
- (b) *Marc et Sophie nagent la plage.

Tout locuteur du français peut décider sans effort que la phrase (a) est correcte, c'est à dire grammaticalement bien formée, tandis que la phrase (b) est agrammaticale. Ce jugement ne fait pas appel au sens des phrases mais seulement à leur acceptabilité structurelle. En effet, si on prend un exemple de Chomsky (1957) :

- (c) Des idées vertes incolores dorment furieusement.
- (d) Dorment incolores furieusement vertes des idées.

Bien que ces deux phrases soient dépourvues de signification, un locuteur du français trouve la phrase (c) plus acceptable que la phrase (d). C'est en se fondant sur les jugements des locuteurs et en essayant de caractériser les phrases acceptables d'une langue, que les linguistes ont été amené à attribuer à celles-ci des structures en constituants (ou syntagmes¹²) organisés hiérarchiquement, appelées structures syntaxiques. La

¹²Un syntagme est un groupe de mots qui se comporte comme une unité dans une phrase et qui a un sens cohérent.

structure syntaxique d'une phrase peut être représentée sous la forme d'un schéma appelé arbre syntaxique (exemple Figure 1.9).

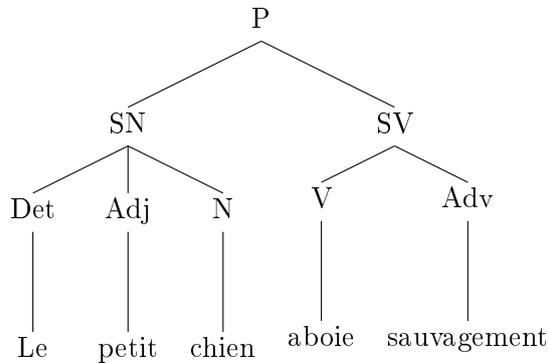


FIG. 1.9: Représentation syntaxique de la phrase *Le petit chien aboie sauvagement*. *P* : phrase ; *SN* : syntagme nominal ; *SV* : syntagme verbal ; *Det* : déterminant ; *N* : nom ; *V* : verbe ; *Adj* : adjectif ; *Adv* : adverbe.

Les syntagmes sont définis comme des groupements de mots qui respectent certaines règles¹³. L'élément central de chaque syntagme en détermine la nature : on parlera ainsi de syntagme nominal (SN), syntagme adjectival (SA), syntagme verbal (SV), syntagme prépositionnel (SP), syntagme adverbial (SAdv), ... Par exemple, dans la phrase *Le petit chien aboie sauvagement* (Figure 1.9), *le petit chien* est un syntagme nominal (SN) et *aboie sauvagement* est un syntagme verbal (SV).

Une des questions posées par les psycho et neurolinguistes est de savoir si ces structures syntaxiques sont utilisées lors de la compréhension des phrases ? Et si oui, de quelle façon et quelle(s) région(s) cérébrale(s) permettent leurs traitements ?

Tous les modèles de compréhension du langage supposent l'existence d'un analyseur syntaxique humain¹⁴. Son rôle est de regrouper les mots dans les phrases, puis de construire une structure syntaxique qui permet d'accéder au sens général de la phrase (Pinker, 1999) .

¹³Noam Chomsky en 1957 dans le cadre de sa Théorie Standard a introduit la notion de règles syntagmatiques. Ces règles permettent de générer des syntagmes ayant une structure syntaxique correcte dans la langue utilisée. Pour plus de détails voir Chomsky (1957); Pinker (1999) et l'Annexe C page 167.

¹⁴pour connaître les hypothèses actuelles sur le fonctionnement de l'analyseur syntaxique voir l'Annexe C page 167.

La question est de savoir si cet analyseur syntaxique assigne de façon automatique une structure syntaxique à une phrase et s'il le fait de façon superficielle ?

Pour appréhender cette question les psycholinguistes ont voulu montrer l'influence des structures syntaxiques en utilisant le phénomène d'adaptation¹⁵.

Dans des conversations naturelles, ou lors de tâches de production du langage, les personnes ont tendance à réutiliser les structures syntaxiques qu'ils ont récemment entendues ou rencontrées (voir Pickering & Branigan, 1999 et Branigan, 2006 pour revue). Par exemple Bock (1986) a constaté que les participants étaient plus susceptibles de décrire une image en utilisant une phrase passive s'ils venaient de lire une phrase passive plutôt qu'active juste avant. En utilisant une tâche de description d'images, Smith & Wheeldon (2001) ont observé que le temps de latence pour produire une phrase peut également être diminué par l'adaptation syntaxique. Ce phénomène d'adaptation syntaxique pourrait refléter le fait que l'utilisation répétée de procédures ou de représentations réduirait le "coût" de traitement et augmenterait la vitesse de traitement de ce qui est répété (Levelt & Kelter, 1982).

La plupart des études antérieures sur l'adaptation syntaxique utilisaient principalement de l'adaptation en production-production (Bock, 1986; Pickering & Branigan, 1998.; Potter & Lombardi, 1998; Branigan *et al.*, 2000a; Smith & Wheeldon, 2001; Corley & Scheepers, 2002; Branigan *et al.*, 2003; Gries, 2005; Szmrecsanyi, 2005; Cleland & Pickering, 2006). L'efficacité de l'adaptation en production est l'argument fort en faveur de l'idée que la structure syntaxique des phrases est calculée lors de la planification du discours. En effet, lorsque l'on parle, toutes les règles de grammaire sont utilisées afin de produire une phrase correcte. Par contre, une des questions que l'on peut se poser est : "Est-elle également calculée lors de la compréhension du discours ?"

Quelques études ont montré de l'adaptation en compréhension-production lorsque des participants entendaient ou lisaient les phrases avant d'en produire de nouvelles

¹⁵Le phénomène d'adaptation est basé sur la répétition d'un stimulus ou d'une de ses caractéristiques.

(Potter & Lombardi, 1998; Branigan *et al.*, 2000b; Bock *et al.*, 2007).

Branigan *et al.* (2000b, 2007) ont montré que des participants avaient tendance à décrire des images avec des phrases de structures syntaxiques identiques à celles utilisées par le participant précédent. De plus Haywood *et al.* (2005) ont constaté que les participants avaient tendance à utiliser des structures syntaxiques qui facilitaient la compréhension de son discours par son auditoire. Ces études suggèrent un niveau partagé de représentation syntaxique en compréhension et en production, et donc prédisent l'existence d'adaptation syntaxique en compréhension de phrases.

Cependant, les données antérieures sur l'adaptation en compréhension-compréhension sont assez rares : seules quelques travaux l'ont étudiée (Mehler & Carey, 1967; Frazier *et al.*, 1984; Noppeney & Price, 2004; Branigan *et al.*, 2005). Dans leur étude, Mehler et Carey ont fait écouter à des participants des blocs de phrases ayant la même structure syntaxique. Ils ont constaté que la perception d'une phrase présentée dans un bruit blanc¹⁶ à la fin de chaque bloc était d'autant mieux perçue que celle-ci était précédée de phrases ayant la même structure.

L'étude de Frazier *et al.* (Frazier *et al.*, 1984) est potentiellement intéressante mais elle montre un effet d'adaptation dans un cas très particulier de phrases coordonnées. En effet, les phrases coordonnées sont connues pour entraîner des contraintes particulières de parallélisme¹⁷ à l'égard de simples séquences de phrases. Par exemple, dans le contexte suivant : “Je crois que Marie a été embrassée par Bill et ...” la lecture d'une phrase passive est facilitée.

D'après les résultats présentés précédemment, il est vraisemblable que ces struc-

¹⁶Un bruit blanc est un bruit dont la densité spectrale de puissance est constante quelle que soit sa fréquence. Le son produit lors de l'effet de “neige” sur un téléviseur non réglé est un bon exemple de bruit blanc.

¹⁷Le parallélisme est une succession de constructions syntaxiques identiques ou semblables, la construction répétée pouvant être une phrase, un vers ou une partie de ceux-ci. En voici des exemples : *Craintive je te sers, aveugle je te suis* (Voltaire), *L'orage est dans ma voix, l'éclair est dans ma bouche* (Vigny) ou encore *Dieu est l'auteur de la pièce, Satan est le directeur du théâtre* (Hugo)

tures syntaxiques soient employées en production de la parole. Par contre, lorsque l'on comprend des phrases, on peut se demander comment le cerveau analyse ces structures syntaxiques et quelles sont les régions cérébrales impliquées dans ce traitement.

La section suivante présente les études qui se sont déjà penchées sur cette question.

1.4 Les représentations syntaxiques en neurolinguistique

1.4.1 La variation de la complexité des phrases

L'étude princeps de Just *et al.* (1996), utilisant l'IRMf, a montré l'existence d'une modulation de l'activité des régions frontales inférieures (aire de Broca) et temporales latéro-supérieures de l'hémisphère gauche en fonction de la complexité syntaxique des phrases (Figure 1.10). Cette complexité est caractérisée par la présence ou non de propositions relatives dans la phrase. Par exemple, la phrase (4) est considérée comme moins complexe que la phrase (5) :

(4) Le journaliste a agressé le ministre et admis son erreur.

(5) Le journaliste qui a agressé le ministre a admis son erreur.

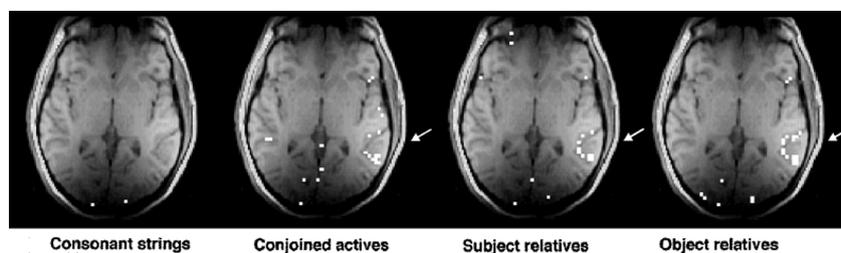


FIG. 1.10: Implication de l'aire de Broca et des régions temporales latéro-supérieures gauches lors du traitement de phrases complexes (par rapport au traitement de phrases simples) (Just et al., 1996).

Le fait de comparer des phrases simples à des phrases plus complexes permet d'isoler la syntaxe de la sémantique en supposant qu'il n'y ait pas de différence dans le traitement sémantique entre les phrases plus ou moins complexes.

Plusieurs façons de faire varier la complexité des phrases ont été utilisées, par

exemple en utilisant des phrases avec des relatives objet ou des relatives sujet¹⁸ (Ben-Shachar *et al.*, 2004), des phrases avec branchement à droite ou avec enchâssement¹⁹ (Stromswold *et al.*, 1996), des phrases avec un ordre canonique ou non-canonique²⁰ (Ben-Shachar *et al.*, 2004; Wartenburger *et al.*, 2004).

La plupart des études manipulant la complexité des structures syntaxiques ont confirmé l'implication des régions frontales et temporales gauches dans le traitement syntaxique, mais elles ont néanmoins retenu essentiellement l'implication de l'aire de Broca (Stowe *et al.*, 1998; Keller *et al.*, 2001; Cooke *et al.*, 2002; Stromswold *et al.*, 1996; Caplan *et al.*, 1999; Bornkessel *et al.*, 2005; Grewe *et al.*, 2005)(Figure 1.11).

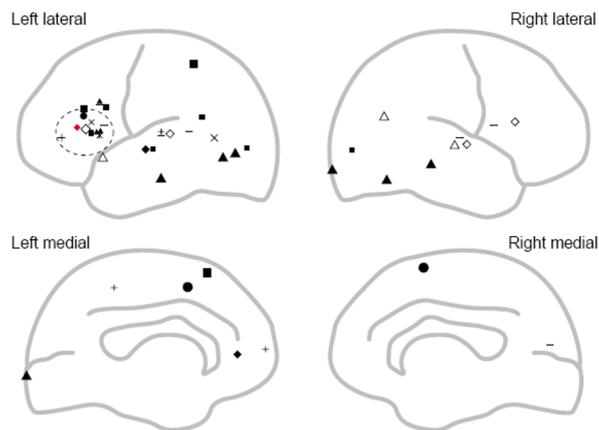


FIG. 1.11: Méta-analyses des études qui comparaient les activations aux phrases complexes par rapport aux phrases simples (Kaan & Swaab, 2002).

Ben-Shachar *et al.* (2004) proposent que l'aire de Broca est impliquée dans les transformations ; c'est à dire lorsqu'il y a du mouvement dans les phrases (par exemple

¹⁸Une phrase relative comporte un constituant enchâssé à l'intérieur de cette phrase par l'intermédiaire d'un pronom relatif (qui, que, quoi, dont, où en français). Exemple de phrase relative objet : *L'homme que cette femme aime parle à un enfant.* Exemple de phrase relative sujet : *L'homme qui aime cette femme parle à un enfant.*

¹⁹Pour voir un exemple de phrases à branchement à droite ou de phrases avec enchâssement, voir la Figure 3.1 page 91 de cette thèse.

²⁰La phrase canonique est une phrase active simple, neutre sur tous les plans, avec les mots dans l'ordre le plus simple : par exemple sujet-verbe-complément. La phrase non-canonique est complexe et peut avoir subi des transformations, comme par exemple dans une phrase passive.

dans les phrases clivées du type *c'est le chien de la voisine que mon père trouve beau, c'est le chien de la voisine* a été déplacé en première position dans la phrase clivée alors que dans la phrase canonique de base ce constituant se trouvait en dernière position : *Mon père trouve beau le chien de la voisine.*) Ils trouvent aussi une plus forte activation dans la partie postérieure des sillons temporaux supérieurs bilatéraux lorsque les sujets écoutent des phrases avec des transformations et dans la partie du sillon temporel supérieur gauche lorsque le nombre d'arguments requis par le verbe augmente (par exemple dans la phrase *Nicole mange une pomme*, le verbe *manger* compte deux arguments : *Nicole* et *une pomme*).

Une étude de Wartenburger *et al.* (2004) a examiné le rôle de l'aire de Broca dans les traitements des phrases canoniques (sans mouvement) et non-canoniques (avec mouvement). Et contrairement à l'étude de Ben-Shachar *et al.* (2004) ils ont montré que l'aire de Broca était impliquée dans le traitement syntaxique "en général", par exemple lors d'un jugement sur la grammaticalité d'une phrase, et pas dans le traitement des transformations syntaxiques (Figure 1.12 page suivante). Wartenburger *et al.* (2004) font remarquer que dans l'étude de Ben-Shachar *et al.* (2004) les transformations et la complexité du verbe (variant selon le nombre d'arguments qu'il requiert) ne sont pas clairement dissociés et cela pourrait expliquer la différence dans leurs résultats.

L'étude de Stowe *et al.* (1998), a montré que l'aire de Broca était activée de façon semblable pour le traitement de phrases complexes et pour le traitement de listes de mots (Figure 1.13 page 36). Cette région n'est donc pas activée spécifiquement pour le traitement syntaxique mais jouerait plutôt un rôle dans la mémoire de travail verbale pour maintenir l'information sur les structures des phrases aussi bien que sur les items sémantiques.

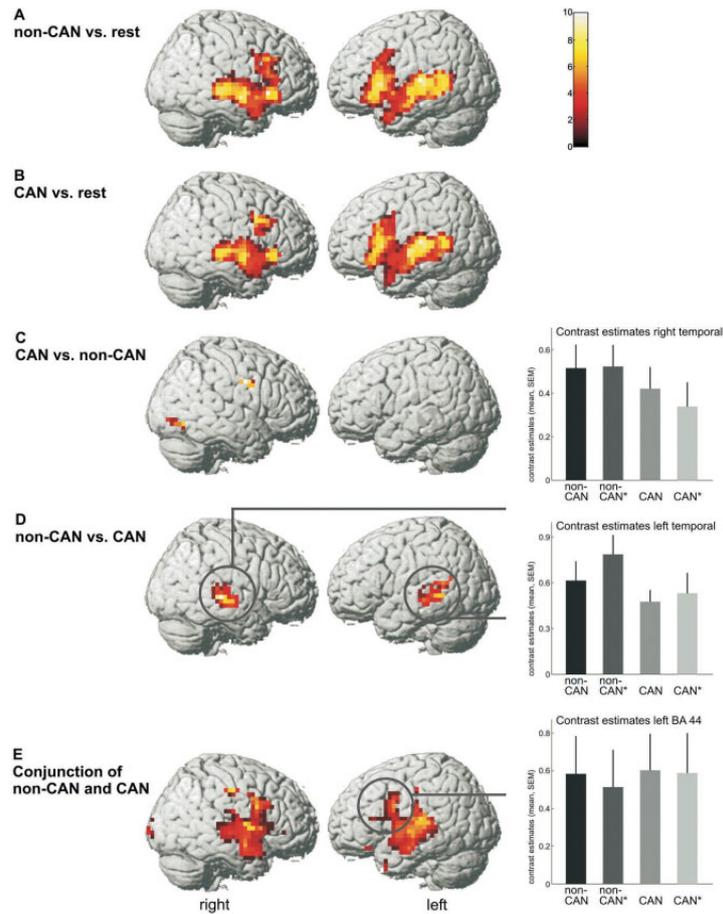


FIG. 1.12: Comparaison des activations aux phrases non-canoniques (A) et canoniques (B) par rapport au silence. (C) Comparaison des phrases canoniques par rapport aux phrases non-canoniques. (D) Comparaison des phrases non-canoniques par rapport aux phrases canoniques. (E) Conjonction des activations aux phrases non-canoniques et canoniques. Les graphiques correspondent à la valeur des paramètres estimés pour chacune des conditions. non-CAN : Phrases non-canoniques correctes, non-CAN* : Phrases non-canoniques incorrectes, CAN : Phrases canonique correctes et CAN* : Phrases canonique incorrectes (Wartenburger et al., 2004).

Fiebach *et al.* (2005) sont en accord avec cette interprétation et suggèrent que l'aire de Broca jouerait un rôle dans le traitement syntaxique lorsque la charge en mémoire de travail est importante.

Une étude de Santi & Grodzinsky (2007) propose aussi qu'il y ait une interaction entre le traitement syntaxique et la charge en mémoire de travail lors du traitement

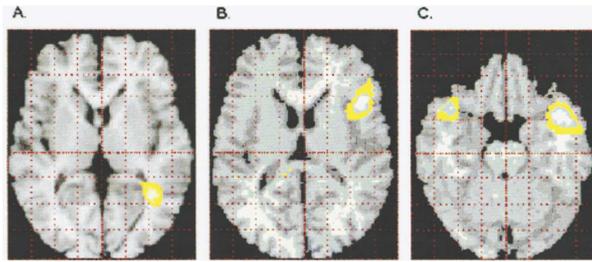


FIG. 1.13: (A) Régions cérébrales activées lorsque la complexité de la phrase augmente (partie postérieure des gyri temporaux supérieur et moyen gauche). (B) Régions cérébrales activées lorsque la charge en mémoire de travail augmente (région frontale operculaire gauche et insula). (C) Régions cérébrales activées dans le contraste “Phrases vs Listes de mots” (Lobe temporal antérieur bilatéral) (Stowe et al., 1998).

des phrases. Les phrases avec mouvement, donc plus complexes que les phrases sans mouvement, engendrent un plus grand besoin de la mémoire de travail (Figure 1.14).

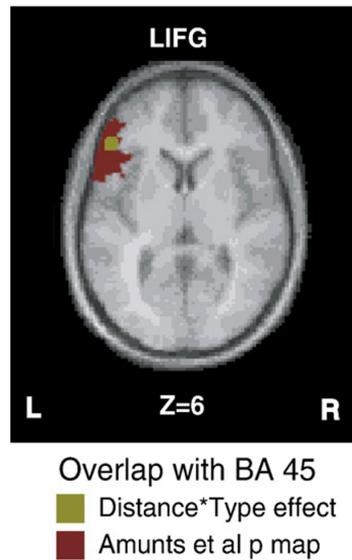


FIG. 1.14: Le gyrus frontal inférieur gauche est représenté en vert et la carte de probabilité de BA 45 est présentée en rouge. Un effet du mouvement et de la distance entre les mots est à noter dans le gyrus frontal inférieur gauche (Santi & Grodzinsky, 2007).

La complexité des phrases est une première approche pour étudier le traitement

syntactique, mais comme nous l'avons vu plusieurs paramètres peuvent être confondus, comme la charge en mémoire de travail ou encore la tâche demandée aux participants. D'autres paradigmes expérimentaux ont été utilisés pour étudier les régions cérébrales impliquées dans le traitement syntaxique.

1.4.2 Les phrases et les non-phrases

Une seconde approche consiste à comparer les aires activées par des phrases et des non-phrases comme par exemple des listes de mots. Les études utilisant ce contraste (Mazoyer *et al.*, 1993; Stowe *et al.*, 1999; Vandenberghe *et al.*, 2002; Humphries *et al.*, 2006) n'ont pas mis clairement en évidence l'activation de l'aire de Broca, ce qui suggère que cette aire n'est pas nécessairement impliquée dans les opérations syntaxiques, sauf quand celles-ci demandent une forte utilisation de la mémoire de travail ou lorsqu'il y a du mouvement dans les phrases (voir section précédente). Ces études ont mis en évidence les régions du lobe temporal antérieur, souvent bilatérales, et les gyri temporaux moyen et supérieur (Figure 1.15, Kaan & Swaab, 2002).

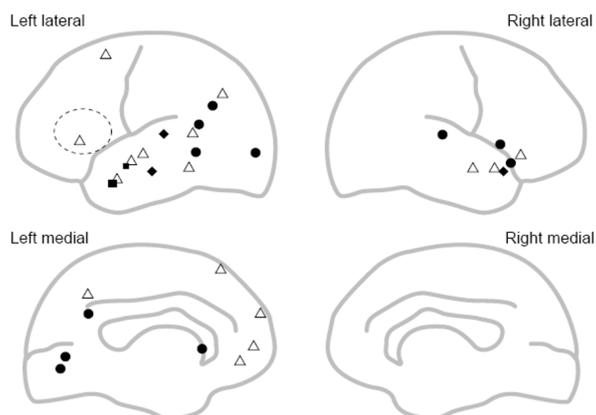


FIG. 1.15: Méta-analyses des études qui comparaient les activations aux phrases par rapport aux listes de mots (Kaan & Swaab, 2002).

Deux autres études utilisant la même comparaison (phrases versus listes de mots) ont mis en évidence l'implication du gyrus temporal antérieur gauche dans le traitement des phrases, aussi bien dans la modalité visuelle (Vandenberghe *et al.*, 2002) que dans la modalité auditive (Humphries *et al.*, 2006).

Vandenberghe *et al.* (2002) ont essayé de dissocier les régions cérébrales impliquées dans le traitement syntaxique de celles impliquées dans le traitement sémantique. Pour cela ils ont croisé deux facteurs : le facteur sémantique et le facteur syntaxique afin de produire 4 conditions : des phrases normales (sémantiquement et syntaxiquement correctes), des phrases syntaxiquement correctes mais comprenant des anomalies sémantiques, des phrases sémantiquement correctes mais comprenant des anomalies syntaxiques et des phrases sémantiquement et syntaxiquement incorrectes. Ils ont mis en évidence des augmentations d'activation dans le pôle temporal antérieur gauche pour les phrases normales par rapport à leur version mélangées, c'est à dire sémantiquement correctes et syntaxiquement incorrectes (Figure 1.16). Cette région serait impliquée dans le traitement syntaxique des phrases.

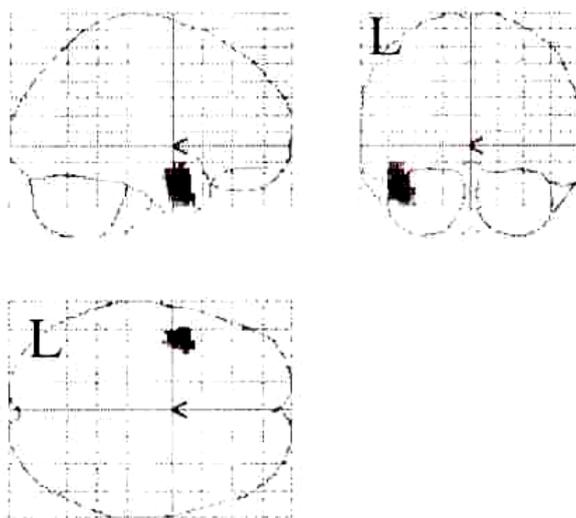


FIG. 1.16: Implication du gyrus temporal antérieur gauche lors du traitement de phrases normales par rapport à leur version mélangée (listes de mots) dans la modalité visuelle (Vandenberghe *et al.*, 2002).

Humphries *et al.* (2006) ont utilisé une approche relativement semblable à celle de Vandenberghe *et al.* (2002), mais ils ont ajouté deux conditions formées de pseudomots²¹ dans des phrases syntaxiquement correctes ou non. Ils ont obtenu six conditions différentes (Table 1.1). La Figure 1.17 page suivante et la Figure 1.18 page 41 présentent leurs résultats. Ils ont montré qu'une partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche est impliquée dans le traitement syntaxique des phrases (phrases versus listes de mots, bleu). Cette région était fortement influencée par la structure syntaxique des stimuli que ce soit dans des phrases composées de mots ou de pseudomots (Figure 1.17 page suivante).

Semantically congruent sentence	the man on a vacation lost a bag and a waller
Semantically congruent word list	on vacation lost then a and bag wallet man then a
Semantically random sentence	the freeway on a pie watched a house and a window
Semantically random word list	a ball the a the spilled librarian in sign through fire
Pseudoword sentence	the solims on a sonting grilloted a yome and a sovir
Pseudoword word list	rooned the sif into lilif the and the foig aurene to

TAB. 1.1: *Les six conditions expérimentales de l'expérience de Humphries et al. (2006).*

La partie postérieure du sillon temporal supérieur et le gyrus temporal moyen sont impliqués dans le traitement sémantique (sur la Figure 1.18 page 41 régions représentées en rouge), une partie antérieure du gyrus temporal inférieur gauche est impliquée dans le traitement syntaxique (sur la Figure 1.18 page 41 régions représentées en bleu) et le gyrus angulaire gauche et la partie antérieure des gyrus et sillon temporaux inférieur gauches sont impliqués dans le traitement syntaxique et sémantique des phrases (sur la Figure 1.18 page 41 régions représentées en jaune).

D'autres études ont comparé les régions cérébrales impliquées lors du traitement

²¹Les pseudomots ont une prononciation et une orthographe possible dans la langue étudiée mais n'ont aucune signification.

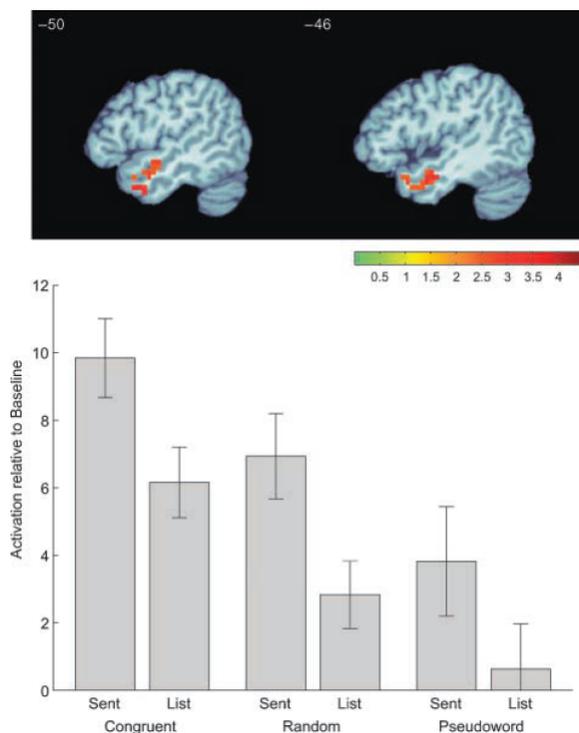


FIG. 1.17: *Haut* : Carte d'activation de l'effet syntaxique principal. La région temporale antérieure gauche présente une plus forte activation aux phrases qu'aux listes de mots, quelque soit la condition et l'implication sémantique. *Bas* : Le graphique présente le signal BOLD moyen dans les différentes conditions. 1^{ère} colonne : Phrases sémantiquement congruentes; 2^{ème} colonne : Listes de mots sémantiquement congruents; 3^{ème} colonne : Phrases sémantiquement incongruentes; 4^{ème} colonne : Listes de mots sémantiquement incongruents; 5^{ème} colonne : Phrases formées de pseudomots; 6^{ème} colonne : Listes de pseudomots (Humphries et al., 2006).

de phrases composées de mots avec celles composées de pseudomots (phrases dites en *Jabberwocky*²²) (Mazoyer *et al.*, 1993; Friederici *et al.*, 2000).

Dans leur étude, Friederici *et al.* (2000) ont fait écouter à des participants des phrases contenant des structures syntaxiques correctes (formées de mots réels ou de pseudomots) et des listes de mots (formées de mots réels ou de pseudomots). Ils ont montré une implication des régions temporales bilatérales et de la portion profonde operculaire du gyrus frontal inférieur gauche lorsqu'un traitement syntaxique était à réaliser

²²Le *Jabberwocky* correspond à des phrases ayant aucun sens et formées de pseudomots.

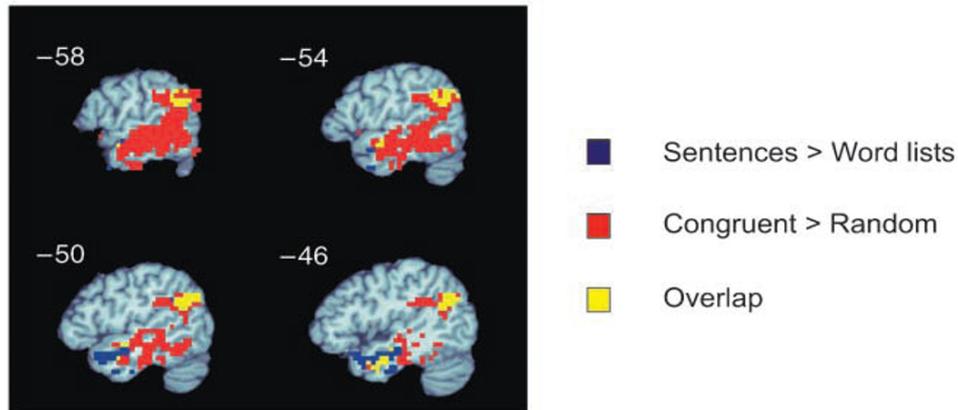


FIG. 1.18: Régions cérébrales impliquées dans le traitement syntaxique (phrases > listes de mots, bleu), dans le traitement sémantique des phrases (rouge) ou dans les deux traitements (jaune) (Humphries et al., 2006).

même si les phrases étaient composées de pseudomots (Figure 1.19). D'autres études ont également reproduit ce résultat (Figure 1.20 page suivante, Kaan & Swaab, 2002).

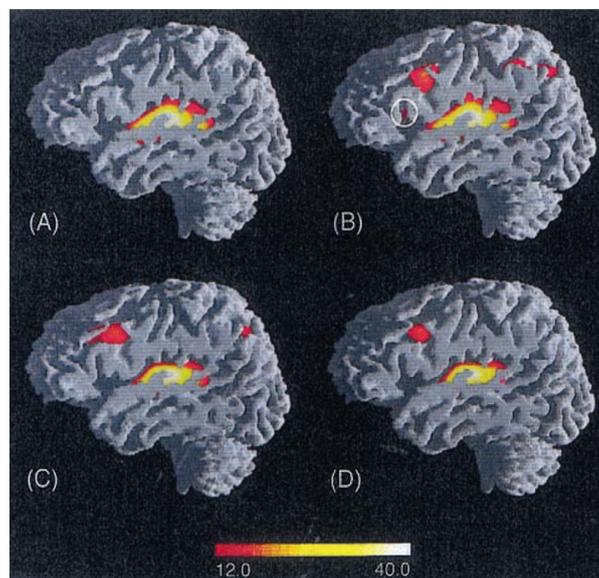


FIG. 1.19: Activations cérébrales lors de l'écoute de parole normale (A), de parole syntaxiquement correcte (B), de listes de mots réels (C) et de listes de pseudomots (D). L'activation de la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche est entouré par un cercle blanc sur l'image (B) (Friederici et al., 2000).

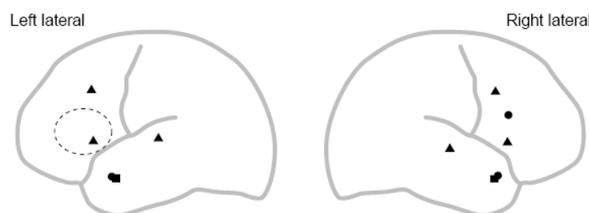


FIG. 1.20: Méta-analyses des études qui regardaient les activations aux phrases contenant des pseudomots (*jabberwocky*) et qui avaient une syntaxe correcte (Kaan & Swaab, 2002).

1.4.3 Les violations syntaxiques et sémantiques

Une troisième approche pour étudier le traitement syntaxique consiste à comparer des phrases contenant des violations syntaxiques ou sémantiques avec des phrases correctes.

Friederici *et al.* (2003) ont fait écouter à des participants des phrases contenant des anomalies syntaxiques ou sémantiques. Les deux types d'erreurs recrutent une large portion des régions temporales supérieures. Les anomalies sémantiques recrutent la portion moyenne des régions temporales supérieures bilatérales et le cortex insulaire bilatéral. Les anomalies syntaxiques recrutent la partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche, la partie operculaire du gyrus frontal postérieur gauche et le putamen (Figure 1.21 page suivante).

Un des problèmes posés par ces études est que la violation syntaxique a des conséquences sur le sens des phrases, ce qui fait que l'étude de la syntaxe n'est pas réellement indépendante de celle de la sémantique. Pour pallier à cela, une des possibilités est d'utiliser des pseudomots dans les phrases contenant des violations syntaxiques. En utilisant cette méthode Moro *et al.* (2001) ont trouvé des activations dans l'aire de Broca et dans les régions miroir frontales inférieures droites. Cependant, une autre étude (Indefrey

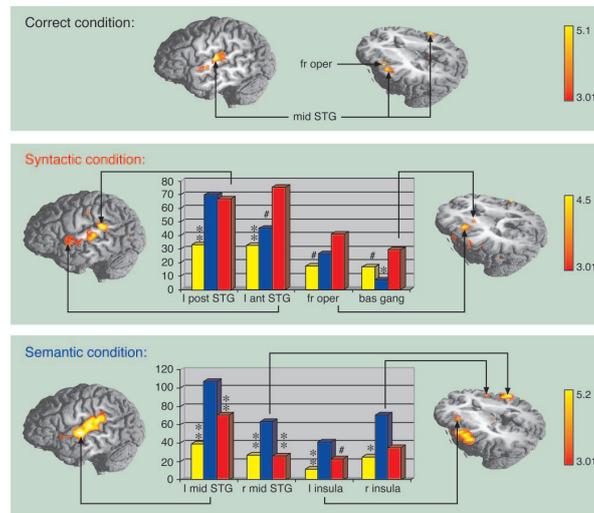


FIG. 1.21: Aires cérébrales mises en jeu lors du traitement de phrases correctes (en haut), de phrases avec des anomalies syntaxiques (au milieu) et de phrases avec des anomalies sémantiques (en bas). Les histogrammes correspondent aux activations (dans une valeur arbitraire) des différentes conditions dans les régions d'intérêt. Jaune : phrases correctes, bleu : violations sémantiques et rouge : violations syntaxiques. *fr oper* : Operculum frontal, *mid STG* : partie moyenne du gyrus temporal supérieur, *l ant STG* : partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche, *r mid STG* : partie moyenne du gyrus temporal supérieur gauche, *l STG* : gyrus temporal supérieur gauche et *l insula* : cortex insulaire gauche (Friederici et al., 2003).

et al., 2001b), qui faisait répéter ou corriger à des sujets des phrases grammaticalement incorrectes formées de pseudomots, a fait ressortir seulement le gyrus frontal médian gauche.

La distinction entre le traitement syntaxique et sémantique est à l'heure actuelle peu claire. Une étude de Rodd *et al.* (2005) a fait varier l'ambiguïté sémantique de phrases ayant les mêmes propriétés phonologiques²³, syntaxiques et prosodiques²⁴ et ils ont mis en évidence l'implication de la partie postérieure du gyrus temporal inférieur gauche, mais également des gyri frontaux inférieurs bilatéraux lorsque les phrases étaient très ambiguës (Figure 1.22 page suivante).

²³La phonologie étudie l'organisation des sons dans une langue.

²⁴La prosodie est l'ensemble des phénomènes qui échappent au découpage de la parole en phonèmes : c'est à dire l'accent, la quantité et l'intonation.

Ces résultats montrent que le rôle des gyri frontaux inférieurs dans le traitement syntaxique ou sémantique des phrases n'est pas encore clairement défini.

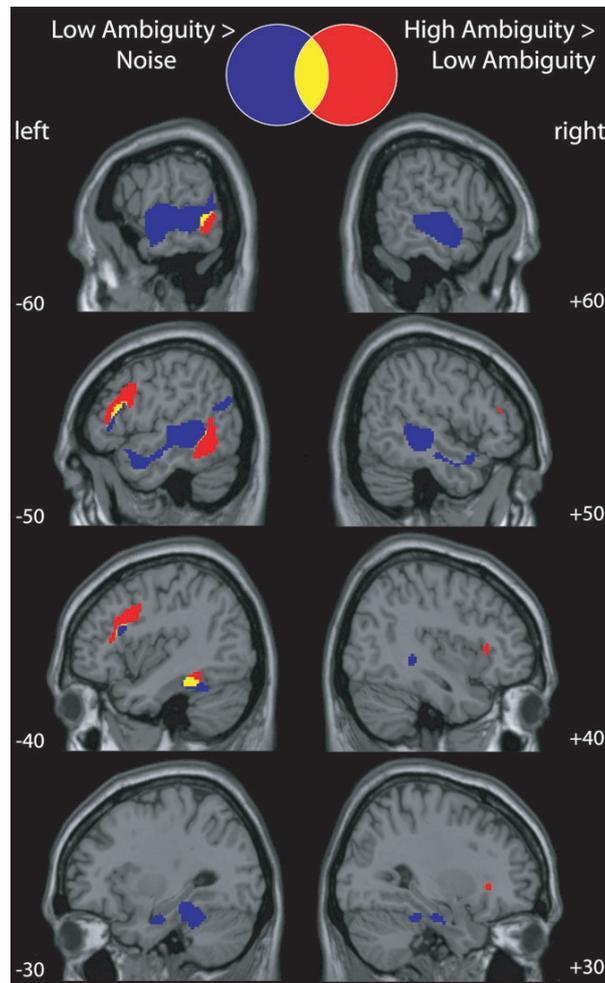


FIG. 1.22: Régions cérébrales activées lors du traitement de phrases ambiguës. Bleu : Traitement de phrase peu ambiguës; Rouge : Traitement de phrases très ambiguës et Jaune : Intersection des deux traitement (Rodd et al., 2005).

D'autres études ont utilisé des grammaires artificielles pour étudier la syntaxe.

Friederici *et al.* (2006a) ont réalisé une étude où les participants devaient apprendre deux types de grammaires différentes : une du type $(AB)^n$, que l'on nomme grammaire à état fini et une grammaire du type A^nB^n qui a une structure en constituant (Figure 1.23 page suivante). Les participants devaient ensuite écouter des "phrases" qui contenaient

ou pas des violations dans ces deux types de grammaires artificielles.

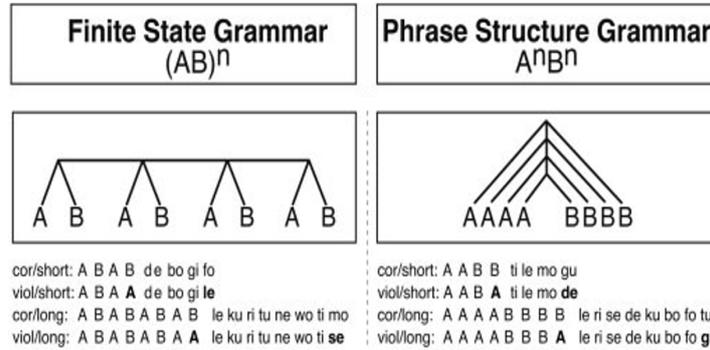


FIG. 1.23: Structure de deux types de grammaire $(AB)^n$ et A^nB^n . La catégorie A correspond à des syllabes contenant les voyelles “i” ou “e” (de, gi, le, ri, se, ne, ti et mi) et la catégorie B correspond à des syllabes contenant les voyelles “o” ou “u” (bo, fo, ku, mo, pu, wo, tu et gu). les mêmes syllabes sont utilisées dans les deux types de grammaire. La position des violations grammaticales changent aléatoirement. Exemples de séquences correctes (cor) ou avec des violations (viol, violation en gras) (Friederici et al., 2006b).

En contrastant ces deux grammaires ils ont montré que les violations de la grammaire $(AB)^n$ engendrait une activation dans l’aire de Broca alors que des violations de la grammaire A^nB^n engendrait une activation uniquement dans la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche (Figure 1.24 page suivante). L’hypothèse formulée serait que la région operculaire gèrerait les relations locales que l’on retrouve dans la grammaire A^nB^n alors que l’aire de Broca gèrerait les relations à plus grande distance retrouvées dans la grammaire $(AB)^n$.

1.4.4 L’adaptation syntaxique

Certaines expériences qui ont tenté d’étudier le traitement syntaxique des phrases ont été remises en cause dans la revue de Kaan & Swaab (2002), car le traitement syntaxique était généralement confondu avec le traitement sémantique ainsi qu’avec la charge en mémoire de travail. Un autre moyen pour montrer l’influence des structures

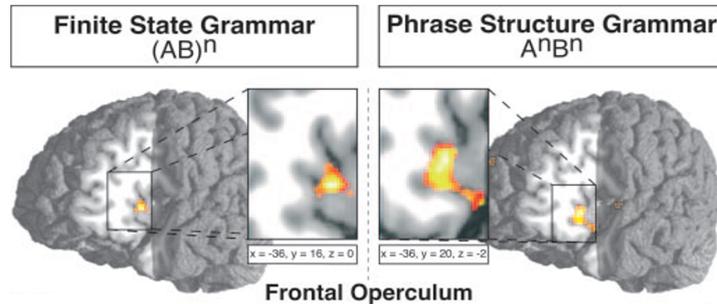


FIG. 1.24: Régions cérébrales activées lors des violations de deux types de grammaires : $(AB)^n$ (à gauche) et $A^n B^n$ (à droite) (Friederici et al., 2006a).

syntactique sans les confondre avec le traitement sémantique ou la charge en mémoire de travail est d'utiliser le paradigme d'adaptation.

Un dessin expérimental relativement proche de celui de Mehler & Carey (1967) a été utilisé par Noppeney & Price (2004) : les participants devaient lire une série de quatre phrases qui avaient soit une structure syntaxique semblable soit une structure syntaxique différente. Ils ont observé des temps de lecture plus rapides lorsque les structures syntaxiques des quatre phrases étaient semblables. De plus, ils ont également réalisé cette expérience en IRMf avec un paradigme d'adaptation. Les participants devaient lire passivement les mêmes phrases que celles utilisées dans l'expérience comportementale. Ils ont constaté que lorsque la syntaxe des phrases était répétée, l'activité cérébrale était réduite dans une zone de la partie antérieure du lobe temporal gauche (Figure 1.25 page suivante). Ce résultat correspond à la proposition selon laquelle la partie antérieure du lobe temporal supérieur gauche joue un rôle dans la construction de la structure syntaxique lors de la compréhension de phrases (Friederici, 2002; Mazoyer *et al.*, 1993).

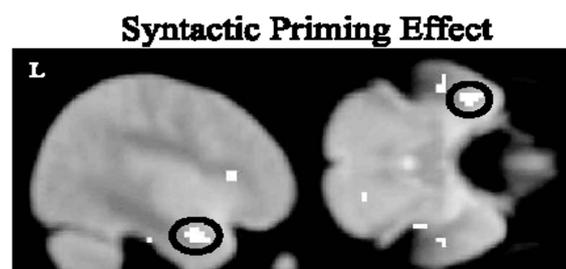


FIG. 1.25: Régions cérébrales présentant un effet d'adaptation syntaxique lors de la lecture de phrases (Noppeney & Price, 2004).

1.5 Le traitement syntaxique : Où en sommes-nous ?

Les études présentées précédemment sur le traitement syntaxique n'ont pas permis de mettre en évidence de façon certaine une ou des régions cérébrales permettant le traitement syntaxique des phrases. Les régions frontales et temporales de l'hémisphère gauche semblent bien y jouer un rôle, mais à l'heure actuelle il n'est pas encore clairement défini.

Dans une revue, Grodzinsky & Friederici (2006) tentent de détailler les différentes régions cérébrales impliquées dans le traitement syntaxique. Pour cela ils distinguent trois phases dans le traitement du langage :

1. Une phase initiale correspondant à la construction de structures locales (c'est à dire en constituant) en se basant sur les différentes catégories lexicales des mots,
2. Une deuxième phase correspondant à la mise en place des relations (syntaxiques et sémantiques) entre les constituants, c'est à dire "Qui fait quoi à qui, pourquoi, comment,..."
3. Une troisième phase correspondant à l'intégration finale de toutes les informations pour aboutir au sens final de la phrase.

Lors de la première phase du traitement syntaxique des phrases, le gyrus frontal inférieur gauche dans sa partie operculaire serait impliqué lors du calcul des structures en constituants (ou syntagmes), c'est à dire dans la construction des structures locales de la phrase (Friederici *et al.*, 2006a). La partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche serait impliqué lors du traitement de violations dans les syntagmes locaux et également dans la construction des structures locales des constituants (Mazoyer *et al.*, 1993; Stowe *et al.*, 1999; Humphries *et al.*, 2001; Vandenberghe *et al.*, 2002; Humphries *et al.*, 2005, 2006).

L'aire de Broca (correspondant aux aires de Brodmann²⁵ (BA) 44 et 45) serait

²⁵Les aires de Brodmann sont des délimitations du cortex du cerveau humain définies par Korbinian

impliquée lors de la deuxième phase du traitement, c'est à dire lors de la mise en place des relations syntaxiques et sémantiques (Bornkessel *et al.*, 2005). Elle serait d'autant plus activée que les phrases à traiter sont complexes, c'est à dire avec du mouvement dans la phrase et donc avec une grande charge en mémoire de travail (Just *et al.*, 1996; Stromswold *et al.*, 1996; Caplan *et al.*, 1998, 1999, 2000; Keller *et al.*, 2001). Cela serait en accord avec les hypothèses de Hagoort *et al.* (2004) qui suppose que le cortex préfrontal inférieur gauche (BA45 et 47) serait aussi bien impliqué dans l'intégration sémantique que dans les connaissances générales du monde nécessaires lors de cette deuxième phase du traitement des phrases avant d'aboutir à l'intégration finale de la phrase.

Lors de la phase d'intégration finale, le gyrus temporal supérieur gauche (gyrus angulaire) serait impliqué dans l'intégration des informations lexicales et syntaxiques (Vandenberghe *et al.*, 2002; Ben-Shachar *et al.*, 2003; Bornkessel *et al.*, 2005; Friederici *et al.*, 2006b; Humphries *et al.*, 2006).

En se basant sur de nombreuses études, Grodzinsky & Friederici (2006) concluent qu'en fonction de ce que l'on étudie dans le traitement syntaxique et/ou sémantique on peut trouver aussi bien des implications des régions frontales que des régions temporales (Figure 1.26 page suivante). Contrairement à ce que l'on pensait il y a quelques années, l'aire de Broca n'est pas la seule impliquée dans le traitement syntaxique des phrases, le pôle temporal y joue également un rôle important.

Brodmann sur une base cytoarchitectonique. Cela signifie que les aires correspondent à l'organisation structurale apparente du cortex (nombre de couches cellulaires, épaisseurs des couches, arborisation dendritique, ...); Ainsi, chaque région du cortex ayant la même organisation cellulaire a un numéro allant de 1 à 52.

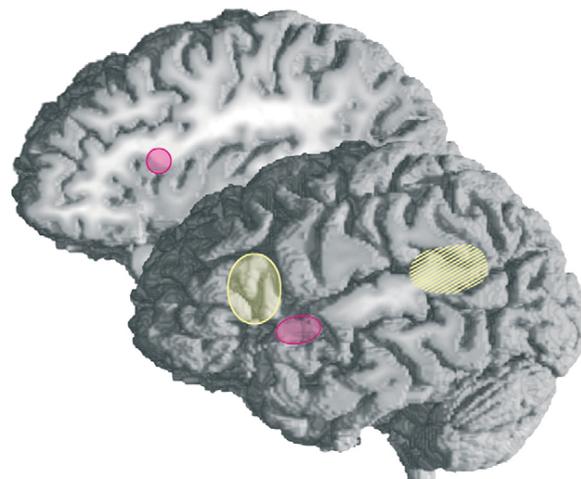


FIG. 1.26: Aires cérébrales activées pendant le traitement syntaxique des phrases. La région frontale operculaire et la partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche sont impliquées dans la construction de la structure locale de la phrase (rose), L'aire de Broca (BA 44 et BA 45) est impliquée dans la mise en place des relations syntaxiques et sémantiques dans la phrase (jaune), et la partie postérieure des gyrus et sillon temporaux supérieurs sont impliqués dans l'intégration des informations lexicales et syntaxiques (jaune hachuré) (Grodzinsky & Friederici, 2006).

A l'heure actuelle, il n'y a toujours pas de réponse claire à la question "le cerveau analyse-t-il les structures syntaxiques des phrases systématiquement et automatiquement et si oui comment et où cela se passe-t-il?". Construire des protocoles expérimentaux qui permettent de distinguer clairement toutes les étapes du traitement du langage n'est pas une tâche facile. C'est pour cette raison qu'à l'heure actuelle les traitements syntaxiques, sémantiques ou le rôle de la mémoire de travail ne sont pas clairement dissociés.

L'objectif général de cette thèse était d'examiner les régions cérébrales impliquées dans les traitements sémantiques et surtout syntaxiques des phrases.

Pour répondre à cet objectif et pour apporter de nouvelles connaissances dans ce domaine, nous avons réalisé quatre expériences d'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle et une expérience comportementale chez des participants sains (c'est à dire ne présentant pas de lésions ni d'autres pathologies).

Ces expériences étaient en grande partie basées sur l'observation des effets d'adap-

tation après la répétition d'un stimulus ou d'une de ses caractéristiques. Ces effets permettent de mettre en évidence une diminution d'activation dans les régions cérébrales qui encodent le stimulus en question (ou une de ces caractéristiques) comme par exemple la structure syntaxique d'une phrase.

Les questions que nous avons posées dans cette thèse sont les suivantes :

1. Quelles sont les aires cérébrales qui montrent un effet d'adaptation lorsque l'on répète la même structure syntaxique ou le même contenu lexico-sémantique ?
2. Y-a-t-il des aires cérébrales dont l'activation augmente avec la taille de l'arbre syntaxique ou des constituants qui le composent ?
3. Y-a-t-il des aires cérébrales distinctes qui montrent un effet d'adaptation lorsque l'on répète la même forme des mots, le même sens des mots ou le même sens de la phrase ?

La partie expérimentale de cette thèse est organisée en trois chapitres correspondant à chacune des questions posées ci-dessus.

Le premier chapitre correspond à un article accepté pour publication dans *Journal of Cognitive Neuroscience* : "Sentence Syntax and Content in Human Temporal Lobe : An fMRI adaptation study in auditory and visual modalities".

Le deuxième chapitre correspond à un article en cours de soumission : "Neural evidence for constituent-structure of analysis of sentences".

Le troisième chapitre correspond à des résultats préliminaires : "Étude des aires impliquées dans les traitements de la forme des mots, de leur sens et de celui de la phrase".

Chapitre 2

Etude en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle de l'adaptation à la structure syntaxique et au contenu lexico-sémantique des phrases

2.1 Résumé de l'article en français

Les études antérieures sur la syntaxe (cf chapitre 1) n'ont pas abouti à un consensus clair concernant la localisation des aires impliquées dans le traitement syntaxique par rapport à celles impliquées dans le traitement sémantique des phrases.

Les différentes études réalisées précédemment reposaient principalement sur l'observation de l'augmentation de l'activité cérébrale dans différentes conditions, telles que l'écoute ou la lecture passive de phrases, la détection d'erreurs grammaticales ou encore

la distinction entre mots et non-mots.

Une autre façon de mettre en évidence les aires cérébrales qui encodent des représentations syntaxiques, consiste à examiner l'effet de la répétition d'un même stimulus ou d'un aspect d'un stimulus. En effet, au niveau de la cellule, lorsqu'un stimulus est répété plusieurs fois, les enregistrements intracellulaires peuvent révéler une diminution de l'activité des neurones dans les aires qui encodent certains aspects du stimulus (Desimone, 1996). Wiggs & Martin (1998) ont proposé une théorie qui met en relation la visualisation répétée de visages non-familiers, la diminution du nombre de réponses neuronales et celle de l'amplitude de la réponse hémodynamique. En IRMf, cela se traduit par une réduction de l'amplitude de la réponse hémodynamique, qui a été observée, par exemple, au niveau de l'aire fusiforme des visages (Kanwisher *et al.*, 1997) lorsque des photographies de visages étaient présentées à des singes de façon répétée (Wiggs & Martin, 1998). Cette approche facilite la mise en évidence de la ou des régions impliquées dans le traitement d'un stimulus.

Cette méthode est appelée paradigme d'adaptation. Il est étroitement associé au phénomène comportemental d'amorçage (ou de "priming" en anglais). En effet, après la répétition ou l'amorçage d'un stimulus, le temps de réaction se voit amélioré et la précision de la détection de ce stimulus est meilleure (Schacter & Buckner, 1998).

Le but de nos premières expériences était d'étudier les aires impliquées dans le traitement syntaxique en utilisant ce paradigme d'adaptation (Grill-Spector et Malach, 2001; Naccache et Dehaene, 2001) en répétant certaines caractéristiques des phrases, en l'occurrence l'arbre syntaxique. Les régions mises en jeu par les traitements sémantiques seront également examinées.

Les trois expériences présentées dans ce chapitre correspondent à un article accepté pour publication dans *Journal of Cognitive Neuroscience* ¹.

¹Sentence Syntax and Content in Human Temporal Lobe : An fMRI adaptation study in auditory and visual modalities, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2008. Devauchelle A.D., Oppenheim C., Rizzi L., Dehaene S. and Pallier C.

La première expérience avait pour but d'examiner chez des volontaires adultes sains, dans les modalités auditive et visuelle, quelle(s) aire(s) cérébrale(s) montrait(en)t un phénomène d'adaptation lorsque l'arbre syntaxique ou le contenu lexico-sémantique d'une phrase étaient répétés.

Nous avons ensuite réalisé une seconde expérience dans le but d'étudier les effets d'adaptation sur seulement quatre types de structures syntaxiques (formes active, passive, clivée et clivée-passive).

Et enfin, comme les effets d'amorçage en comportement lors de la compréhension de phrases sont à l'heure actuelle peu étudiés (voir section 1.4.4), nous nous sommes demandés si notre expérience utilisant l'amorçage pouvait donner lieu à un effet d'adaptation en comportement hors IRM. Nous avons donc fait écouter les stimuli de la première expérience à de nouveaux participants adultes sains ; au lieu d'écouter passivement les phrases ceux-ci devaient appuyer sur un bouton à la fin de chaque phrase, dès qu'ils l'avait comprise.

Les résultats de la première expérience montrent que la répétition du contenu lexico-sémantique entraîne un phénomène d'adaptation dans la plupart des aires temporales et frontales appartenant au réseau de traitement des phrases, aussi bien dans la modalité visuelle que dans la modalité auditive, même lorsque le contenu lexico-sémantique est répété dans des phrases avec des constructions syntaxiques variables (Figure 2.2 page 68 et Table 2.3 page 73). Cependant aucun effet d'adaptation syntaxique n'a pu être observé lorsque la même structure syntaxique était répétée dans des phrases ayant des mots de contenu lexico-sémantique différents. Ce résultat est en contradiction avec une étude de Noppeney & Price (2004) qui avait mis en évidence une région du gyrus temporal antérieur gauche lorsque des phrases ayant une même syntaxe étaient répétées. Notre étude était relativement proche de celle de Noppeney & Price (2004) à l'exception du nombre de structures syntaxiques utilisées. En effet nous avons utilisé un très grand

nombre de structures syntaxiques différentes (96) alors que Noppeney & Price (2004) n'en ont utilisées que quatre.

Les résultats de la seconde expérience ont répliqué ceux de l'expérience précédente, c'est à dire qu'aucune aire cérébrale ne montrait un effet d'adaptation lorsque l'on répétait des phrases avec la même syntaxe (Figure 2.4 page 78) et cela quelque soit la structure syntaxique étudiée. Le fait d'avoir diminué le nombre de structures syntaxiques pour étudier les effet d'adaptation plus restreints n'a pas permis de mettre en évidence un effet d'adaptation pour l'une ou l'autre des constructions syntaxiques.

La troisième expérience, qui était une expérience comportementale, a permis de mettre en évidence un effet d'adaptation sur le temps de compréhension des phrases lorsque la même phrase était répétée ainsi que lorsque le contenu lexico-sémantique était répété (Figure 2.5 page 82) et cela quelque soit la modalité (visuelle et auditive). Nous avons également trouvé un effet d'adaptation du temps de compréhension des phrases lorsque la même structure syntaxique était répétée. Cet effet d'adaptation syntaxique est moins fort que les effets d'adaptation observés lors de la répétition de la même phrase ou lors de la répétition du contenu lexico-sémantique.

En conclusion, nous pouvons dire que dans la première expérience, nous avons observé des diminutions d'activation au niveau des aires cérébrales mises en jeu dans le langage lorsqu'une même phrase était répétée. Voici les résultats importants que nous avons trouvés.

Tout d'abord les diminutions d'activation dans les aires cérébrales du langage (principalement au niveau du gyrus temporal moyen gauche dans ses régions antérieures et postérieures, Figure 2.3 page 69A) se produisent aussi bien dans la modalité visuelle que dans la modalité auditive, ce qui suggère que quelques-unes de ces régions sont impliquées dans un niveau amodal² de traitement du mot et de la phrase.

Deuxièmement nous avons observé un effet d'adaptation lorsque les mêmes phrases

²Des régions amodales sont des régions mises en jeu dans les deux modalités auditive et visuelle.

étaient répétées, mais aussi lorsque le même contenu lexico-sémantique était répété, c'est à dire lorsque les mêmes mots de contenu et les mêmes structures argumentales étaient répétés bien que les structures syntaxiques étaient différentes.

Par contre, aucun effet d'adaptation en IRMf n'a été observé lorsque les phrases partageaient les mêmes structures syntaxiques mais pas les mêmes mots de contenu. La deuxième expérience d'IRMf, en utilisant un ensemble restreint de quatre constructions syntaxiques, reproduit également cette absence d'adaptation syntaxique en imagerie.

Lors de l'expérience comportementale la répétition de phrases ayant la même structure syntaxique a permis de mettre en évidence un effet d'adaptation sur les temps de compréhension des phrases (Figure 2.5 page 82).

La première interprétation qui expliquerait ces résultats serait que l'IRMf n'était pas une méthode assez sensible pour détecter un effet d'adaptation syntaxique. Cependant un effet d'adaptation à la répétition de la même phrase ou du contenu lexico-sémantique des phrases a été observé. Ce manque de sensibilité serait donc restreint uniquement à la répétition de la même syntaxe.

Une seconde interprétation possible de l'absence d'adaptation syntaxique est que la lecture ou l'écoute passive n'a pas contraint les participants à analyser complètement les phrases (Bever, 1970). En effet, lors de l'expérience en IRMf les participants devaient lire ou écouter passivement des phrases alors que lors de l'expérience comportementale, les participants devaient faire une tâche active : appuyer sur un bouton à la fin de la phrase dès qu'ils l'avaient comprise. Pour réaliser cette tâche, ils ont pu mettre en place une stratégie leur permettant d'anticiper la fin des phrases, alors qu'en IRMf les participants devaient lire passivement les phrases et n'avaient pas à mettre en place une stratégie pour accélérer leur compréhension. Lors de nos expériences, les participants n'étaient donc pas contraints de faire un traitement complet des structures syntaxiques des stimuli. Les participants de l'étude de Noppeney & Price (2004) devaient également

lire passivement des phrases, mais certains de leurs stimuli possédaient des ambiguïtés locales (telle que les phrases “garden-path”, voir l’Annexe C.4 page 176 pour plus de détails) qui pouvaient induire les participants à davantage s’engager dans le traitement des structures syntaxiques des phrases.

Une troisième hypothèse serait que la répétition du même arbre syntaxique n’engendre pas de diminution d’activation dans certaines aires cérébrales, car le traitement syntaxique ne serait pas “adaptable”. En effet, les aires cérébrales peuvent s’adapter lorsqu’elles sont impliquées dans le traitement d’un stimulus qui se trouve facilité lors de la répétition de ce même stimulus. On peut très bien imaginer que puisque depuis des années nous sommes soumis à l’écoute de phrases (ayant toutes les structures syntaxiques possibles) le fait d’entendre plusieurs fois une même structure syntaxique ne facilite pas plus son traitement et n’engendre pas un effet d’adaptation dans les régions cérébrales mises en jeu. La notion de durée d’adaptation serait également intéressante à étudier.

Une quatrième hypothèse serait que l’absence d’adaptation syntaxique en IRMf lors de la compréhension de phrases est réelle et permettrait donc de mieux comprendre le fonctionnement de l’analyseur syntaxique. En effet, notre expérience visait à déterminer si oui ou non la répétition d’un arbre syntaxique complet provoquait une réduction de l’activité cérébrale dans les zones d’encodage des représentations linguistiques. Au vue de nos résultats nous pouvons penser que l’arbre syntaxique complet n’est à aucun moment représenté tel quel en mémoire à un instant donné. Pour l’expliquer nous pouvons prendre la métaphore de la calculatrice : quand on tape une expression, elle effectue des opérations progressivement, mais l’arbre syntaxique complet de l’expression mathématique n’est jamais “calculé” par une calculatrice de base (ce qui n’est pas le cas avec des calculatrices plus complexes ou avec les programmes compilateurs des ordinateurs). Selon cette vision procédurale, il se pourrait que certaines opérations soit amorçables et pas d’autres.

Contrairement à l’absence d’adaptation syntaxique, nous avons trouvé des effets

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

d'adaptation lorsque l'on répétait des phrases qui avaient le même contenu lexico-sémantique. En particulier, au niveau des régions des gyri temporaux supérieur et moyen gauches bordant le sillon temporal supérieur gauche. Ces régions sont les principaux candidats impliqués dans le traitement du sens de la phrase (Davis & Johnsrude, 2003; Friederici *et al.*, 2003). Notre dessin expérimental ne nous permettait pas de bien dissocier les contributions de la répétition de la forme des mots, du sens des mots et de la structure argumentale (ou du sens global) de la phrase, c'est pour cette raison que nous avons réalisé une autre expérience qui avait pour but d'essayer de dissocier ces différents niveaux de traitement (voir Chapitre 7).

2.2 Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory and visual modalities

2.2.1 Introduction

Understanding a sentence requires the interplay of phonological, lexical, syntactic and semantic/pragmatic knowledge. It is generally assumed that a parser regroups individual words into phrases and incrementally builds a syntactic structure which enters into the computation of the semantic representation.

The functioning of the mental parser can be investigated by means of imaging techniques. Listening to or reading syntactically anomalous sentences elicits specific evoked brain potentials (Osterhout & Holcomb, 1992; Friederici, 2002) and produces increased brain activations in inferior frontal and superior temporal areas (Newman *et al.*, 2001; Friederici *et al.*, 2003). Other designs, besides the manipulation of syntactic violations, have been used to search for neural regions involved in syntactic processing, e.g., com-

paring the processing of matched syntactic and non-syntactic stimuli (Mazoyer *et al.*, 1993; Friederici *et al.*, 2000; Indefrey *et al.*, 2001b) and correlating brain activity with grammatical complexity (Just *et al.*, 1996; Stromswold *et al.*, 1996; Caplan *et al.*, 1999). Brain imaging studies of syntax are reviewed by Kaan & Swaab (2002) and Grodzinsky & Friederici (2006). No clear conclusion has yet emerged about the locus of syntactic processing, probably, in part, because syntactic parsing is not a unitary process. In this paper, we focus on syntactic trees and use syntactic priming as a tool to find the area(s) representing the syntactic structure associated with a sentence.

What is syntactic priming? In natural conversations, as well as in controlled language production tasks, people have a tendency to reuse recently encountered syntactic structures (see Pickering & Branigan, 1999 for a review). For example, Bock (1986) found that participants are more likely to describe a picture using a passive sentence when they have just read a passive sentence rather than an active one. Using an on-line task, Smith & Wheeldon (2001) have observed that the latency to produce a sentence can also be decreased by syntactic priming. One interpretation of syntactic priming is that it reflects the fact that repeated use of procedures or representations reduces processing costs and increases processing speed (Levelt & Kelter, 1982). Indeed, the repetition of a whole stimulus or of a feature of a stimulus often leads to a reduction in brain activity, a phenomenon which can be used to find the brain regions involved in processing this type of stimulus or feature (Naccache & Dehaene, 2001; Grill-Spector & Malach, 2001; Dehaene-Lambertz *et al.*, 2006).

Early syntactic priming studies mostly used production-to-production priming. The effectiveness of priming supports the notion that the syntactic structure of the sentences is computed in speech production planning. Is it also computed in speech comprehension? A few studies demonstrated comprehension-to-production priming by having the participants hear or read the priming sentences before producing the target sentence

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

(Potter & Lombardi, 1998; Branigan *et al.*, 2000b; Bock *et al.*, 2007). These studies suggest a shared level of syntactic representation in comprehension and production and therefore predict the existence of syntactic priming in sentence comprehension.

However, the empirical data on comprehension-to-comprehension priming is actually very scarce : to our knowledge, only a few studies have investigated it (Mehler & Carey, 1967; Frazier *et al.*, 1984; Noppeney & Price, 2004; Branigan *et al.*, 2005). In their study, Mehler and Carey presented participants with blocks of structurally homogeneous auditory sentences and found that the accuracy of perception of a sentence presented in white noise at the end of each block was improved if its phrase-structure was similar to that of the preceding sentences. A somewhat related design was used by Noppeney & Price (2004) : participants read a series of four sentences, which either had similar or dissimilar syntactic structures. Reading times were faster in the similar condition relative to the dissimilar condition. Moreover, Noppeney & Price (2004) used fMRI to scan their participants while reading covertly the same series of sentences. They found that when the syntax of sentences was repeated, brain activity was reduced in an area of the left anterior temporal lobe. This result fits with the proposal that the anterior part of the superior temporal lobe plays a role in phrase-structure building during sentence comprehension (Friederici, 2002; see also Mazoyer *et al.*, 1993).

Noppeney & Price (2004)'s materials included ambiguous and garden-path sentences arising from a small set of constructions. They used 4 types of sentences based on 3 different constructions (preposed adverbial clause, simple main clause, main clause with reduced relative). The present study also used an adaptation paradigm and fMRI. However we departed from Noppeney & Price (2004) in several respects : (a) We exclusively used unambiguous sentences in order to abstract away from effects specifically linked to ambiguity resolution ; (b) a broader variety of syntactic constructions was included ; (c) we added series of sentences where the lexico-semantic content was repeated.

More precisely, these sentences shared the same word forms (for content words), word meanings, and argument structure while the syntactic structures varied (see Table 1). This condition was included to disentangle priming effects linked to the repetition of lexico-semantic content from syntactic priming effects (see Table 2.1). (d) The stimuli were presented either in the auditory or in the visual modalities (Noppeney and Price only used written sentences).

The questions of interest are the following : what brain regions, if any, will show reduction of activation when a syntactic tree is repeated ? Likewise, what regions are affected by the repetition of lexico-semantic content ? Are the regions involved in both cases similar, overlapping, or segregated ? And finally, does input modality, auditory or visual, play a role ?

2.2.2 Methods

2.2.2.1 Participants

Twenty-one young adults (13 women and 8 men ; age : mean = 25 ; sd = 4 ; range = 18-33 years) participated in the experiment. All were right-handed (scores at the Edinburgh test : mean = 77 ; sd = 21 ; range = 28-100) native speakers of French. The experiment was approved by the regional ethics committee and written informed consent was obtained in all cases. The participants received 75 € for their participation.

2.2.2.2 Stimuli

We created 76 sets of sixteen sentences. Each set was obtained by crossing 4 kernel sentences with 4 syntactic structures (Table 2.2). Across all sets, a variety of syntactic constructions were employed : cleft sentences, Wh-questions, relative clauses (reduced or not), yes/no questions, imperative, exclamative clauses, rai-

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

Condition	Sample of bloc of stimuli
<i>Same sentence</i>	Your work was ruined by a trainee. <i>Vos travaux ont été saccagés par un stagiaire.</i> Your work was ruined by a trainee. <i>Vos travaux ont été saccagés par un stagiaire.</i> Your work was ruined by a trainee. <i>Vos travaux ont été saccagés par un stagiaire.</i> Your work was ruined by a trainee. <i>Vos travaux ont été saccagés par un stagiaire.</i>
<i>Same syntax</i>	It is this palace that the architect designed. <i>C'est ce palais que l'architecte a conçu.</i> It is a medicine that some scientists invented. <i>C'est un médicament que des scientifiques ont inventé.</i> It is your work that a trainee ruined. <i>Ce sont vos travaux qu'un stagiaire a saccagés.</i> It is the rosebushes that my gardener trampled <i>Ce sont les rosiers que mon jardinier a piétinés.</i>
<i>Same content</i>	An architect designed this palace. <i>Un architecte a conçu ce palais.</i> This palace was designed by an architect. <i>Ce palais a été conçu par un architecte.</i> It is this palace that the architect designed. <i>C'est ce palais que l'architecte a conçu.</i> By which architect was this palace designed? <i>Par quel architecte ce palais a-t-il été conçu?</i>
<i>Different sentences</i>	An architect designed this palace. <i>Un architecte a conçu ce palais.</i> A medicine was invented by some scientists. <i>Un médicament a été inventé par des scientifiques.</i> It is your work that a trainee ruined. <i>Ce sont vos travaux qu'un stagiaire a saccagés.</i> By which gardener were the rosebushes trampled? <i>Par quel jardinier les rosiers ont-ils été piétinés?</i>

TAB. 2.1: The four experimental conditions. In the “Same Syntax” condition, the same syntactic construction and similar function words were used. In the “Same Lexico-semantic Content” condition, the sentences involved the same open-class items (nouns, verbs, adjectives), and referred to the same event types and the same predicates and arguments, but this common lexico-semantic content was expressed by different syntactic constructions. In our experiment the stimuli were in French.

sing construction, preposed adverbial clauses, sentential subject sentences, simple active clauses and simple passive clauses (the full list of stimuli is available at http://www.unicog.org/publications/Syntactic_Adaptation_Experiments_Materials.html).

This material was used to create different experimental lists for each participant.

These lists comprised 120 miniblocks of 4 sentences each : 30 miniblocks for each of the four experimental conditions : Same Sentences, Same Syntax, Same Lexico-semantic content and Different Sentences (see Table 1). For each participant a given sentence never occurred in more than one miniblock throughout the whole experiment. This was achieved by sampling sentences from the 76 sets. For example, to create a miniblock condition “Same Sentences”, one set was randomly selected and then one sentence was randomly selected ; this set was then discarded and not reused for any other miniblock. For the condition “Same Syntax”, a set was randomly selected and 4 sentences with the same structure were extracted. With this procedure, a given sentence had the same likelihood of appearing in any of the four experimental conditions across subjects.

The sentences were digitally recorded in a quiet room by a female speaker. They were edited and saved with a resolution of 16 bits and a sampling frequency of 22.05 kHz. The sentences varied in length from 5 to 17 words and their durations when read aloud varied from 1.4 to 4.6 seconds.

2.2.2.3 Procedure

Each participant was scanned in 6 sessions : 3 in which the stimuli were presented auditorily and 3 in which the stimuli were presented visually (the order was interleaved). Each session lasted 8 minutes 24 seconds and comprised 20 miniblocks of 4 sentences (plus a few additional sentences see below). Sentences within a miniblock were separated by 2 seconds of silence and each miniblock was separated from the other by 8 seconds of silence.

To induce the participants to attend to the stimuli, 30 probe sentences were inserted at random locations between miniblocks, which instructed them to press a button. Before entering the scanner, the participants were familiarized with the task with a short training of 18 sentences in each modality (including each condition and a few probe sentences

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

instructing them to press a button).

The audio stimuli were delivered through headphones (Resonance Technologies, Northridge, California). The visual stimuli were projected in rapid serial presentation at the rate of one word every 270 msec to make it comparable to the auditory condition.

2.2.2.4 Scanning and data analysis

Images were acquired with a 3T Bruker Medspec 30/100 scanner. Functional images used EPI sequences (TR = 2.4 secs, TE = 30 msec, Matrix = 64*64; Voxel size = 3x3x5 mm; Number of slices = 24). The anatomical scan used a 3D Gradient-echo sequence (TI = 2530 msec, TE = 3.3 msec, TR = 8.6 sec; Voxel size = 1.33x1.2x1.2 mm).

Data were processed with the SPM2 software. The first four volumes of each functional session were discarded and the remaining images were corrected for slice-timing differences and motion. The anatomical images were normalized using the MNI T1 template and the normalization parameters were applied to the functional images, which were finally smoothed with a 5 mm³ Gaussian kernel. For each subject, a general linear model was created which included, for each session, 16 independent variables obtained by crossing the factor “Position” of the sentences within the miniblock (1st, 2nd, 3rd or 4th), and the factor “Condition” with 4 levels (see Table 1). The event-related regressors used the canonical hemodynamic responses included in SPM2. Additional event-related regressors modeling the probe sentences and the associated motor responses were included.

For second-level group analyses (random-effect), a smoothing kernel of 8 mm³ was applied to the individual contrast images. One participant was detected as an outlier using the Distance toolbox (Mériaux *et al.*, 2003) and was excluded from further analyses.

2.2.3 Results

The probe sentences were detected with an accuracy of 94%, showing that the participants attended to the stimuli. The first analyses of fMRI data looked for brain area showing a decrease in the BOLD response over the course of the presentation of the four sentences, using a linear contrast with the weights (3, 1, -1, -3) to estimate the slope of the BOLD response. These analyses were performed within the regions that were activated relative to silence (in the auditory modality) or fixation (in the visual modality).

Figure 2.1 shows the results of these group analyses, split by “Modality” (auditory or visual) and “Condition”. Notice that there was some adaptation even in the “Different Sentences” condition, primarily in unimodal sensory areas (Figure 2.1, last row).

In order to remove non-specific adaptation effects in subsequent analyses, the “Different Sentences” condition was considered as a baseline and was subtracted from the other conditions. The results of the comparison between each of these three conditions and the “Different Sentences” condition are displayed on Figure 2.2 and detailed in Table 2.3.

The time-courses of the fMRI responses in several regions of interest (ROIs) are shown in Figure 2.3B. These ROIs are spheres of 8 mm of radius centered on the maxima of the maps displayed in Figure 2. Two additional ROIs were included : The first one located in the left anterior temporal cortex is centered on the MNI coordinates (-42, 4, -28) where syntactic adaptation was reported by Noppeney & Price (2004) ; The second one, located more dorsally in the superior temporal sulcus (MNI coordinates : -60, -8 -4), corresponding to the putative homolog of the Visual Word Form Area in the auditory

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

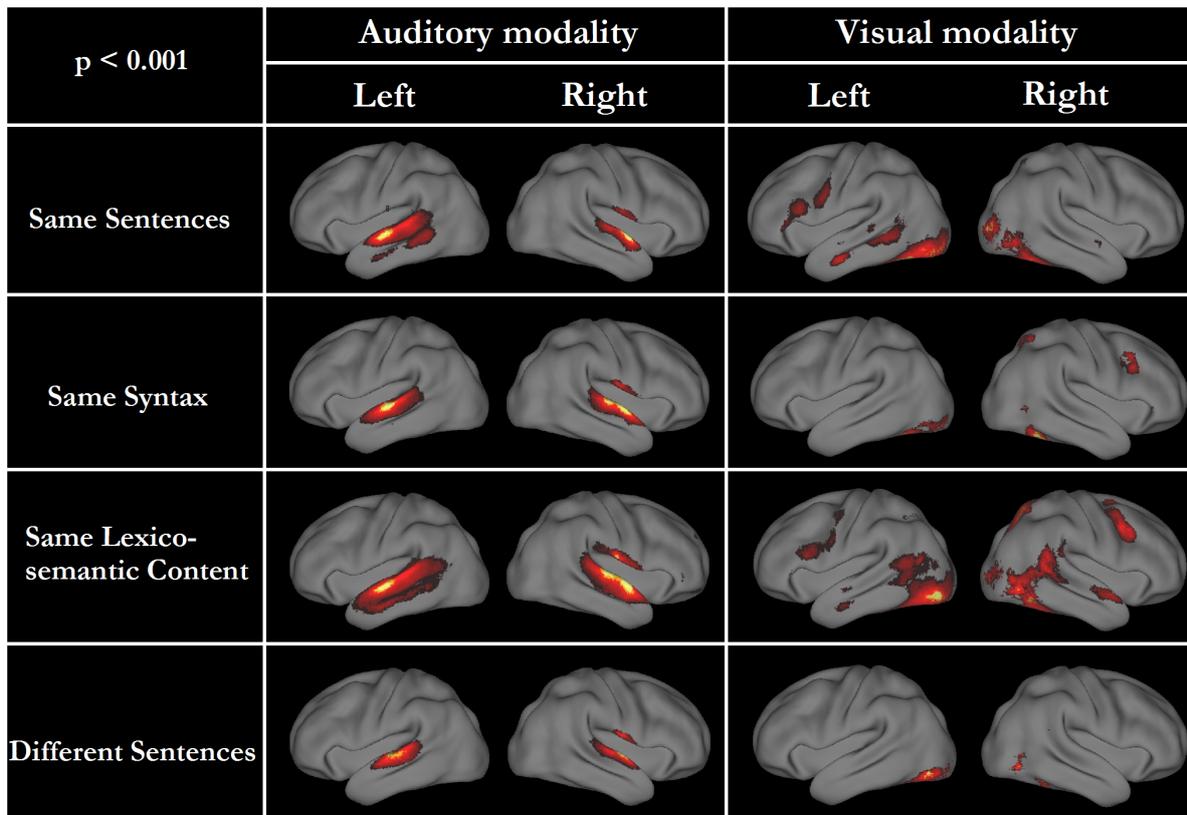


FIG. 2.1: Areas showing significant decrease in activation across the four sentences, as a function of condition and modality ($p < 0.001$ uncorrected voxel-based, $p < 0.05$ for extent).

stream according to Cohen *et al.* (2004).

When comparing the “Same Syntax” condition to the “Different Sentences” condition, no significant effect of adaptation emerged (even when the voxel-based statistical threshold was lowered to ($p < .01$ uncorrected)), either in the visual or in the auditory modality. The data was also analyzed using a $2 \times 2 \times 2$ analysis of variance with factors of modality, syntactic repetition (yes/no) and lexico-semantic content repetition (yes/no) to benefit from the added power of pooling across the entire data set. Even with this analysis, we did not observe any significant effect of syntactic priming. In the specific ROI where Noppeney & Price (2004) found maximal adaptation to syntax (MNI coordi-

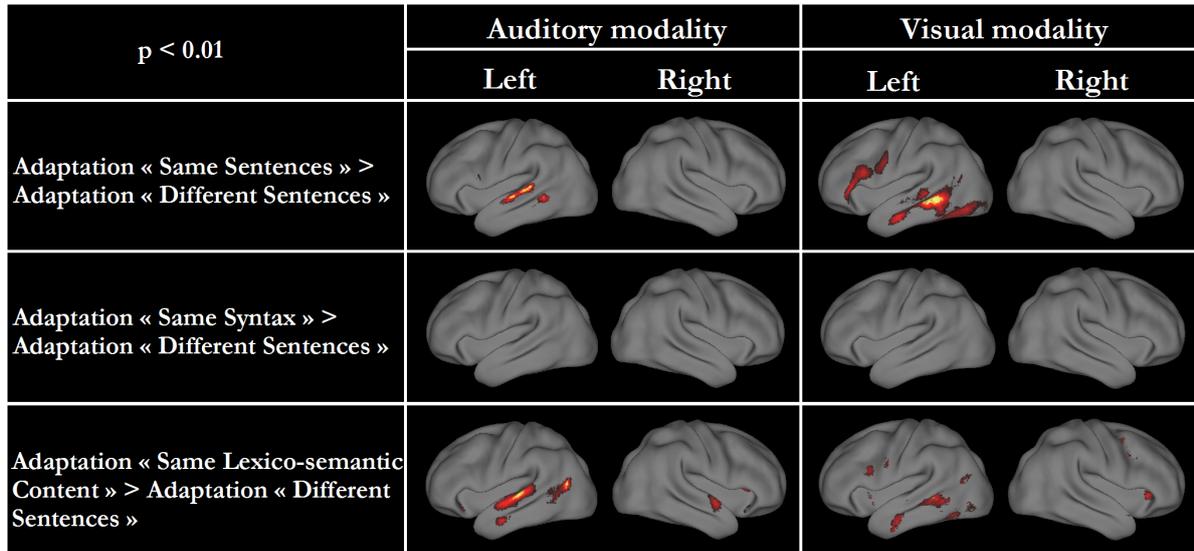


FIG. 2.2: Areas showing more adaptation than in the “Different Sentences” condition ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).

ates : -42 4 -28), the effect of lexico-semantic content repetition was significant at $p < .01$ uncorrected voxel-based but there was no effect of repetition of syntactic structure. The plots of signal time-course displayed in Figure 3 show that the effect of lexico-semantic content in the ROI (-42, 4, -28) is actually due to a relative increase of activation, in the auditory modality, when sentences do not share the same content words.

For the “same sentence” condition, in the visual modality, adaptation effect was observed in the left inferior and middle temporal gyri, in the left inferior and middle occipital gyri, in the left fusiform gyrus and in the left inferior frontal regions. In the auditory modality, adaptation effect was found in the left middle temporal gyrus and in the right cerebellum. All of these regions passed the False Discovery Rate (FDR) threshold of $p < 0.05$. For the “same lexico-semantic content” condition, in the visual modality, adaptation effect was observed in the left middle temporal gyrus and in the left precentral gyrus. In the auditory modality, adaptation effect was found in the left middle and superior temporal gyri and in the right middle temporal gyrus. For the auditory modality, these regions passed the FDR threshold of $p < 0.05$, while in the visual

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

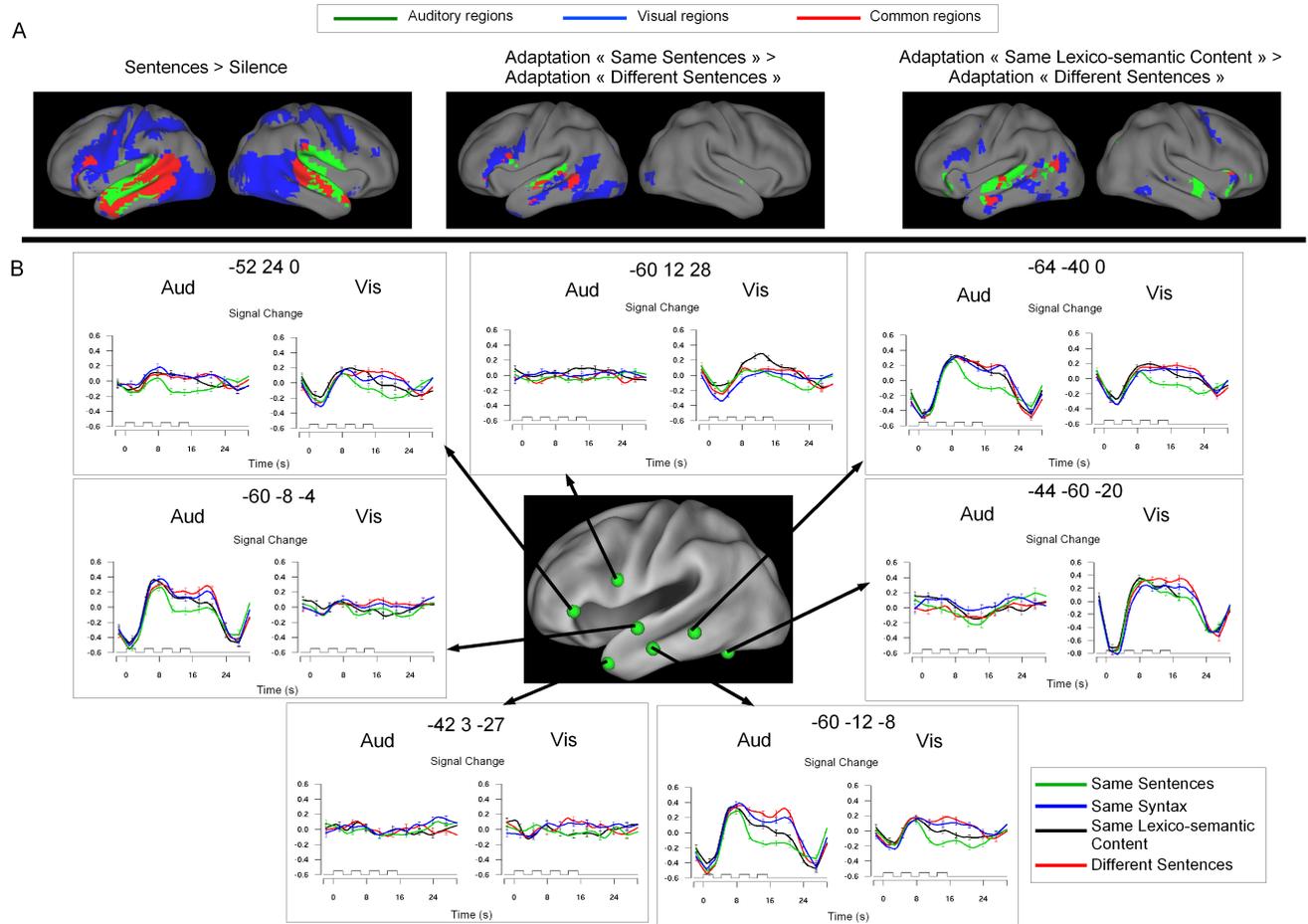


FIG. 2.3: A- Areas involved in reading (blue), listening (green) and their intersection (red) (contrast maps threshold at $p < 0.01$ for each modality). B- Time-course in regions of interest defined as spheres of 8 mm radius centered on the peaks defined by SPM shown in figure 2. Green line : Same Sentences adaptation, blue line : Same Syntax adaptation, black line : Same Lexico-semantic Content adaptation, red line : Different Sentences adaptation.

modality, the clusters peaks had marginal FDR p -values of 0.12.

A direct comparison between the “same sentence” condition and the “same lexico-semantic” condition showed that the adaptations were not significantly stronger in the former condition than in the latter one.

The time courses of signal displayed in Figure 2.3B, show that adaptation had sometimes a linear profile (e.g., see voxel -44 -60, -20 in the Visual condition,) and

sometimes a rather more logarithmic profile with most of the adaptation taking place between sentence 1 and 2 (e.g. voxel -60 -12 -8, in the auditory modality). The previous set of analyses were replicated using a “logarithmic” contrast (3 -1 -1 -1) rather than the linear contrast (3 1 -1 -3), yielding similar patterns of adaptations.

Figure 2.3A shows the areas involved while reading (blue), listening (green) or in both modalities (red) on three contrasts : “Sentences versus Silence”, “adaptation to the Same Sentences vs. adaptation to Different Sentence” and “adaptation to sentences with the Same Lexico-Semantic Content vs. adaptation to Different Sentence”. In the contrast “Sentences versus Silence”, common activations were located in the left superior and middle temporal gyri and in regions bordering the left superior temporal sulcus. They were also found in the left inferior frontal regions and in the left precentral gyrus. The activations were more extended in the temporal gyrus for the auditory modality than for the visual modality while the converse was true in the frontal and occipital regions. The temporal lobe regions showing adaptation in the auditory modality tended to be located more dorsally than those showing adaptation effects in the visual modality.

2.2.4 Discussion

The aim of the experiment was to highlight the areas encoding the syntactic structure and the lexico-semantic content of heard or read sentences. Our rationale was that such areas should show a decrease in activation when successive sentences sharing the same syntactic construction or the same lexico-semantic content were processed. Our results confirm previous findings that a large portion of the left superior temporal sulcus and the inferior frontal language processing network is sensitive to sentence repetition (Dehaene-Lambertz *et al.*, 2006; Hasson *et al.*, 2006), thus vindicating the use of fMRI adaptation as a method to study the levels of representation in language processing. One novel finding is that adaptation can be observed even when the word order differs in

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

successive sentences, but the lexico-semantic content is otherwise preserved.

Another one of our goals was to investigate the cerebral correlates of syntactic representation of sentences by examining which brain areas show reduced activation when sentences having the same syntactic structures are repeated. However, unexpectedly, no such area was observed either in the visual or in the auditory modality.

This absence of syntactic adaptation is at odds with the observation of Noppeney & Price (2004) who described a syntactic adaptation effect in a region of the left anterior temporal gyrus. As mentioned in the introduction, our study differs from Noppeney & Price (2004)'s on a number of points. Among others, the fact that while they used only four structures (late or early closure and simple active or reduced relative) our stimuli encompassed a much broader set of structures, most of which have not been previously tested in the syntactic priming literature. It is possible that syntactic priming works better with some types of constructions than others. We therefore decided to design a second syntactic priming experiment using only four constructions : sentences in active, passive, cleft, or cleft and passive forms. This new experiment would allow us to compare syntactic priming separately for each of these four constructions.

1a	An architect designed this palace. <i>Un architecte a conçu ce palais.</i>
1b	This palace was designed by an architect. <i>Ce palais a été conçu par un architecte.</i>
1c	It is this palace that the architect designed. <i>C'est ce palais que l'architecte a conçu.</i>
1d	By which architect was this palace designed? <i>Par quel architecte ce palais a-t-il été conçu?</i>
2a	Some scientists invented a medicine. <i>Des scientifiques ont inventé un médicament.</i>
2b	A medicine was invented by some scientists. <i>Un médicament a été inventé par des scientifiques.</i>
2c	It is a medicine that some scientists invented. <i>C'est un médicament que des scientifiques ont inventé.</i>
2d	By which scientists was this medicine invented? <i>Par quels scientifiques ce médicament a-t-il été inventé?</i>
3a	A trainee ruined your work. <i>Un stagiaire a saccagé vos travaux.</i>
3b	Your work was ruined by a trainee. <i>Vos travaux ont été saccagés par un stagiaire.</i>
3c	It is your work that a trainee ruined. <i>Ce sont vos travaux qu'un stagiaire a saccagés.</i>
3d	By which trainee was your work ruined? <i>Par quel stagiaire vos travaux ont-ils été saccagés?</i>
4a	My gardener trampled the rosebushes. <i>Mon jardinier a piétiné les rosiers.</i>
4b	The rosebushes were trampled by my gardener. <i>Les rosiers ont été piétinés par mon jardinier.</i>
4c	These are the rosebushes that my gardener trampled. <i>Ce sont les rosiers que mon jardinier a piétinés.</i>
4d	By which gardener were the rosebushes trampled ? <i>Par quel jardinier les rosiers ont-ils été piétinés?</i>

TAB. 2.2: *Example of one set of sixteen sentences, by crossing 4 kernel sentences (1, 2, 3 and 4) with 4 syntactic structures (a, b, c and d). Across all sets, a variety of syntactic constructions were employed : cleft sentences, Wh-questions, relative clauses (reduced or not), yes/no questions, imperative, exclamative clauses, raising construction, preposed adverbial clauses, sentential subject sentences, simple active clauses and simple passive clauses.*

2.2. Experiment 1 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : an fMRI study in auditory a

Contrast	Z score	p value (FDR)	Extent (mm ³)	MNI Coordinates		
				X	Y	Z
<i>Adaptation Same Sentences ></i>						
<i>Adaptation Different Sentences</i>						
<i>Auditory modality</i>						
Left Middle Temporal Gyrus	3.41	0.032	21	-64	-40	0
Left Middle Temporal Gyrus	3.38	0.032	33	-64	-20	4
Left Middle Temporal Gyrus	3.34	0.032		-60	-12	-8
Right Cerebellum	3.47	0.032	54	20	-72	-40
<i>Visual modality</i>						
Left Middle Temporal Gyrus	4.46	0.008	81	-60	-12	-16
Left Middle Temporal Gyrus	4.21	0.008	375	-52	-40	0
Left Inferior Temporal Gyrus	3.93	0.008		-44	-44	-16
Left Inferior Temporal Gyrus	3.92	0.008		-44	-52	-8
Left Inferior Occipital Gyrus	3.67	0.010		-44	-60	-16
Left Fusiform Gyrus	3.62	0.010		-40	-56	-20
Left Middle Occipital Gyrus	3.42	0.012		-44	-72	-12
Left Inferior Frontal Gyrus Pars Opercularis	4.09	0.008	81	-60	12	28
Left Inferior Frontal Gyrus Pars Triangularis	3.49	0.011	63	-52	24	0
<i>Adaptation Same Lexico-Semantic Content ></i>						
<i>Adaptation Different Sentences</i>						
<i>Auditory modality</i>						
Left Middle Temporal Gyrus	3.49	0.028	36	-60	-12	-8
Left Superior Temporal Gyrus	3.29	0.028	45	-64	-24	0
Left Middle Temporal Gyrus	3.26	0.028		-68	-40	4
Right Middle Temporal Gyrus	3.28	0.028	12	60	-8	-12
<i>Visual modality</i>						
Left Middle Temporal Gyrus	3.58	0.118	18	-44	-48	0
Left Precentral Gyrus	3.37	0.118	12	-56	-4	36

TAB. 2.3: Peak voxels of activated regions showing significant adaptations ($p < 0.001$ uncorrected voxel-based; clusters' extent > 4 voxels; masked by the "Sentence - Silence" contrast at $p < 0.001$)

2.3 Experiment 2 : Syntactic adaptation in four different syntactic structures : an fMRI study in visual modality

2.3.1 Methods

2.3.1.1 Participants

Twenty young adults (7 women and 13 men ; age mean = 22 ; sd = 2 ; range = 19-25) participated in the experiment. All were right-handed (scores on the Edinburgh test : mean = 83 ; sd = 19 ; range = 30-100) native speakers of French. The experiment was approved by the regional ethics committee and written informed consent was obtained in all cases. The participants received 80 € for their participation.

2.3.1.2 Stimuli

Contrary to Experiment 1, the sentences created for this experiment could only have one of four types of syntactic structures : active form (e.g. The blue car hit the small dog), passive form (e.g., The small dog was hit by the car), cleft form (e.g. It is the car that hit the small dog) and cleft-passive form (e.g. It is the dog that was hit by the car). Lists of 384 sentences organized in 96 miniblocks of 4 sentences were generated for each participant using a procedure similar to that of Experiment 1 (the full list of stimuli is available at http://www.unicog.org/publications/Syntactic_Adaptation_Experiments_Materials.html). Half of the miniblocks belonged to the Same Syntax condition, that is, the sentences expressed the same syntactic construction. A fourth of the miniblocks belonged to the Same Sentence condition, and another fourth to the Different Sentences condition. Each syntactic structure appeared equally often in the three experimental conditions. The

length of the sentences in words varied from 8 to 10.

2.3.1.3 Procedure

Each participant was scanned in 4 visual sessions. Each session comprised 24 miniblocks and lasted 10 minutes. Sentences within miniblocks were separated by 2 seconds of silence and the interval between them lasted 8 seconds.

To induce participants to attend the stimuli, they were required to perform a recognition task after each session : 10 sentences were presented to the subject, who had to decide if the sentence was present in the previous session, by pressing the right or left button. Before entering the scanner, the participants were familiarized with the task with a short training of 16 sentences (including each condition) and a task training of 9 sentences.

The visual stimuli were projected in rapid serial presentation at the rate of one word every 270 msec.

2.3.1.4 Scanning and data analysis

Images were acquired with a 3T Bruker Medspec 30/100 scanner. Functional images used EPI sequences (TR = 2.4 secs, TE = 30 msec, Matrix = 64x64 ; Voxel size = 3x3x3 mm ; Number of slices = 40). The anatomical scan used a 3D Gradient-echo sequence (TI = 2530 msec, TE = 3.3 msec, TR = 8.6 secs ; Voxels size = 1.33x1.2x1.2mm).

Data were processed with the SPM2 software. The first four volumes of each functional session were discarded and the remaining images were corrected for slice-timing differences and motion. The anatomical images were normalized using the MNI T1 template and the normalization parameters were applied to the functional images, which were finally smoothed with a 5 mm³ Gaussian kernel. For each subject, a general linear model was created which included, for each session, 24 independent variables obtained by crossing the factor "Position" of the sentences within the miniblock (1st, 2nd, 3rd or

2.3. Experiment 2 : Syntactic adaptation in four different syntactic structures : an fMRI study

4th), and the factor “Condition” with 3 levels (same sentence, same syntax, different sentence), and only for the “Same Syntax” condition the factor “Syntactic Structure” had 4 levels (active, passive, cleft and cleft-passive form). The event-related regressors used the canonical hemodynamic responses included in SPM2.

For second-level group analyses (random-effect), a smoothing kernel of 8 mm³ was applied to the individual contrast images.

2.3.2 Results

During the recognition sentence task, subjects recognized the sentence with an accuracy of 77%, showing that the participants attended to the stimuli. The first analyses of fMRI data looked for brain areas showing a decrease in the BOLD response over the course of the presentation of the four sentences (using a linear contrast with the weights (3, 1, -1, -3) to estimate the slope of the BOLD response). The results of these group analyses shown that there was some adaptation even in the “Different Sentences” condition, primarily in the unimodal sensory areas, as in the first experiment. Therefore, in order to remove non-specific adaptation effects, the “Different Sentences” condition was considered as a baseline and was subtracted from the three other conditions in subsequent analyses (Figure 2.4).

Table 2.4 lists the areas where the adaptation was stronger in the “Same Sentences” than in the “Different Sentences” condition (see also Figure 4) masked by the “sentence - fixation” contrast at $p < .001$). They include the left inferior occipital gyrus, in the fusiform gyrus, in the left inferior/middle temporal gyrus, and in the frontal regions extending from the frontal operculum to the precentral gyrus.

When comparing the “Same Syntax” condition to the “Different Sentences” condition, no significant effect of adaptation emerged ($p < .01$ voxel based) in the mask “sen-

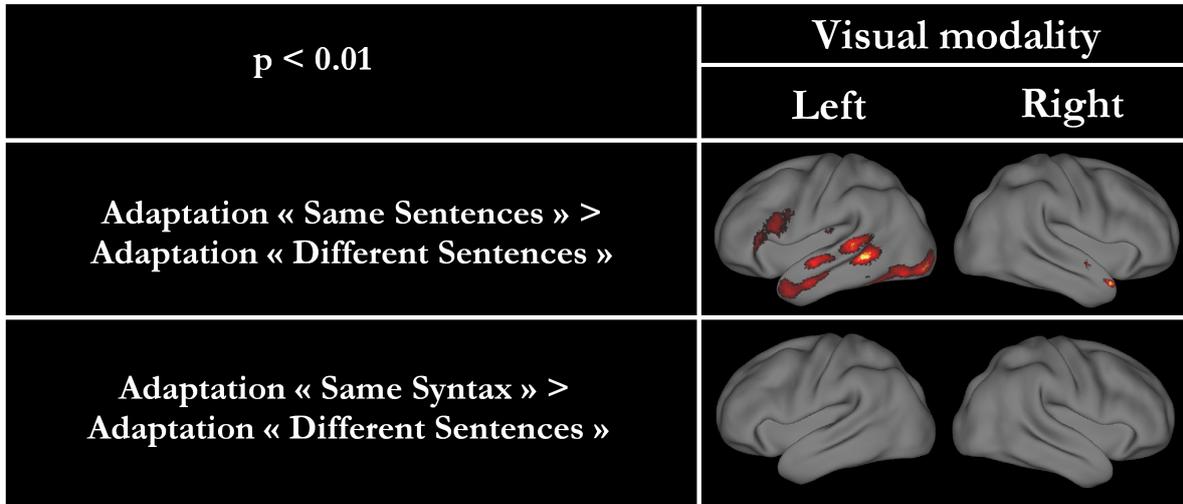


FIG. 2.4: Areas showing significant decrease in activation across the four sentences in the “Same Sentences” and the “Same Syntax” conditions relative to the “Different Sentences” condition ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).

tence - fixation” contrast at $p < .001$. Contrasts between “Same Syntax” and “Different Sentences” restricted to each of the four types of constructions (active, passive, cleft and cleft-passive) did not show any significant effect either. We also contrasted these four “Same Syntax” conditions two by two, and did not observe any significant difference ($p < 0.01$).

2.3.3 Discussion

The reduction in number of syntactic constructions used in the experimental materials did not yield more syntactic adaptation than in the first experiment while the design was sensitive enough to detect clear adaptation effects due to the repetition of the exact same sentence. As mentioned in the introduction, the published evidence for syntactic priming in comprehension is quite scarce. The occurrence of syntactic priming in speech production and in mixed perception-production experiments led us to expect syntactic priming in perception; yet, in a recent review, Branigan *et al.* (2007) men-

2.3. Experiment 2 : Syntactic adaptation in four different syntactic structures : an fMRI study

Adaptation Same Sentences > Adaptation Different Sentences	Z score	p value (FDR)	Extent (mm ³)	MNI Coordinates		
				X	Y	Z
Left Middle Temporal Gyrus	5.04	0.002	465	-54	-45	3
Left Middle Temporal Gyrus	4.16	0.003	474	-60	-12	-6
Left Middle Temporal Gyrus	3.93	0.004		-57	-9	-15
Left Superior Temporal Gyrus	3.8	0.005		-48	9	-24
Left Fusiform Gyrus	4.48	0.002	696	-42	-54	-12
Left Middle Occipital Gyrus	4.23	0.003		-39	-90	-9
Left Inferior Occipital Gyrus	3.82	0.005		-45	-75	-12
Left Inferior Frontal Gyrus Pars	3.88	0.004	120	-42	21	6
Left Inferior Frontal Gyrus Pars Opercularis	3.57	0.006	75	-42	6	27
Left Inferior Frontal Gyrus Pars Opercularis	3.46	0.007	30	-60	18	24
Left Supplementary Motor Area	3.81	0.005	51	-6	-6	60
Left Postcentral Gyrus	3.57	0.006	48	-57	-12	51

TAB. 2.4: Peak voxels of activated regions showing more adaptation than in the “Different Sentences” condition ($p < 0.001$ uncorrected voxel-based; clusters’ extent > 4 voxels; masked by the “Sentence - Silence” contrast at $p < 0.001$)

tioned two behavioral experiments in perception where syntactic priming only occurred when the verb was repeated. The existence of syntactic priming and/or adaptation in comprehension is therefore not very well established. For this reason, we decided to run a behavioral priming experiment modeled after Experiment 1.

2.4 Experiment 3 : Syntactic and lexico-semantic adaptation : a behavioural study in auditory and visual modalities

2.4.1 Methods

The experiment was identical in every respect to Experiment 1. The only difference was that participants were seated in front of a computer rather than lying in the scanner and that they were asked to “press the response button at the end of each sentence once they had understood it”. Response times, measured from the sentence ending, were collected by E-prime. As in the scanner, participants were asked to keep their eyes closed in the auditory condition.

Twenty-six young adults (20 women and 6 men; age : mean=21.8 ; sd=2.6 ; range=18-28 years) participated in the experiment and received 10 euros. All were right-handed (scores at the Edinburgh test : mean=76.1 ; sd=18.6 ; range=50-100) native speakers of French. The experiment was approved by the regional ethics committee and written informed consent was obtained in all cases.

2.4.2 Results

Participants pressed on the button for 98.4% of the sentences in the visual modality and for 96.1% in the auditory modality. Median reaction times in each condition and for each sentence position were computed for each participant. Averaged data are displayed on Figure 2.5. The reaction times were quite fast because participants sometimes answered before the physical end of the sentence, anticipating it when reading or listening to the last word (6.3% and 11.6% of the reaction times were negative in the visual and auditory condition respectively. The inclusion or replacement of these data points did

not alter the conclusions of the following analyses). Analyses of variance revealed significant main effects of Conditions and Condition X Position interactions for all pairs of Conditions (all $p < 0.05$ except for the interaction “same syntax” vs. “different sentences” X Position in the Auditory modality where $F(3,75) = 2.05$; $p = 0.11$). Reaction times accelerated more in the “same sentence” condition than in the “same lexico-semantic content”, more in the latter than in the “same syntax” condition, and more in the “same syntax” than in the “different sentences” condition.

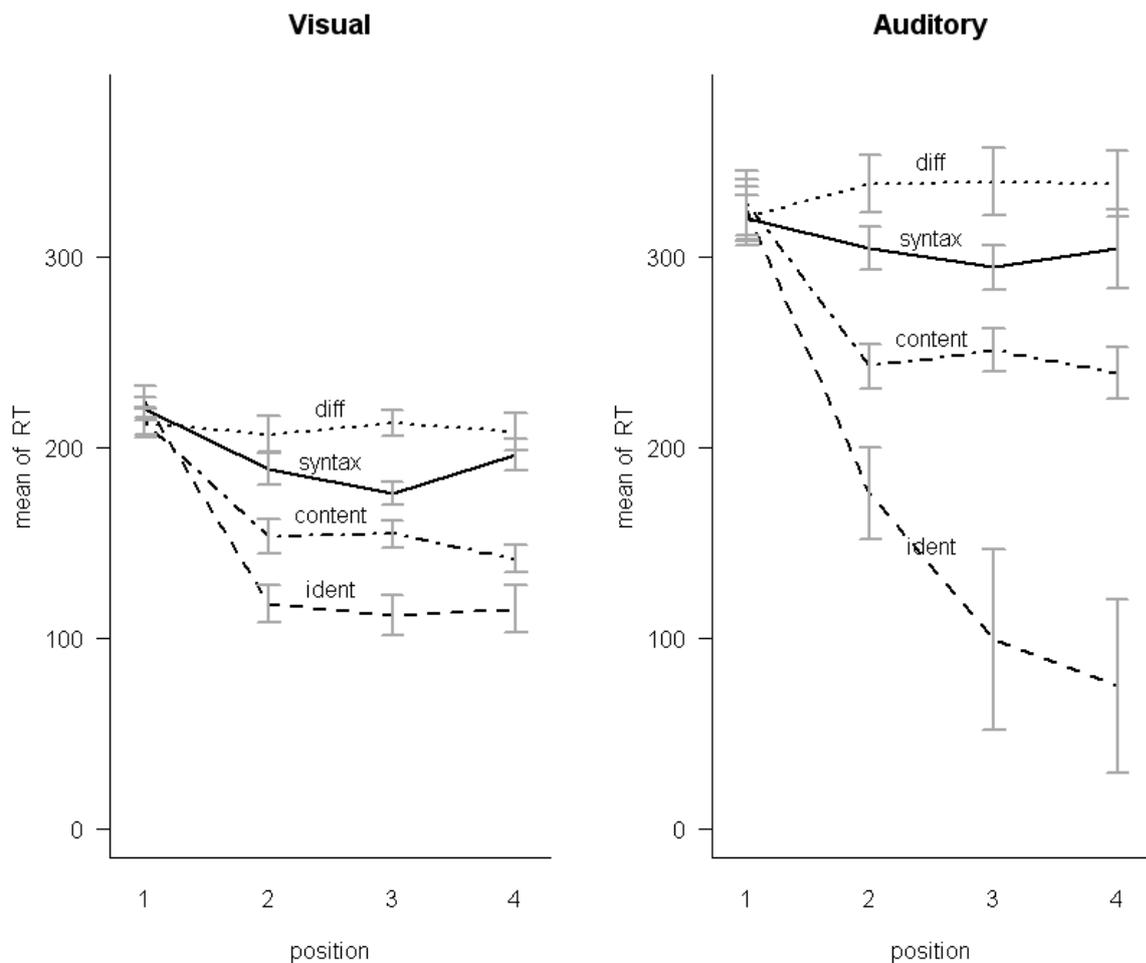


FIG. 2.5: Mean reaction times to detect the end of the sentence according to condition and position.

2.4.3 Discussion

When participants were asked to detect the end of the sentences, both “lexico-semantic” and “syntactic” priming were observed in the reaction times patterns. As in the fMRI experiment, priming by sentence content was the dominant effect, but syntactic priming, though about half as large, was also significant. Why was syntactic priming observed in behavioural but not in fMRI data ? One obvious possibility is that fMRI was not sensitive enough to detect a small effect of syntactic adaptation. Another possibility is that the behavioural task induced participants to rely on peculiar strategies not present during fMRI, where the only task was to attend to meaning. In the same syntax condition, it was possible to exploit the regularity of the syntactic structures, notably thanks to the repetition of the content words, to predict whether a given word would be the last of the sentence. When designing the fMRI experiments, we chose not to ask participants to perform an explicit decision task in order to measure activations related to the “normal”, automatic processing of sentences. Whether the contrasting results of the behavioural and the fMRI experiments are due to various task demands or to differential sensitivity is an open issue.

2.5 General Discussion

In the first experiment, we observed reductions in the activity of several areas of the language network when a sentence was repeated. Relative to previous research, we have established two important new results : (1) the reduction in activation occurs for both visual and auditory sentence presentation, suggesting that many of the adaptation regions are coding for amodal levels of word, sentence or semantic processing ; (2) reduced activation can be observed even when sentences are not repeated identically, but when

they share the same lexico-semantic content (that is, they have the same content words and argument structure, but express different grammatical constructions). By contrast, there was no evidence for fMRI adaptation when successive sentences shared the same syntactic constructions but differed in lexico-semantic content. The second experiment, using a restricted set of four syntactic constructions, replicated this absence of significant syntactic adaptation. Yet, in a third purely behavioural experiment that used the design and material of Experiment 1, participants detected the end of sentences faster, both in syntactically and in semantically homogeneous blocks.

One possible interpretation could be that the “passive” reading or listening task did not force participants to fully parse the sentences (Bever, 1970). A similar argument was advanced by Indefrey *et al.* (2004). These authors found that activation was stronger in a dorsal part of Broca’s area when participants produced full-fledged sentences rather than simpler word lists. However, when listening to the same utterances, there was no difference in brain activation between full sentences and word lists. This finding led the authors to propose that the degree to which listeners recruit syntactic processing resources in language comprehension may be a function of the syntactic demands of the task or the stimulus material. Our participants were not forced to engage in a syntactic analysis of the stimuli as they just had to read or listen to the sentences passively. The same applies to the participants in Noppeney & Price (2004)’s study, but the presence of locally ambiguous and garden-path sentences may have induced them to engage more in syntactic computations.

The presence of syntactic priming in the reaction time data and its absence in fMRI data may be due to a lower sensitivity of the fMRI technique. Alternatively, as mentioned in the discussion of Experiment 3, the drop in reaction-times might be due to specific strategies induced by task demands. Therefore one cannot exclude the possibility that the absence of syntactic fMRI adaptation in comprehension is genuine and reveals something

significant on the computational building blocks in parsing. Our experiment intended to find out whether or not the repetition of a grammatical construction provokes a reduction of activity in brain areas encoding linguistic representations. A construction is a kind of a structural schema, or skeleton, defined by certain elements of the functional lexicon and the subtrees and computational processes associated to them. For instance, each cleft construction has the *It is... that...* configuration and involves A' movement of the clefted element, each passive has be auxiliary and past participial morphology, and involves A movement of the object to subject position, each question has a Wh element and inversion, and involves A' movement of the Wh element,... According to current linguistic analyses, a construction is not a primitive structural object, but a conglomerate of such finer properties : choices in the functional lexicon, elementary subtrees, and elementary computational processes like the different kinds of movement. The lack of adaptation may then be taken as an indication that the parser does not build construction based-representations, but directly attends the finer computational ingredients just mentioned.

In contrast to the absence of syntactic adaptation in fMRI data, we found clear adaptation effects when sentences having the same lexico-semantic content were repeated. In particular, regions of the left superior and middle temporal gyri bordering the Superior Temporal Sulcus (STS) showed reduced activation. These regions are prime candidates for the processing of sentence meaning (Davis & Johnsrude, 2003; Friederici *et al.*, 2003). Although our design does not allow us to properly disentangle the contributions of word forms, word meanings, argument structure, or whole sentence meaning to the repetition effects, it is interesting to note that adaptation was observed, for the visual modality only, in the fusiform gyrus in the vicinity of the "Visual Word Form Area", where Cohen *et al.* (2004) have described adaptation when isolated words were repeated. Our results confirm and extend their finding to words presented within sentences. The repetition of lexico-semantic content, in the reading task only, also yielded adaptation effects in the

left inferior frontal and precentral regions. The precise nature of the processes involved cannot be established with certainty but it is noteworthy that Chee *et al.* (2003) and Klein *et al.* (2006) have described adaptation effects in the frontal regions (BA44, BA45 and BA9) when a word is followed by its translation in another language.

It is interesting to compare our study with another one that looked for modality-specific and common regions activated by passive reading and by passive listening (Jobard *et al.*, 2007). These authors reported common activations in the bilateral precentral and inferior frontal regions, and the left temporal gyri, as well as the posterior part of the middle temporal gyrus, extending ventrally in the occipital-temporal junction. In the present study, the intersection of regions activated by reading or listening (significantly more than during the silent baseline) belonged exclusively to the left hemisphere and comprised most of the middle and superior temporal gyrus, the inferior frontal regions (pars triangularis and pars opercularis), as well as areas in the precentral gyrus and in the Supplementary Motor Area (SMA). The frontal activations are quite similar to that described by Jobard *et al.* (2007). However, the temporal activations that we observed are more extensive. This is likely due to the fact that some of the stimuli used by Jobard *et al.* (2007) were lists of words, which yield less activation than sentences in anterior temporal regions. One unexplained discrepancy between Jobard *et al.* (2007)'s results and ours is the absence of activation in the basal temporal language area, or in the Visual Word Form Area (VWFA), during the auditory stimulation in the present study.

Disentangling the contributions of the different levels of representation involved in the adaptation observed when a sentence is repeated remains an avenue for future research. Grammatical constructions are complex objects consisting of conglomerates of more elementary computational ingredients, and it is conceivable that syntactic priming in comprehension only occurs for some of those computational elements. For instance, systematically contrasting sentence types involving A vs. A-bar movements is a possibi-

lity. If one could separate the contributions of lexical and sentence level meaning, this would also be worth investigating.

2.6 Résultats marquants

Ces premières expériences nous ont permis de mettre en évidence plusieurs points :

- Nous avons mis en évidence Les régions recrutées lors de la lecture et de l'écoute de phrases. Les régions frontales et occipitales gauches sont impliquées lors de la lecture de phrases alors que des régions temporales supérieures gauches dans leurs parties plus antérieures sont impliquées lors de l'écoute de phrases. Nous avons également pu mettre en évidence des régions amodales qui étaient aussi bien activées lors du traitement des phrases dans les modalités auditive ou visuelle. Ces régions sont les gyri temporaux supérieurs bilatéraux et moyens gauches ainsi que les régions frontales inférieures gauches (*pars triangularis* et *opercularis*). Ces régions amodales sont impliquées dans traitement du sens général de la phrase (Figure 2.3 page 69A).
- La répétition de la même phrase ou seulement du contenu lexico-sémantique entraînait un phénomène d'adaptation dans la plupart des aires temporales et frontales appartenant au réseau de traitement des phrases, aussi bien dans la modalité visuelle que dans la modalité auditive (Figure 2.2 page 68 et Table 2.3 page 73).
- Aucun effet d'adaptation syntaxique n'a pu être observé en imagerie lorsque la même structure syntaxique était répétée. Par contre, un effet d'adaptation du temps de compréhension des phrases a été trouvé lorsque l'on répétait la même structure syntaxique (Figure 2.5 page 82). Cet effet d'adaptation syntaxique en comportement peut être expliqué par la mise en place d'une stratégie par les participants leur permettant d'anticiper la fin des phrases. Cet effet était moins fort que les effets d'adaptation observés lors de la répétition de la même phrase ou lors de la répétition du contenu lexico-sémantique. Ce résultat est en contradiction avec l'étude de Noppeney & Price (2004).

Chapitre 3

Etude de la structure en constituants des phrases en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

3.1 Résumé

En utilisant un paradigme d'adaptation nous n'avons pas réussi à mettre en évidence des aires cérébrales impliquées dans la construction des arbres syntaxiques complet. Une autre approche consiste à chercher les régions cérébrales dont l'activation augmente avec la taille de l'arbre syntaxique ou des constituants qui le composent. C'est l'approche que nous avons adoptée pour cette expérience.

Des études antérieures ont comparé les activations liées au traitement des phrases à celles liées au traitement des listes de mots (Mazoyer *et al.*, 1993; Kaan & Swaab, 2002; Humphries *et al.*, 2006; Indefrey *et al.*, 2001a). Ces études ont permis de mettre en évidence une implication du pôle temporal antérieur gauche et du gyrus temporal moyen gauche lors du traitement des phrases. De telles régions pourraient avoir des activations qui augmentent de façon proportionnelle avec la profondeur des arbres syntaxiques ou

avec la taille des constituants.

D'autres expériences ont également comparé les activations liées au traitement de phrases qui avaient des structures différentes et qui impliquaient un traitement plus ou moins complexe (Just *et al.*, 1996; Caplan *et al.*, 1998, 1999). Dans l'étude de Just *et al.* (1996) les phrases différaient dans leurs complexités structurales : phrase active simple, phrase avec une proposition relative, ... Ils ont pu montrer une plus grande implication du gyrus frontal inférieur gauche lors du traitement des phrases plus complexes. Si cette région est impliquée dans le traitement des mouvements dans la phrase (plus nombreux dans les phrases complexes que dans les phrases simples), alors son activation pourrait augmenter de façon proportionnelle avec la complexité structurale des arbres syntaxiques.

La démarche suivie dans cette nouvelle étude consiste à rechercher les régions qui montrent une augmentation d'activation plus la taille des constituants augmente. Nous avons fait varier de façon paramétrique la taille des constituants dans les phrases. Pour cela nous avons présenté des suites de mots de longueur fixe mais contenant des constituants syntaxiques de plus en plus longs. Cette étude a été réalisée en IRMf et les participants devaient lire des phrases de 12 mots (présentées mot par mot). Les 6 premières conditions provenaient de phrases à branchement à droite (Figure 3.1 page ci-contre.a) et correspondaient à des listes de constituants de : (1) 1 mot (une liste de 12 mots complètement indépendant), (2) 2 mots, (3) 3 mots, (4) 4 mots, (5) 6 mots et (6) 12 mots (une phrase entière de 12 mots). Il y avait également deux autres conditions qui provenaient de phrases avec enchâssement (Figure 3.1 page suivante.b) et qui étaient formées par des non-constituants de : (1) 3 mots et (2) 4 mots. Ces deux dernières conditions nous ont permis de différencier le traitement des constituants du traitement des non-constituants.

Les résultats de cette étude nous ont permis de mettre en évidence les régions cérébrales où les activations présentaient une corrélation positive avec la taille des constituants (Figure 3.4 page 102, première ligne) : les gyri temporaux antérieur et postérieur

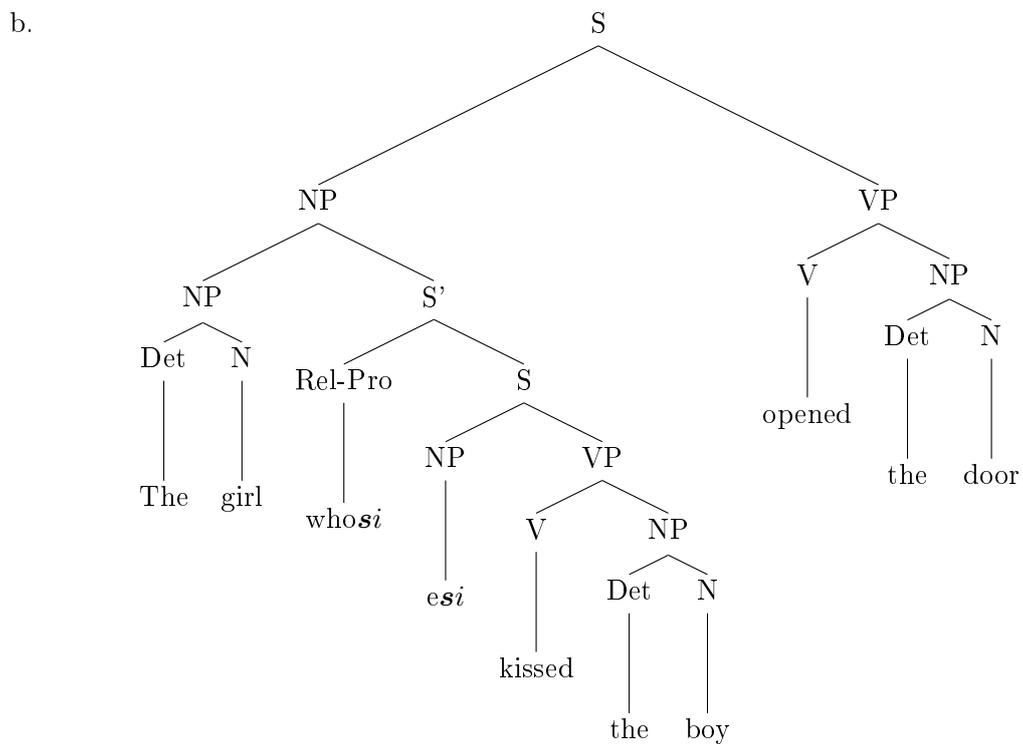
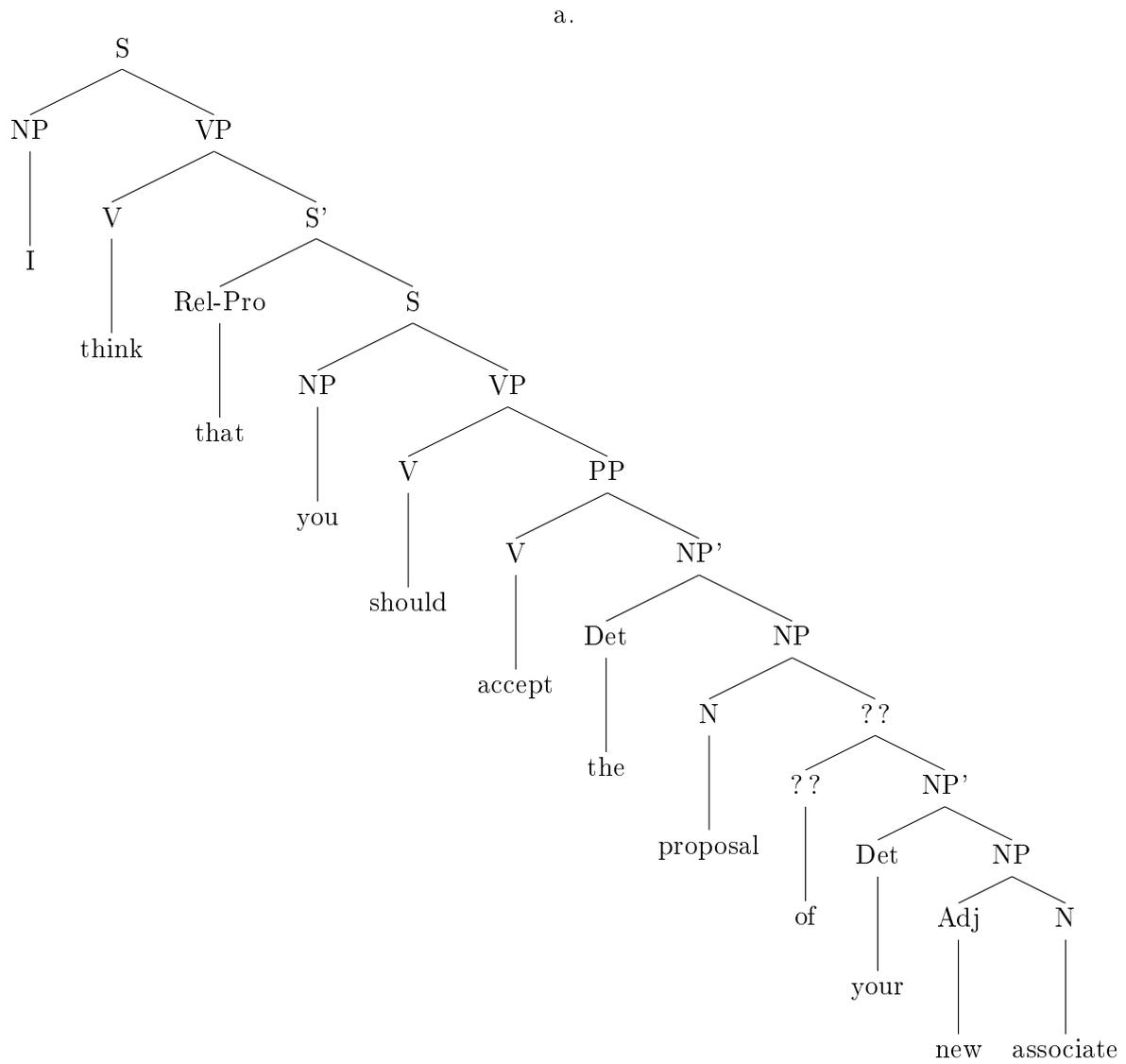


FIG. 3.1: Deux exemples de structures syntaxiques. En haut : Phrase à branchement à

gauches et les régions frontales inférieures gauches. D'autres régions présentaient une corrélation négative avec la taille des constituants (Figure 3.4 page 102, deuxième ligne). Ces régions étaient relativement bilatérales et appartenaient principalement à des régions occipitales et pariétales.

Nos résultats confirment les études antérieures montrant l'implication du lobe temporal antérieur gauche et le gyrus temporal moyen gauche pendant le traitement des phrases. Notre étude ne permet pas uniquement de comparer le traitement des phrases à celui des listes de mots, mais grâce à la variation paramétrique de la taille des constituants nous avons pu mettre en évidence des aires cérébrales dont l'activation dépendait de la taille des constituants d'une phrase.

De plus, en comparant les activations engendrées par le traitement des constituants et des non-constituants, nous avons pu mettre en évidence que les non-constituants de 3 ou 4 mots impliquaient des régions similaires aux constituants de 1 ou 2 mots et pas aux constituants de 3 ou 4 mots. Ce résultat est en accord avec la perspective structurale de Chomsky et qui montrerait que la structure en constituants serait un composant de base des langues humaines.

L'expérience présentée dans ce chapitre correspond à un article en cours de soumission "Neural evidence for constituent-structure of analysis of sentences".

Les sections suivantes présente l'article en cours de soumission.

3.2 Introduction

As attested by the sentence "All mimsy were the borogoves" from Lewis Carroll's *Jabberwocky*, or by the famous example "colourless green ideas sleep furiously" vs. "Furiously sleep green ideas colourless" (Chomsky, 1957), native speakers of a language possess intuitions of grammatical well formedness that are not reducible to meaningful-

ness nor to probability (assuming that both strings have an a priori null probability; yet see Pereira, 1990). Trying to define effective procedures that distinguish between grammatical and ungrammatical sentences in human languages, Chomsky (1957) argued that left-to-right Markovian models that described sentences as simple chains of words with relations between adjacent words (Shannon, 1948) were not adequate to do the task. He pointed out that such models do not account for recursively center-embedding structures (see the example in Figure 3.1 page 91.b). He proposed a more powerful generative model in which syntactic structures play an important role. For example, the relationship between an affirmative sentence and the corresponding interrogative sentence is more naturally expressed by taking into account the syntactic structure of the sentence than its raw word order; also, the rules that explain when a pronoun can be bound or not to another noun in the same sentence critically rely on the phrase-structure of the sentence (contrast *John thinks he is intelligent* with *He thinks John is intelligent*: only in the first sentence *he* can refer to *John*) (Haegeman, 1991). It may be not an exaggeration to say that most current syntactic theories rely on syntactic trees.

If grammatical structure is a matter for linguistic analysis, its mental representation and the real-time processes involved in language comprehension and production requires psycholinguistic and neurolinguistic investigations. What is the psychological evidence for syntactic structures in actual production and comprehension of language? It is difficult to image that speech production could work at all without the planification offered by syntactic trees. Presumably, there is a stage in which several of the words of the message are simultaneously activated, and language-specific syntactic constraints are used to sort them in correct serial order. Experimental evidence in favour of syntactic structure existence comes from syntactic priming studies showing that people tend to reuse the same syntactic constructions as they heard when speaking (Bock, 1986; Pickering & Branigan, 1999).

For speech comprehension, or reading, the situation is less clear. Whether or not humans need to systematically recover the full syntactic tree of a sentence is controversial (Frazier, 1998; Bever, 1970; Ferreira *et al.*, 2002). Moreover, experimental evidence for syntactic priming in perception is elusive (Branigan, 2006).

To locate the neural representations of the syntactic processes in the brain, one approach consists in comparing patterns of activation elicited by sentences and unstructured lists of words. Of interest is that this yields different results in perception and in production. The production of sentences, compared to the production of series of words, only yields additional activation in the left frontal operculum (Indefrey *et al.*, 2001a; Golestani *et al.*, 2006). On the receptive side, however, sentences typically give more activation than word lists in the left middle temporal gyrus (eg. Mazoyer *et al.*, 1993, see Kaan & Swaab, 2002 for a review).

We reasoned that a brain region that encodes syntactic trees should show an activation which increases with the amount of structure, that is, the size of the tree. We created strings of 12 words by concatenating progressively longer constituents (see Table 1). For conditions “c1” to “c12”, these constituents came from right branching sentences similar to that of Figure 3.1.a, and had the size of 1, 2, 3, 4, 6 or 12 words, respectively. As a result of this procedure, the depth of the syntactic trees increased linearly across the conditions. Two additional conditions, “nc3” and “nc4”, were generated by concatenating a series of three or four words that did not form constituents because they came from sentences of the type described in Figure 3.1.b, straddling the main NP-VP constituents. In other words, they were possible word chains that did not constitute possible constituents.

3.3 Methods

3.3.1 Participants

Twenty young adults native speakers of French (10 women and 10 men; age : mean = 24.6; sd = 6.5; range = 18-37 years) participated in the experiment. All were right-handed (scores at the Edinburgh test : mean = 80; sd = 20; range = 40-100). The experiment was approved by the regional ethics committee and written informed consent was obtained in all cases. The participants received 80 euros for their participation.

3.3.2 Stimuli

Two hundred right-branching sentences and one hundred and twenty center-embedded sentences were created (see Figure 3.1 for examples). Each of these sentences contained 12 words. From the right-branching sentences, we created 6 mini-lists of one, two, three, four, six or twelve-word constituents (Table 3.1). From the center-embedded sentences, we created 2 mini-lists of three or four-word non-constituents. From these mini-lists of phrases, we recombined them and created phrases of 12 words belonging to each of the 8 conditions described in (Table 3.1).

For instance, the condition “3-word constituents” was made up of 12 words formed by 4 groups of 3-word constituents.

This material was used to create different experimental lists for each participant. Each participant’s list contained 160 stimuli, 20 per experimental conditions (see Table 1). In addition, 15 sentences were inserted at random position in the list between the other stimuli and these sentences were probe sentences which instructed subjects to press a button.

Across participants, a given sentence had the same likelihood of appearing in any

Condition	Example of stimuli
<i>From right-branching sentences</i>	
1-word constituent	indicate tense thing tree that they instruments look copy statements heart more <i>signaler tendu chose arbre que elles instruments regardent copie états cœur plus</i>
2-words constituent	the tasks the sources a hut his dog the customer the holes <i>les tâches les sources une cabane son chien le client des trous</i>
3word constituent	solve a problem repair the ceiling eat an apple buy a television <i>résoudre un problème réparent le plafond manger une pomme achètera une télévision</i>
4-word constituent	sleep on a mattress he hates the color they read their names <i>dormir sur un matelas il déteste la couleur elles lisent leurs noms</i>
6-word constituent	the letters sent to her daughter she walks in her hips swaying <i>les lettres envoyées à sa fille elle marche en balançant ses hanches</i>
12-word constituent	the journalist wrote an article denouncing frauds of the outgoing mayor <i>le journaliste écrit un article qui dénonce des fraudes du maire sortant</i>
<i>From center-embedding sentences</i>	
3-word non-constituent	last fatigue the work see least omnibus ruin my quality introduce their <i>dernier fatigue les travailler voient moins omnibus ruine mon qualité présente ses</i>
4-word non-constituent	special wheels come from the marriages present her of may confess their <i>roulettes spéciales viennent du les mariages présente ses de mai avouent leurs</i>

TAB. 3.1: *The 8 experimental conditions. The first six conditions come from right-branching sentences (like : the journalist wrote an article denouncing frauds of the outgoing mayor) and the other two come from center-embedding sentences (like : A bird who sang on the branch of a tree awakened Paul).*

of the eight experimental conditions.

3.3.3 Procedure

Each participant was scanned in five sessions. Each session lasted 9 minutes and comprised 35 phrases (4 times each condition plus 3 probe sentences). We used a slow event-related design where sentences were separated by 12 seconds of silence (Interstimulus Interval (ISI) = 12 secs.).

After each session, subjects had to make a recognition task. We presented 36 pairs of words to the participants and they had to decide which word between the 2 words presented they had already read in the previous session. Before entering the scanner, the participants were made familiar with the experiment with a short training of 9 sentences (including each condition plus a probe sentence instructing them to press a button). And after the experimental training they were also familiar with the inter-session task with a

short training of 4 pairs of words presentation.

The visual stimuli were projected in rapid serial presentation at the rate of one word every 300 msec.

3.3.4 Scanning and data analysis

Images were acquired with a 3T Siemens. Functional images used EPI sequences (TR = 2.4 secs, TE = 30 msec, Matrix = 64x64; Voxel size = 3x3x3 mm; Number of slices = 40). The anatomical scan used a 3D Gradient-echo sequence (TI = 900 msec, TE = 2.98 msec, TR = 2.3 sec; Voxel size = 1x1x1.1 mm).

Data were processed with the SPM5 software. The images were corrected for slice-timing differences and motion. The anatomical images were normalized using the 152 brain template from the Montreal Neurological Institute and the segmentation and normalization parameters were applied to the functional images, which were finally smoothed with a 5 mm³ Gaussian kernel.

For each subject, a general linear model was created which included, for each session, 8 independent variables including each condition. The event-related regressors used the canonical hemodynamic responses and their temporal derivatives included in SPM5. Additional event-related regressors modeling the probe sentences and the associated motor responses were included.

For second-level group analyses (random-effect), a smoothing kernel of 8 mm³ was applied to the individual contrast images.

In order to estimate the phase of the event-related BOLD response, a distinct model was also designed by convolving the same 8 independent variables with a single cycle of a sine and a cosine waveform at a frequency of 12 seconds. The ratio of the regression weights of the sines and cosines was then transformed with the inverse tangent to yield a response phase which was translated into a phase lag expressed in seconds (0-12 secs.).

BOLD response amplitude was computed as the square root of the sum of the squares of the sine and cosine coefficients. The Rayleigh circular statistic was used to contrast the observed distribution of phases to the null hypothesis of a uniform distribution across the phase circle.

Moreover, we used phase information and estimated the fraction of measurements of the phase that was situated within the expected response range (ERR) (see Sigman et al. 2007). A total of 160 measurements were obtained corresponding to 8 conditions for 20 subjects. The ERR was set to an interval from 3 to 10 seconds, based on previous characterizations of the HRF and allowing a margin to account for region-to-region variability and changes across conditions. The probability that x out of 160 measurements lies within the ERR can be calculated following the binomial distribution $f(x,160,p)$ where $p = 0.67$ is the fraction of ITI occupied by the ERR duration (8/12 secs.). In this study, we used a statistical criteria, setting the minimum number of sessions within the ERR to $(120/160)$ (75%). The probability that a voxel has a value of the phase within the ERR on more than 75% of the measured values, following the cumulative binomial distribution, is $p < 1.9 \times 10^{-27}$ ($\text{pbinom}(40,160,p=0.67)$).

3.4 Results

3.4.1 Behavioral results

The participants pressed a button after 97% of the probe sentences, showing that they attended to the stimuli.

During the inter-session task, subjects answered correctly in 63% of the cases. The percentage of correct answers according to the conditions is displayed on Figure 3.2. The level of correct answers was higher for the words coming from the entire-sentence condition than for the other conditions. The worse accuracy was observed for the word-list

condition. Analyses of variance revealed significant main effects of Conditions ($F(7,133) = 2.08$, $p = 0.05$). When we compared condition by condition, we observed a significant effect for the comparison of the “1-word constituent and the 12-word constituent” ($F(1,19) = 9.16$, $p = 0.007$), the “6-word constituent and the 12-word constituent” ($F(1,19) = 7.88$, $p = 0.011$). Moreover, there was no significant effect when we compared the 12-word constituent with the non-constituent conditions ($F(1,19) = 1.409$, $p = 0.2499$ for the 3-word non-constituent condition and $F(1,19) = 0.0951$, $p = 0.7612$ for the 4-word non-constituent condition). Note that the stimuli from conditions c01-c12 were made from one set of sentences while the stimuli from nc3 and nc4 were made from another set (see materials). Therefore, the comparison between the constituent and non-constituent conditions is less well controlled than the comparisons between the constituent conditions : it may be that the words from the non-constituent set were easier to remember.

3.4.2 fMRI results

3.4.2.1 The constituent-reading network : Basic network relative to the rest

The networks relative to rest of the 8 conditions are displayed in Figure 3.3. When participants read the stimuli, we can observe in all of the conditions the involvement of the left and right frontal gyri, occipital gyri, parietal gyri and temporal gyri. Moreover, we can observe that the activations of the left anterior and posterior temporal gyri increase as the size of constituents increases. By contrast, the activations of the right frontal gyrus and the bilateral parietal gyri were more extended when constituents were small.

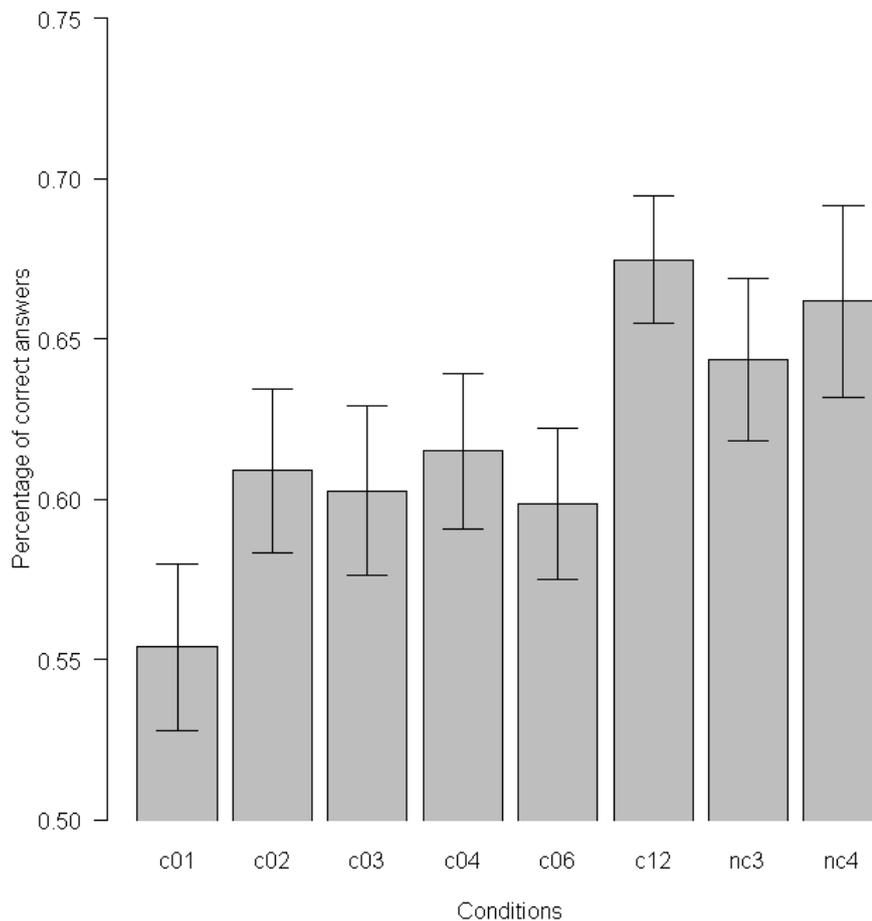


FIG. 3.2: *Distribution of the percentage of correct and incorrect answers according to the 8 conditions. c1 : 1-word constituent (a list of 12 words completely independent), c2 : 2-word constituent, c3 : 3-word constituent, c4 : 4-word constituent, c6 : 6-word constituent, c12 : 12-word constituent (an entire sentence of 12 words), nc3 : 3-word non-constituent and nc4 : 4-word non-constituents.*

3.4.2.2 A subset of these regions show monotonic activation as a function of hierarchical structure

To better understand the differences between the conditions, the first analyses of fMRI data looked for brain areas showing differences in the BOLD response according to the first six conditions (Figure 3.3).

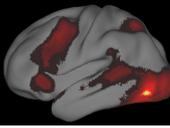
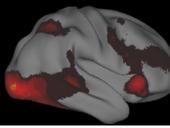
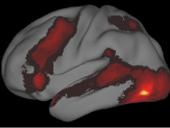
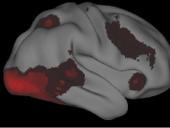
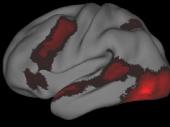
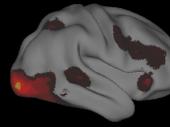
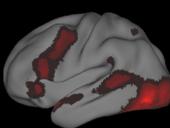
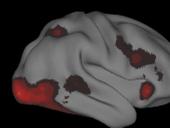
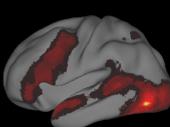
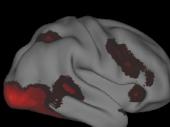
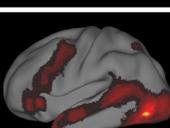
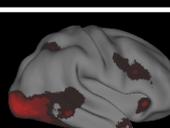
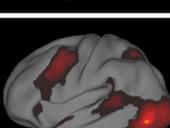
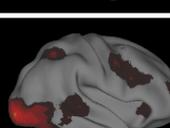
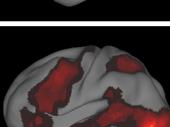
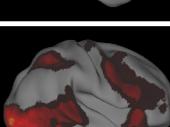
$p < 0.001$	Left	Right
« 1-word constituent »		
« 2-word constituent »		
« 3-word constituent »		
« 4-word constituent »		
« 6-word constituent »		
« 12-word constituent »		
« 3-word non-constituent »		
« 4-word non-constituent »		

FIG. 3.3: The basic networks relative to the rest of the 8 conditions ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).

We used a linear contrast across conditions (c1, c2, c3, c4, c6 and c12) to identify areas showing increase or decrease of activation with amount of structure. Significant increase of activation was observed in anterior and posterior regions of the left superior

and middle temporal gyri, in the left inferior frontal gyrus and in the left putamen (Table 3.2 and Figure 3.4, first line). We also observed bilateral decrease of activation in several regions : in the left and right occipital gyri (included the fusiform gyri), in the left and right insula, in the left and right posterior parietal regions, in the right inferior parietal lobule, in the right middle frontal regions and in the right cingulate gyrus (Table 3.2 and Figure 3.4, second line).

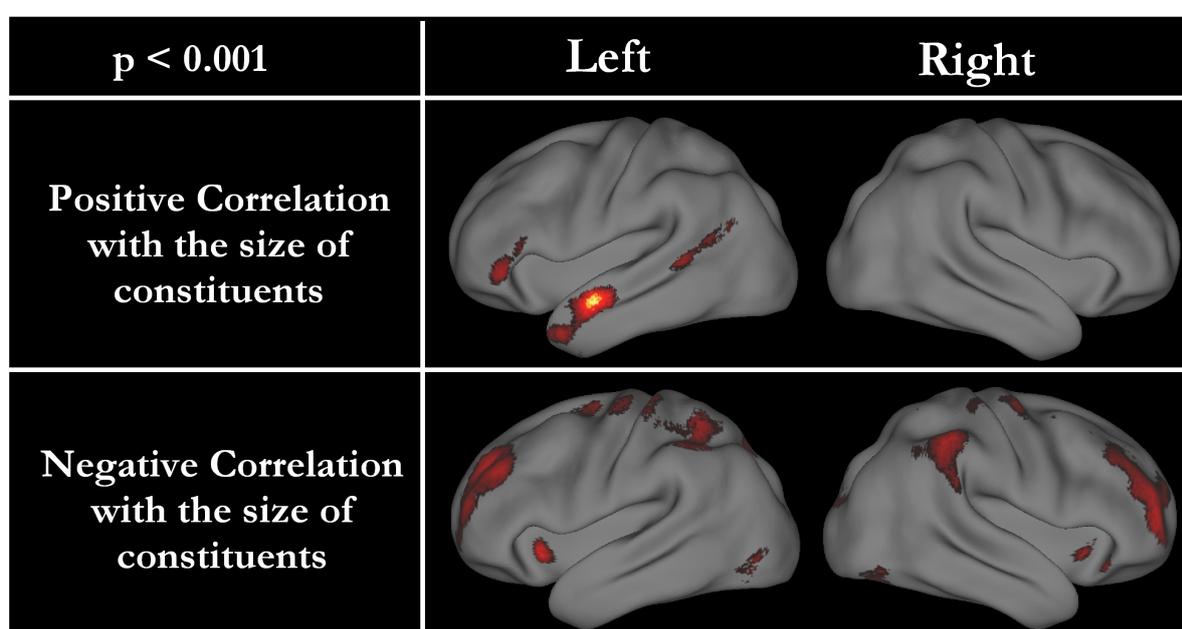


FIG. 3.4: Areas showing a negative or a positive correlation with the size of constituents ($p < 0.01$ uncorrected voxel-based).

3.4.2.3 Phase analysis

We also analyzed the phase of the BOLD response : Two effects are apparent in the hemodynamic response curves shown in Figure 3.5.

Contrast	Z score	p value (FDR)	Extent (mm ³)	MNI Coordinates		
				X	Y	Z
<i>Positive Correlation with Complexity</i>						
Left Middle Temporal Gyrus	4.93	0.002	111	-54	-9	-12
Left Posterior Superior Temporal Gyrus	4.86	0.002	46	-42	-48	15
Left Middle Temporal Gyrus	4.55	0.003		-45	-45	3
Left Anterior Superior Temporal Gyrus	4.05	0.007	27	-45	18	-30
Left Inferior Frontal Gyrus	3.89	0.008	13	-54	21	12
Left Inferior Frontal Gyrus	3.70	0.013	18	-48	30	0
Left Putamen	3.86	0.010	11	-18	9	6
<i>Negative Correlation with Complexity</i>						
Left Lingual Gyrus	4.83	0.002	177	-15	-90	-9
Left Fusiform Gyrus	3.74	0.005		-30	-54	-12
Left Middle Occipital Gyrus	3.40	0.008	32	-48	-75	-12
Left Insula	4.16	0.003	30	-36	12	0
Left Posterior Parietal Region (BA40)	4.10	0.003	98	-42	-48	45
Left Precuneus	3.83	0.004		-18	-66	36
Left Posterior Parietal Region (BA4)	3.66	0.006	87	-36	-30	66
Left Posterior Parietal Region (BA6)	3.65	0.006		-42	-18	63
Right Occipital Gyrus	3.80	0.005	67	33	-75	-9
Right Fusiform Gyrus	3.77	0.005		33	-63	-15
Right Middle Occipital Gyrus (BA19)	3.48	0.007	11	51	-69	-12
Right Middle Frontal Gyrus	4.66	0.002	100	36	42	18
Right Middle Frontal Gyrus	4.25	0.002	55	39	-6	60
Right Insula (Orbitofrontal Gyrus) (BA47)	4.59	0.002	102	42	15	-3
Right Posterior Parietal Region (BA40)	4.91	0.002	148	51	-39	60
Right Posterior Parietal Region (BA40)	3.99	0.003		45	-51	57
Right Inferior Parietal Lobule	3.61	0.006		48	-42	39
Right Intraparietal Gyrus	3.55	0.007		33	-60	60
Right Inferior Parietal Lobule	3.27	0.010	11	63	-39	27
Right Anterior Cingulate Gyrus (BA42)	4.65	0.002	171	6	24	42
Right Cingulate Gyrus	3.84	0.004	45	0	-27	27

TAB. 3.2: Peak voxels of activated regions showing positive or negative correlation with the size of constituents ($p < 0.05$ (FDR) voxel-based; clusters' extent > 10 voxels; masked by the "Phrases - Silence" contrast at $p < 0.001$).

First, the latency of the BOLD response varied across regions, and second, it increased with the size of the constituents (Figure 3.5). To rigorously quantify both effects, we fitted the whole-brain data with a set of sine and cosine functions in order to extract the phase and amplitude of the BOLD response (see Methods, above). Then we submitted

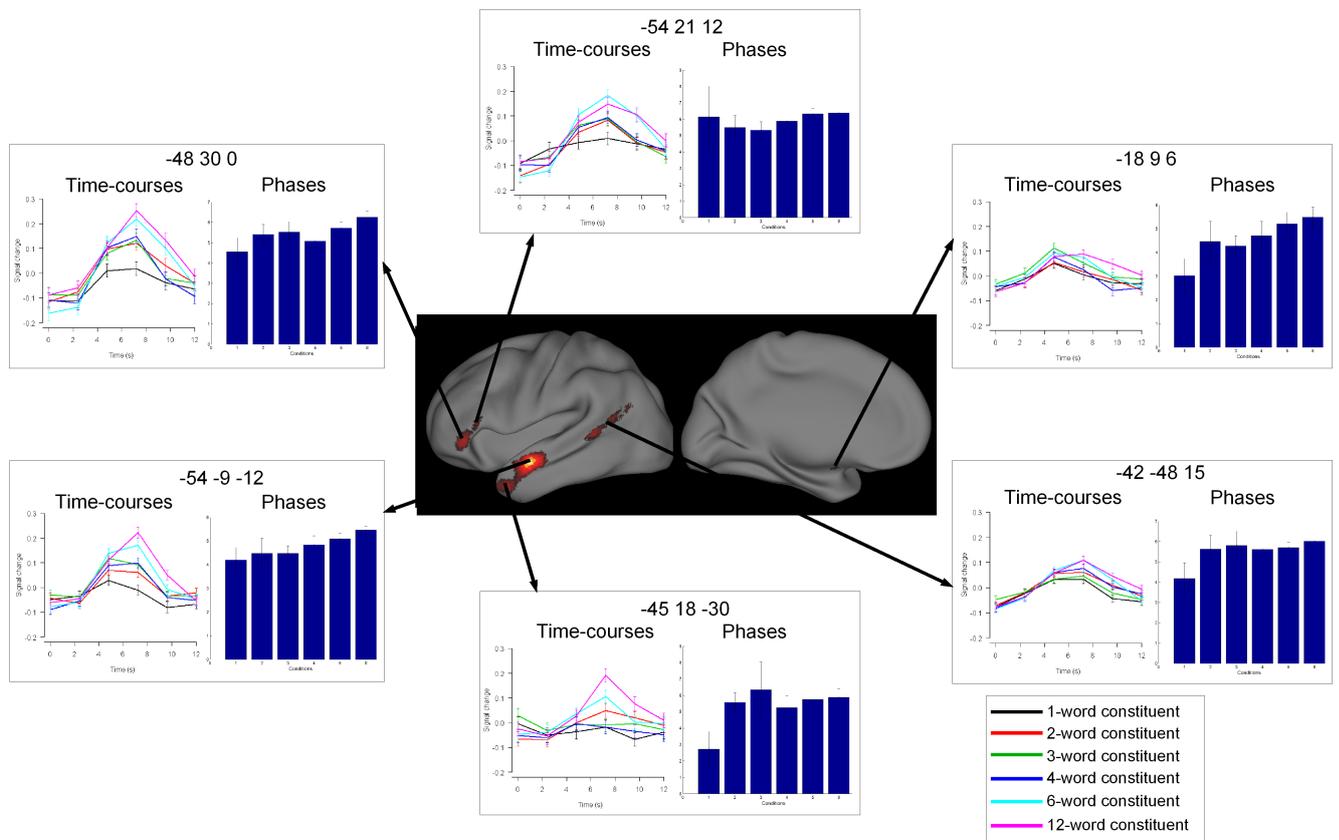


FIG. 3.5: Time-course and phases in regions of interest centered on the peaks defined by SPM shown in Figure 3.4 (first line), where there was a positive correlation between the activation level and the complexity. MNI coordinates : -54 -9 -12 : left middle temporal gyrus ; -42 -48 15 : Left posterior superior temporal gyrus ; -45 18 -30 : Left anterior superior temporal gyrus ; -54 21 12 : left inferior frontal gyrus ; -48 30 0 : left inferior frontal gyrus ; -18 9 6 : left putamen.

both parameters to a between-participants random effect analysis. The amplitude data essentially replicated the above SPM analysis in the areas showing a positive correlation with the size of constituents.

The phase analysis between the different conditions showed that the activations in temporal and frontal areas slowed down according to the size of the constituents. Figure 3.6 displayed the phases of the 1-word constituent condition and of the 12-word constituent condition. In Figure 3.6 which shows the phase of the response to the entire sentence (12-word constituent condition), we observed a temporal progression with the

earliest responses noted in the left posterior middle temporal gyrus (5.2 secs.), followed by successively slower responses in the left middle temporal gyrus (5.4 secs.) and in the anterior superior temporal gyrus (5.9 secs.). After these temporal responses, the slowest responses were observed in the left inferior and middle frontal regions as well as in the left insula (respectively, 6.5, 6.8 and 7.5 secs.). In the left middle temporal gyrus (-54 -9 -12), in the left inferior frontal gyrus (-48 30 0) and in the insula (-36 18 0), we can observe a positive correlation between the slowdown of the activation in these regions and the size of the constituents.

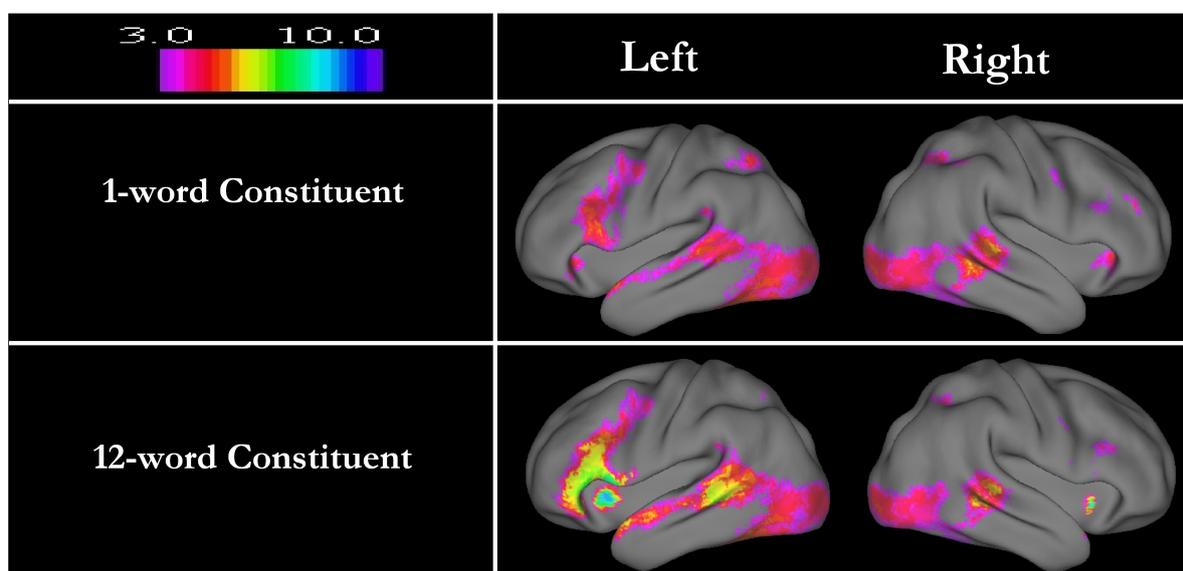


FIG. 3.6: *Phases of the 1-word constituent condition and the 12-word constituent condition. These networks were masked by the logpvalue of the respective images ($p < 0.001$) and masked by the ERR image at $p = 1.9 \times 10^{-6}$ comprising phases ranging between 3 and 10 seconds.*

3.4.2.4 Comparison between constituents and non-constituents

In a second analysis we compared the constituent and the non-constituent conditions (Figure 3.7 and Table 3.3).

We compared the activations for the 3-word non-constituent conditions with the 1-word constituent conditions or the 3-word constituent conditions. We observed no clear difference between the 3-word non-constituent condition and the 1-word constituent condition, but a clear difference between the 3-word non-constituent condition and the 3-word constituent condition in the left anterior and posterior middle/superior temporal gyri. When we compared the activations for the 4-word non-constituent conditions with the 2-word constituent conditions or the 4-word constituent conditions the only differences were observed in the contrast “4-word non-constituent condition VS 4-word constituents condition” in the left middle temporal gyrus, the left middle frontal gyrus, the left fusiform gyrus, the left superior parietal lobule, the right middle temporal gyrus, the right superior frontal gyrus and in the right inferior parietal lobule.

3.5 Discussion

This experiment allowed us to explore the processing of sentences according to the size of constituents. Our results provide evidence that parsing occurs during reading. It is to be noted that this is the case even in a situation where task demands do not require the participants to pay special attention to syntax (in contrast with paradigms where participants have to detect syntactic anomalies or perform grammaticality judgments.).

As we were interested in structure building, our stimuli were made from right branching sentences in order to avoid complexities due to movements (Grodzinsky & Friederici, 2006) and the depth of syntactic trees correlated with the size of the largest constituents. It should also be noted that our 1-word constituent condition was a pure word-list condition compared other studies (Humphries *et al.*, 2006; Vandenberghe *et al.*, 2002) where their word-list conditions matched more with our 2 or 3-word constituent

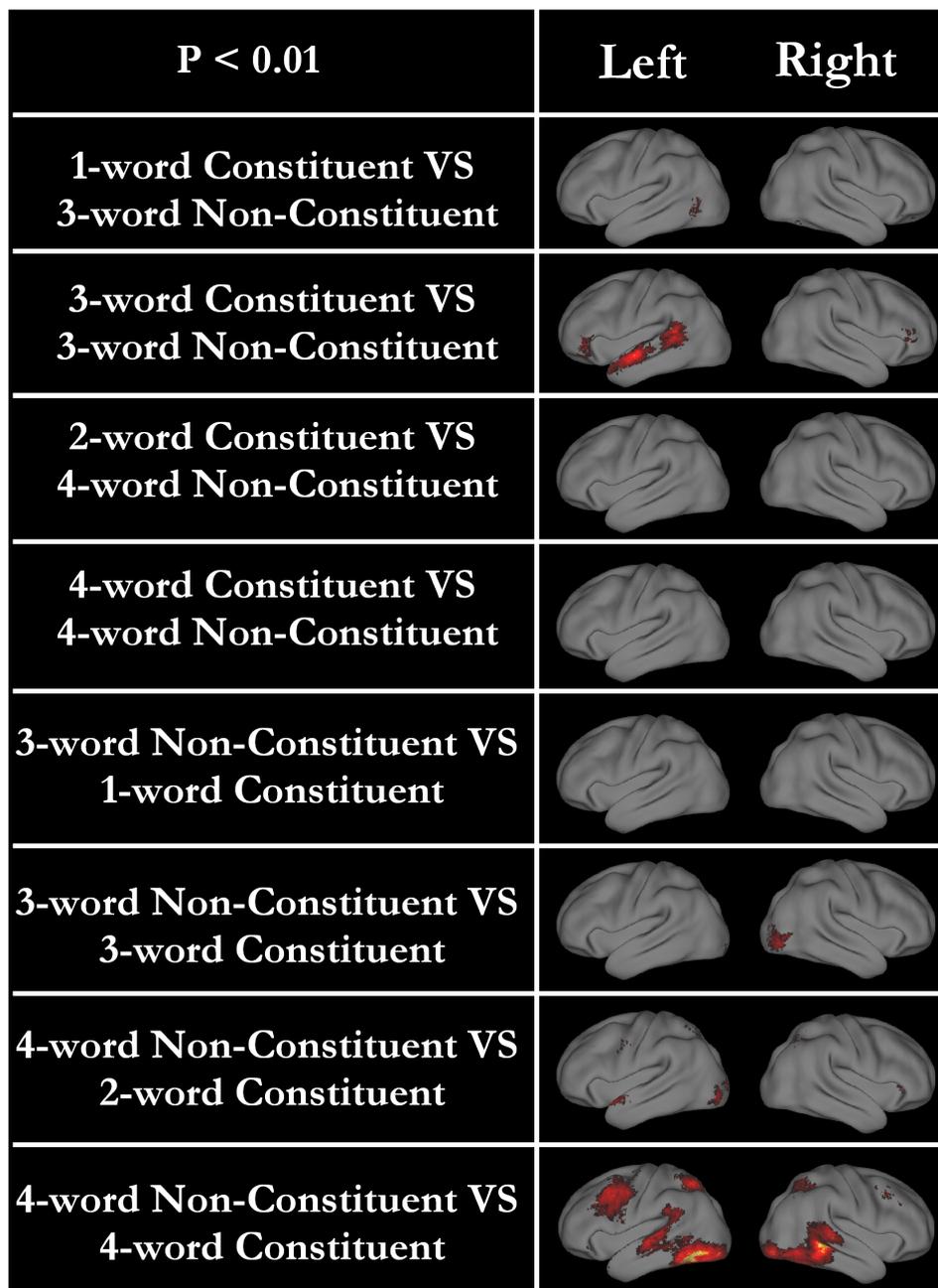


FIG. 3.7: Comparison between the Constituent and the Non-Constituent conditions. Contrasts threshold at $p < 0.01$ and masked by the contrast c_{12} (= entire sentence of 12 words) at $p < 0.001$.

conditions than with our 1-word constituent condition.

The study of Humphries *et al.* (2006) was consistent with the fact that the left

Contrast	Z score	p value (FDR)	Extent (mm ³)	MNI Coordinates		
				X	Y	Z
<i>"1-word constituent condition" VS "3-word non-constituent condition"</i>						
Right Middle Frontal Gyrus	3.5	0.449	10	30	39	-18
<i>"3-words constituent condition" VS "3-word non-constituent condition"</i>						
Left Middle Temporal Gyrus	3.51	0.224	80	-51	-15	-9
Left Superior Temporal Gyrus	3.33	0.224	89	-66	-45	12
Left Lentiform Nucleus	3.13	0.224	83	-18	9	6
<i>"3-word non-constituent condition" VS "1-word constituent condition"</i>						
Left Median Middle Temporal Gyrus	3.36	0.995	7	-36	3	-45
<i>"4-word non-constituent condition" VS "4-word constituent condition"</i>						
Left Middle Temporal Gyrus	4.47	0.009	82	-63	-27	-3
Left Middle Frontal Gyrus (BA8)	4.02	0.009	216	-54	9	39
Left Fusiform Gyrus	4.08	0.009	494	-48	-60	-12
Left Superior Parietal Lobule	4	0.009	122	-30	-66	45
Left Medial Globus Pallidus	3.29	0.013	59	-3	0	75
Right Middle Temporal Gyrus	3.67	0.009	545	63	-42	-3
Right Superior Frontal Gyrus	3.48	0.01	72	0	21	48
Right Inferior Parietal Lobule	3.87	0.009	62	36	-51	42

TAB. 3.3: *Peak voxels of activated regions showing differences between the Constituent and the Non-Constituent conditions ($p < 0.001$ voxel-based; clusters' extent > 10 voxels; masked by the "c12" condition (= entire sentence of 12 words) at $p < 0.001$).*

anterior temporal gyrus could be separated into two distinct regions. Their first region corresponded to our more posterior and superior part of the left anterior temporal gyrus (-54 -9 -12) which responded to the syntactic structure. This area showed a clear positive correlation with the size of constituents. This region seemed to use syntactic information in building basic constituent structure and may be involved in an early stage of syntactic parsing related to phrase structure analysis. The other part of the anterior temporal gyrus was more anterior and inferior (-45 18 -30) and was involved in sentence-level semantic integration.

Moreover, they found that the left angular gyrus integrated semantic and syntactic information to compute an overall sentence meaning. So the left posterior superior temporal gyrus (-42 -48 15) could be involved in the semantic processing of the sentence.

Grodzinsky & Friederici (2006) summarized the distinct syntactic levels of sentence processing. They made a schematic view of the main areas activated during syntactic processing. The frontal operculum area and the anterior superior temporal gyrus are involved in the build-up of local phrase structures which is consistent with our findings where the posterior and superior part of the left anterior temporal gyrus and the left inferior frontal gyrus seem to be involved in an early stage of syntactic parsing related to constituent.

We also observed the influence of the constituents relative to the non-constituents conditions. And these results showed the big influence of the constituent construction for the processing and the understanding of sentences and they were in agreement with the structural perspective of Chomsky. We also remarked that it's easier for the participants to remember words coming from the entire-sentence condition than for the other conditions. This finding is consistent with the idea that the constituent construction help toward the sentence comprehension.

Finally, with the phase analysis, during the processing of the entire sentences (12-word constituent condition), we observed a temporal progression with the earliest responses noted in the left posterior middle temporal gyrus, followed by successively slower responses in the left middle temporal gyrus and in the anterior superior temporal gyrus. After these temporal responses, the slowest responses were observed in the left inferior and middle frontal regions as well as in the left insula. These regions are mainly involved in the sentence processing (syntactic and semantic processing and the integration of these both informations) because for the processing of the lists of words we did not observe this temporal progression.

The study of Dehaene-Lambertz *et al.* (2006) revealed a similar temporal gradient along the dorsal-ventral and rostral-caudal directions : From Heschl's gyrus, where the fastest responses were recorded, responses became increasingly slower toward the

posterior part of the superior temporal gyrus and toward the temporal poles and the left inferior frontal gyrus, where the slowest responses were observed. Activations in the Heschl's gyrus were explained because participants heard sentences.

Our study provided new results regarding the treatment of constituents. We used parametric increase of the size of constituents which allowed us to identify areas showing activations correlated with the size of constituents, like the left anterior middle and superior temporal gyri, the left posterior superior temporal gyrus, the left frontal gyrus and the left putamen.

But we can question whether or not there was an influence of semantics in our experiment. Because, in this experiment, semantic coherence covaried with the depth of the syntactic tree. To exclude this factor, it could be useful to run a follow-up experiment, replacing the content words with pseudowords, in effect creating "Jabberwocky" sentences.

This kind of approach, that is to say, parametric variation of the size of trees, could be applied to domains other than language like music, movement or mathematics.

3.6 Résultats marquants

Cette expérience nous a permis de mettre en évidence plusieurs points :

- En présentant des suites de mots de longueur fixe mais contenant des constituants syntaxiques de plus en plus grands nous avons pu mettre en évidence les régions cérébrales impliquées dans la construction des constituants de la phrase. Les activations des gyri temporaux antérieur et postérieur gauches et des régions frontales inférieures gauches (Figure 3.4 page 102, première ligne) augmentaient de façon proportionnelle avec la taille des constituants.
- Nous avons mis en évidence une différence dans le traitement des constituants ou des non-constituants d’une phrase. Ce résultat est en accord avec la perspectives structurales de Chomsky et qui montrerait que la structure en constituants serait un composant de base des langues humaines.
- Une progression temporelle des activations au sein du gyrus temporal moyen gauche (de l’arrière vers l’avant) puis se terminant au niveau du gyrus frontal inférieur gauche a pu être observé lors de la lecture de phrases “entières” de 12 mots.

Chapitre 4

Etude des aires impliquées dans les traitements de la forme des mots, de leur sens et de celui de la phrase

4.1 Résumé

Le paradigme de l'amorçage de phrases utilisé dans l'expérience 1 du chapitre 2 a permis de trouver des effets d'adaptation lorsque des phrases ayant le même contenu lexico-sémantique étaient répétées. Les régions impliquées étaient principalement les régions des gyri temporaux supérieur et moyen gauches bordant le sillon temporal supérieur gauche. Notre dessin expérimental ne permettait pas de dissocier le traitement de la forme des mots, du sens des mots et de la structure argumentale de la phrase. Nous nous sommes demandés si nous pouvions dissocier les aires cérébrales impliquées dans ces différents traitements. Dans l'expérience suivante, nous avons essayé d'attaquer ce problème en utilisant à nouveau un paradigme d'amorçage. Les participants devaient lire des phrases qui étaient liées 2 à 2 et avaient en commun différentes caractéristiques. Soit

(1) la même phrase était répétée, (2) les mêmes mots de contenu¹ (même forme orthographique) étaient répétés, (3) des mots de mêmes sens (synonymes) étaient répétés (4) la structure argumentale (le même sens général) était répétée. Les résultats ont permis de mettre en évidence des aires impliquées dans les différents traitements de la phrase. Mais nous n'avons pas pu dissocier les régions impliquées dans le traitement de la forme du mot de celle(s) du sens du mot. Par contre nous avons pu mettre en évidence des régions du gyrus temporal moyen gauche (dans sa partie antérieure) qui avaient différents rôles aussi bien dans le traitement de la sémantique que celui de la complexité des phrases ou encore de l'intégration de ces deux informations.

4.2 Introduction

La compréhension des phrases implique des traitements à plusieurs niveaux : phonologique, lexical, syntaxique ou encore sémantique.

Dans l'expérience d'IRMf, décrite au chapitre 5, nous avons mis en évidence un large réseau montrant un effet d'adaptation lorsque le même "contenu lexico-sémantique" était répété (par exemple lorsque l'on répétait les phrases suivantes : "Un architecte a conçu ce palais" puis "Ce palais a été conçu par un architecte"...). Dans cette expérience l'effet d'adaptation pouvait être dû à la répétition de la forme des mots, du sens des mots ou encore de la structure argumentale de la phrase. Afin de poursuivre l'analyse du réseau du traitement des phrases nous avons mis en place une nouvelle expérience dans le but de voir si différentes aires montrent des effets d'adaptations à différents niveaux de traitement.

¹Les mots de contenu sont des mots portant un sens, comme les noms, verbes, adjectifs, ... ils sont à opposer aux mots de fonction comme les déterminants, les conjonctions, ...

4.3 Matériel et Méthodes

4.3.1 Sujets

21 jeunes adultes (12 femmes et 9 hommes de 18 à 29 ans (moyenne d'âge = 22 ans, écart-type = 2 ans) ont participé à l'expérience. Ils étaient tous droitiers (scores au test d'Edinburgh : moyenne = 80 ; écart-type = 19 ; intervalle = 38.5 à 100), sans troubles auditifs ni visuels non-correctés et de langue maternelle française. L'expérience a été approuvée par le comité d'éthique des personnes et un formulaire de consentement libre et éclairé a été signé par tous les participants. Ils ont reçu une indemnisation de 80€ pour leur participation.

4.3.2 Stimuli

Afin de créer les différentes conditions de cette expérience décrite dans la Table 4.1 page 117), nous avons créé une phrase active (par exemple, *les prisonniers ont avalé des tranquillisants*), puis nous avons créé une phrase active de même sens en utilisant des synonymes (par exemple, *les détenus ont ingurgité des calmants*) et enfin nous avons créé une troisième phrase active composée avec des mots de sens différent (par exemple, *la chaleur a incommodé les coquillages*). Nous avons manipulé les deux premières phrases afin d'obtenir des phrases de syntaxe différente (formes passive, clivée et clivée-passive) et/ou de structure argumentale différente. Nous avons alors obtenu 16 phrases différentes (16 premières lignes de la Table 4.1 page 117). A partir de la troisième phrase nous avons uniquement manipulé la structure syntaxique des phrases et nous avons obtenus quatre autres phrases (4 dernières lignes de la Table 4.1 page 117). Nous avons créé au total 180 groupes de 20 phrases qui avaient en commun soit la forme orthographique du mot, soit son sens, soit sa structure argumentale ou encore la même structure syntaxique.

Nous avons, de cette façon, généré 3600 phrases de longueur variable (entre 5 et

11 mots). Ces phrases ont été utilisées pour créer différentes listes expérimentales pour chaque participant. Ces listes comprenaient 180 paires de phrases. La première phrase (amorce) de chaque paire appartenait à l'une des 20 conditions expérimentales décrite dans la Table 4.1 page suivante). Et la deuxième phrase (cible) de chaque paire était toujours une phrase active.

Ces phrases prenaient en compte les facteurs suivants : “Syntaxe” (forme active, clivée, passive ou clivée-passive), “Structure Argumentale” (identique ou inversée), “Forme du Mot” (identique ou synonyme) et “Sens du Mot” (identique ou différent) ².

4.3.3 Protocole expérimental

Les participants devaient lire des phrases qui étaient présentées mot par mot à la cadence d'un mot toutes les 270 millisecondes et leurs durées variaient de 1.35 secs. à 2.97 secs.

Chaque participant effectuait six sessions visuelles qui comprenaient chacune 30 paires de phrases et duraient environ 7 min. Chaque phrases était séparée de la précédente par un intervalle de durée variable (3 à 7 secondes, moyenne = 5 secondes) (Figure 4.1 page 118).

Afin de contrôler l'attention des participants ils devaient réaliser une tâche de reconnaissance de phrase à la fin de chaque session : Six phrases étaient présentées et ils devaient décider s'il les avaient déjà vues ou non dans la session précédente. Avant l'expérience, les participants étaient familiarisés avec cette tâche grâce à un entraînement

²Ces phrases étaient composées de 50 % de phrases plausibles et de 50 % de phrases implausibles. Pour les obtenir nous avons créé deux listes de phrases : La première liste comprenait 90 phrases dites “symétriques” où la moitié des phrases étaient plausibles, l'autre moitié étaient implausibles et si l'on inversait leur structure argumentale elles restaient dans leur état de plausibilité. La deuxième liste comprenait 90 phrases dites “assymétriques” où la moitié des phrases étaient plausibles, l'autre moitié étaient implausibles et si l'on inversait leur structure argumentale leur état de plausibilité changeait. Cela avait été réalisé car dans les premières versions de cette expérience nous avons demandé aux participants de réaliser une tâche de plausibilité sur chacune des phrases.

Condition	Syntaxe	Structure Argumentale	Forme du Mot	Sens du Mot	Exemple de phrases p1	
1	+	+	+	+	Active	Les prisonniers ont avalé des tranquillisants.
2	-	+	+	+	Clivée	Ce sont des tranquillisants que les prisonniers ont avalés.
					Passive	Des tranquillisants ont été avalés par les prisonniers.
3	+	-	+	+	Clivée-Passive	C'est par les prisonniers que des tranquillisants ont été avalés.
					Active	Des tranquillisants ont avalé les prisonniers.
4	-	-	+	+	Clivée	Ce sont les prisonniers que des tranquillisants ont avalés.
					Passive	Les prisonniers ont été avalés par des tranquillisants.
5	+	+	-	+	Clivée-Passive	C'est par des tranquillisants que les prisonniers ont été avalés.
					Active	Les détenus ont ingurgité des calmants.
6	-	+	-	+	Clivée	Ce sont des calmants que les détenus ont ingurgités.
					Passive	Des calmants ont été ingurgités par les détenus.
7	+	-	-	+	Clivée-Passive	C'est par les détenus que des calmants ont été ingurgités.
					Active	Des calmants ont ingurgité les détenus.
8	-	-	-	+	Clivée	Ce sont les détenus que des calmants ont ingurgités.
					Passive	Les détenus ont été ingurgités par des calmants.
9	+	-	-	-	Clivée-Passive	C'est par des calmants que les détenus ont été ingurgités.
					Active	La chaleur a incommodé les coquillages.
10	-	-	-	-	Clivée	Ce sont les coquillages que la chaleur a incommodés.
					Passive	Les coquillages ont été incommodés par la chaleur.
					Clivée-Passive	C'est par la chaleur que les coquillages ont été incommodés.

TAB. 4.1: Répartition des différentes conditions expérimentales dans les différents facteurs : “Syntaxe”, “Structure Argumentale”, “Forme du Mot” et “Sens du Mot”. Une phrase amorce (phrase p1) pouvaient appartenir à l'une des 20 conditions expérimentale, et la phrase cible correspondait toujours à la phrase active initiale, c'est à dire ici dans cet exemple : *les prisonniers ont avalé des tranquillisants*.

de 8 phrases (incluant chaque condition) suivi d'un entraînement de la tâche de reconnaissance de 6 phrases. A la fin de l'expérience les remarques des participants étaient recueillies.

4.3.4 Paramètres de l'étude en IRM fonctionnelle et Acquisition des images

L'expérience a été réalisée avec un scanner IRM 3 Tesla (Bruker Medspec 30/100, Allemagne) au CEA/SHFJ d'Orsay. Les images fonctionnelles ont été obtenues avec une séquence d'images en écho-planar écho de gradient (Temps de répétition [TR] = 2.4 secs. ; Temps d'écho [TE] = 30 ms ; Bande Passante = 101 KHz ; Champs de vue [FOV]

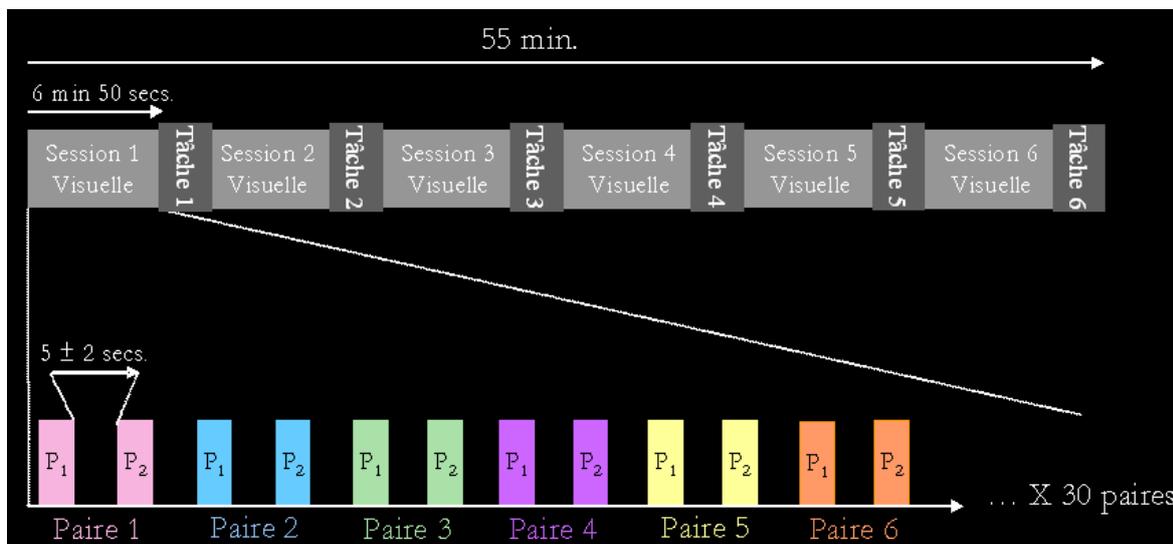


FIG. 4.1: *Protocole expérimental : Chaque participant effectuait 6 sessions visuelles.*

Une session était composée de 30 paires de phrases (p1 et p2) correspondant aux différentes conditions (Table 4.1 page précédente). Chaque phrase était séparée de la précédente par un silence de 5 secs en moyenne. A la fin de chaque session les participants devaient réaliser une tâche comportementale de reconnaissance de phrases lues/non-lues.

= 192x192 mm ; Matrice = 64x64 ; Taille des voxels : 3x3x3 mm, nombre de répétitions = 192, Durée de la séquence = 6 min 50 secs.). Le cerveau entier a été acquis en 40 coupes jointes de 3 mm d'épaisseur. Les images anatomiques de haute résolution ont été obtenues en utilisant une séquence en 3 dimensions en écho de gradient (Temps d'inversion [TI] = 2530 ms ; TE= 3.3 ms ; TR = 8.650 secs. ; FOV = 256x192x153.6 mm ; Matrice = 192x160x128 ; Taille des voxels : 1.33x1.2x1.2 mm ; Durée de la séquence = 5 min 23 secs.).

4.3.5 Traitement des images et Analyses statistiques

Les données ont été analysées avec le logiciel SPM2 (Statistical Parametric Mapping (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>)). Les quatre premiers volumes de chaque session ont été supprimés. Le prétraitement des images inclue la correction des déphasages

inter-coupes et la correction des mouvements. De plus les images anatomiques ont été normalisées sur le cerveau moyen de 152 sujets de l'institut neurologique de Montréal ("MNI T1 Template") (<http://www.mni.mcgill.ca/aboutf.html>) et les paramètres de normalisation ont été appliqués aux images fonctionnelles qui ont ensuite été lissées avec un filtre gaussien de 5 mm³.

Pour chaque sujet, un modèle linéaire a été créé en entrant, pour chaque session, 14 variables indépendantes : 4 pour la première phrase en fonction de la structures syntaxiques (forme active, passive, clivée et clivée-passive) et 10 régresseurs pour la deuxième phrase en fonction de la première phrase qui la précédait en croisant le facteur "Syntaxe" (identique ou différent) et les facteurs "Structure Argumentale", "Forme du mot" et "Sens du mot" (Table 4.1 page 117). Des régresseurs supplémentaires modélisant les phrases test et les mouvements ont également été inclus. La réponse aux événements était modélisée par la réponse hémodynamique canonique proposée dans SPM2, la durée des stimuli étant modélisée également. Les contrastes d'intérêt ont été calculés de la façon suivante (voir la Table 4.1 page 117 pour avoir les caractéristiques des différentes conditions) :

- "Adaptation à la même phrase" = (conditions 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10) - (4 x condition 1),
- "Adaptation à la même forme du mot" = (conditions 5 + 6 + 7 + 8) - (conditions 1 + 2 + 3 + 4),
- "Adaptation au même sens du mot" = 4 x (conditions 9 + 10) - (conditions 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8),
- "Adaptation à la même structure argumentale" = 2 x (conditions 3 + 4 + 7 + 8 + 9 + 10) - 3 x (conditions 1 + 2 + 5 + 6),
- "Adaptation à la forme active" = (conditions 2 + 4 + 6 + 8 + 10) - (conditions 1 + 3 + 5 + 7 + 9).

Pour les analyses de second niveau, les images des contrastes individuels ont été lissées avec un filtre gaussien de 8 mm^3 et soumises à des tests T de Student à un échantillon. Les effets considérés comme significatifs sont ceux ayant passé le seuil de $p < 0.001$ (non-corrigé) au niveau des voxels. Aucun participant n'a été détecté comme "atypique" en utilisant la boîte à outil "Distance" de SPM (Mériaux *et al.*, 2003).

4.4 Résultats

4.4.1 Tâche comportementale

Lors de la tâche comportementale de reconnaissance des phrases les participants ont reconnu les phrases cibles avec une précision de 86 % ce qui montre qu'ils étaient attentifs aux stimuli.

4.4.2 Imagerie fonctionnelle

La première analyse réalisée sur les données d'IRM fonctionnelle avait pour but de mettre en évidence les aires cérébrales qui montraient des différences d'activation pour les phrases cibles en fonction des phrases amorces qui les précédaient (Figure 4.2 page suivante). La Table 4.2 page 122 détaille les régions cérébrales qui montrent un effet d'adaptation en fonction de la répétition de : la même phrase, la même forme du mot, le même sens du mot, la même structure argumentale ou la même syntaxe. Les contrastes d'intérêt ont été calculés de la façon suivante (Les caractéristiques des différentes conditions sont détaillées dans la Table 4.1 page 117 et les contrastes réalisés sont décrits dans la section 7.3.5).

Lorsque la même phrase est répétée à l'identique on observe un effet d'adaptation

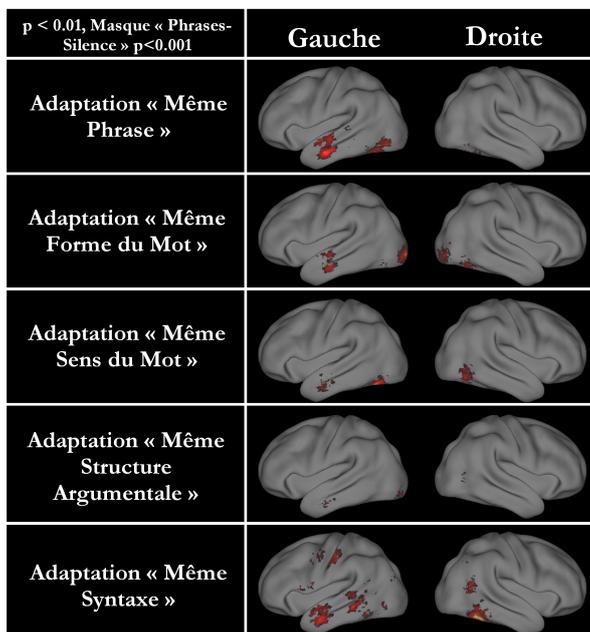


FIG. 4.2: Régions cérébrales montrant un effet d'adaptation lors de la répétition de la même phrase, de la même forme du mot, du même sens du mot, de la même structure argumentale ou de la même syntaxe. $p < 0.01$ non-corrige, masqué par le contraste "Phrases - Silence" à $p < 0.001$.

au niveau du gyrus temporal moyen gauche dans sa partie antérieure, du gyrus fusiforme ainsi qu'au niveau du gyrus lingual gauche. Lorsque la même forme du mot est répété nous observons des effets d'adaptation au niveau du gyrus temporal moyen gauche, du gyrus occipital moyen gauche et du gyrus occipital inférieur droit. Lorsque l'on répète le même sens du mot, un effet d'adaptation est observable au niveau du gyrus temporal moyen gauche, du gyrus fusiforme gauche et du gyrus parahippocampique droit. Lorsque la même structure argumentale est répétée un effet d'adaptation est observable au niveau du gyrus occipital inférieur gauche et également au niveau du gyrus temporal antérieur gauche.

Un résultat étonnant est lorsque la même structure syntaxique (forme active) est répétée, un large réseau cérébral montre un effet d'adaptation, il inclue le gyrus temporal moyen gauche, le gyrus frontal supérieur gauche, le gyrus fusiforme gauche, les gyri pré

Contraste	Score de Z	Valeur de p	Etendue (mm ³)	Coordonnées MNI		
				X	Y	Z
<i>Adaptation "Même Phrase"</i>						
Gyrus Temporal Moyen Gauche	3.77	0.14	68	-60	-12	-9
Gyrus Temporal Moyen Gauche (BA21)	2.86	0.33	5	-69	-27	0
Gyrus Fusiforme Gauche (BA37)	3.22	0.19	39	-39	-60	-12
Gyrus Lingual Gauche	2.73	0.335	9	-18	-96	-6
<i>Adaptation "Même Forme du Mot"</i>						
Gyrus Temporal Moyen Gauche (BA21)	3.05	0.292	41	-63	-12	-9
Gyrus Occipital Moyen Gauche (BA18)	3.54	0.292	94	-33	-96	0
Gyrus Occipital Inférieur Droit	2.64	0.292	17	33	-93	-15
<i>Adaptation "Même Sens du Mot"</i>						
Gyrus Temporal Moyen Gauche (BA21)	2.72	0.164	6	-54	-9	-18
Gyrus Temporal Moyen Gauche	2.61	0.24		-57	-6	-21
Gyrus Fusiforme Gauche	3.29	0.139	7	-42	-30	-21
Déclive Gauche	3.58	0.13	71	-36	-69	-15
Gyrus Parahippocampique Droit	4.06	0.13	32	36	-33	-21
Déclive Droit	3.07	0.139	25	36	-60	-15
<i>Adaptation "Même Structure Argumentale"</i>						
Gyrus Occipital Inférieur Gauche (BA18)	2.75	0.93	8	-33	-90	-12
<i>Adaptation "Même Syntaxe"</i>						
Gyrus Temporal Moyen Gauche	3.22	0.184	40	-57	-6	-12
Gyrus Temporal Moyen Gauche (BA39)	3	0.184	27	-60	-66	12
Gyrus Temporal Moyen Gauche	2.89	0.184	26	-57	-42	0
Gyrus Frontal Supérieur Gauche (BA6)	2.97	0.184	23	-6	3	63
Gyrus Fusiforme Gauche (BA37)	2.69	0.184	7	-51	-57	-15
Gyrus Précentral Gauche	3.26	0.184	19	-63	6	18
Gyrus Postcentral Gauche (BA1)	3.01	0.184	22	-54	-18	48
Gyrus Temporal Moyen Droit (BA37)	3.11	0.184	11	48	-66	6
Culmen Droit	3.62	0.184	72	45	-51	-21

TAB. 4.2: Liste des régions cérébrales montrant un effet d'adaptation lors de la répétition de la même phrase, de la même forme du mot, du même sens du mot, de la même structure argumentale ou de la même syntaxe. $p < 0.001$ non-corrigé, masqué par le contraste "Phrases - Silence" à $p < 0.001$.

et post-centraux gauches et le gyrus temporal moyen droit.

A partir de la Table 4.2 nous avons défini des régions d'intérêt afin de regarder le signal hémodynamique dans ces régions. Ces régions d'intérêt sont des sphères de 8 mm de rayon centrées sur les maxima locaux de chaque condition (Table 4.2). Nous avons

tout d'abord regardé les différences d'activation entre les phrases amorces entre elles et nous nous sommes rendus compte qu'il y avait en règle générale une plus grande activation pour les phrases actives que pour les phrases complexes (Figure 4.4 page 125). Cela paraissait illogique et nous avons changé le modèle en utilisant les réponses hémodynamiques canoniques sans modéliser la durée des phrases. En effet, lorsque l'on compare les deux modèles avec ou sans modéliser la longueur des phrases, on peut s'apercevoir que l'amplitude de la réponse BOLD pour les phrases complexes diffère suivant les modèles (Figure 4.3 page suivante). L'amplitude du signal est plus importante pour les phrases complexes que pour les phrases actives lorsque l'on modélise la longueur des phrases. Cela a pour conséquence de diminuer la valeur des coefficients des régresseurs pour les phrases complexes ce qui fait que les phrases actives ont un coefficient plus élevé et donc surestimé.

Ce nouveau modèle, sans modéliser la longueur des phrases, nous a permis d'analyser les différences d'activation entre les phrases amorces (p1). La Figure 4.5 page 126 met en évidence les régions dont l'activité augmentait avec la longueur ou la complexité des phrases. Ces régions sont les gyri post et pré-centraux gauches, le gyrus temporal moyen gauche dans ses parties antérieure et postérieure.

Le résultat concernant les effets d'adaptation lors de la répétition de la même syntaxe, est troublant car il semblent aller à l'encontre des résultats obtenus dans les expériences 1 et 2 de cette thèse (Chapitre 6). Ce résultat est probablement dû aux phrases amorces qui varient en longueur. En effet, le contraste qui permet d'étudier l'effet d'adaptation syntaxique compare les phrases cibles (actives) précédées de phrases amorces actives (conditions 1, 3, 5, 7 et 9) avec les phrases cibles (actives) précédées

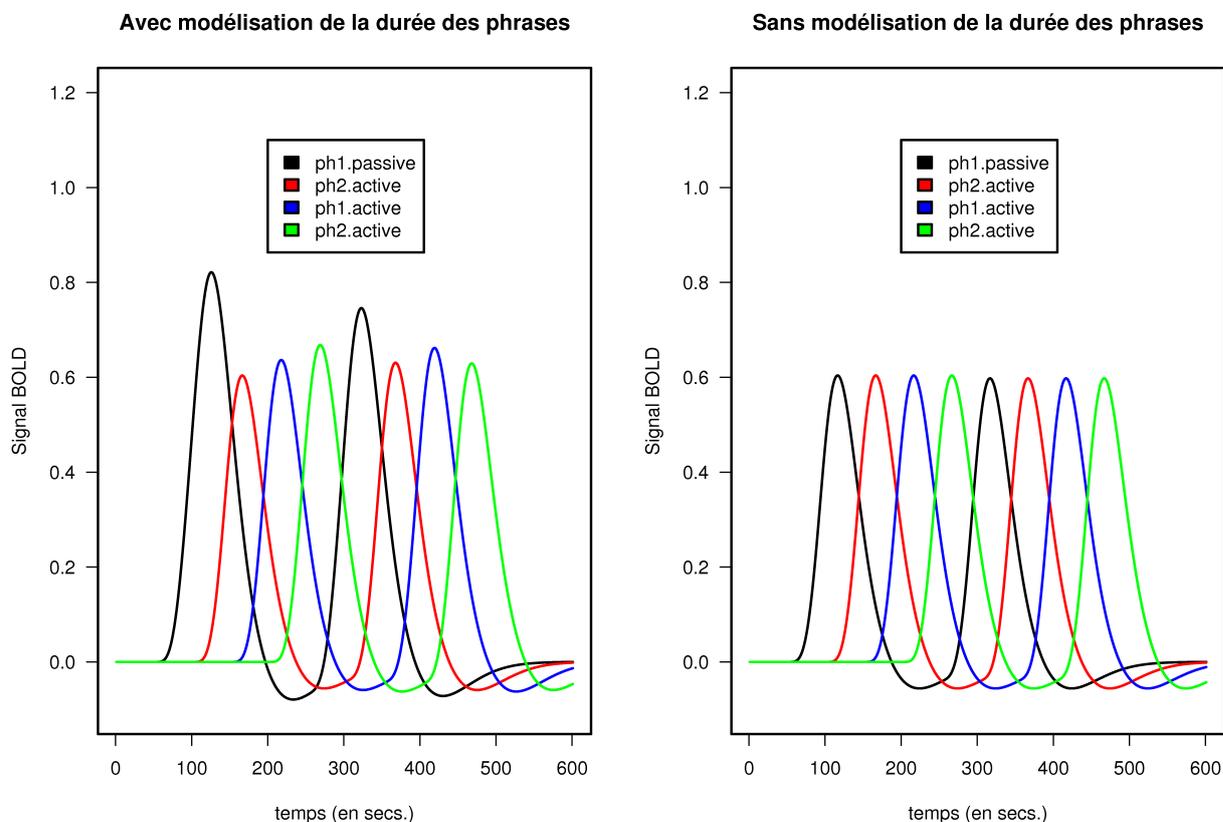


FIG. 4.3: Graphiques représentant la valeur du signal BOLD pour les phrases amorces (p1) ou cibles (p2) lorsque les durées des phrases sont modélisées (à gauche) ou non modélisées (à droite). *ph1.passive* : phrase amorce passive ; *ph2.active* : phrase cible active ; *ph1.active* : phrase amorce active ; *ph2.active* : phrase cible active.

de phrases amorces passive, clivée ou clivée-passive (conditions 2, 4, 6, 8 et 10). Dans cette comparaison l'effet de la longueur des phrases amorces sur les phrases cibles ne peut pas être négligé (Figure 4.5 page 126) et donc l'effet d'adaptation syntaxique peut être confondu avec l'effet de la longueur/complexité des phrases amorces. Pour cette raison, il n'est pas possible d'affirmer que cette expérience met en évidence un effet réel d'adaptation syntaxique.

Dans un deuxième temps nous avons examiné, dans ces régions d'intérêt, les activations aux phrases cibles (p2). Sur la Figure 4.6 page 128 nous pouvons observer

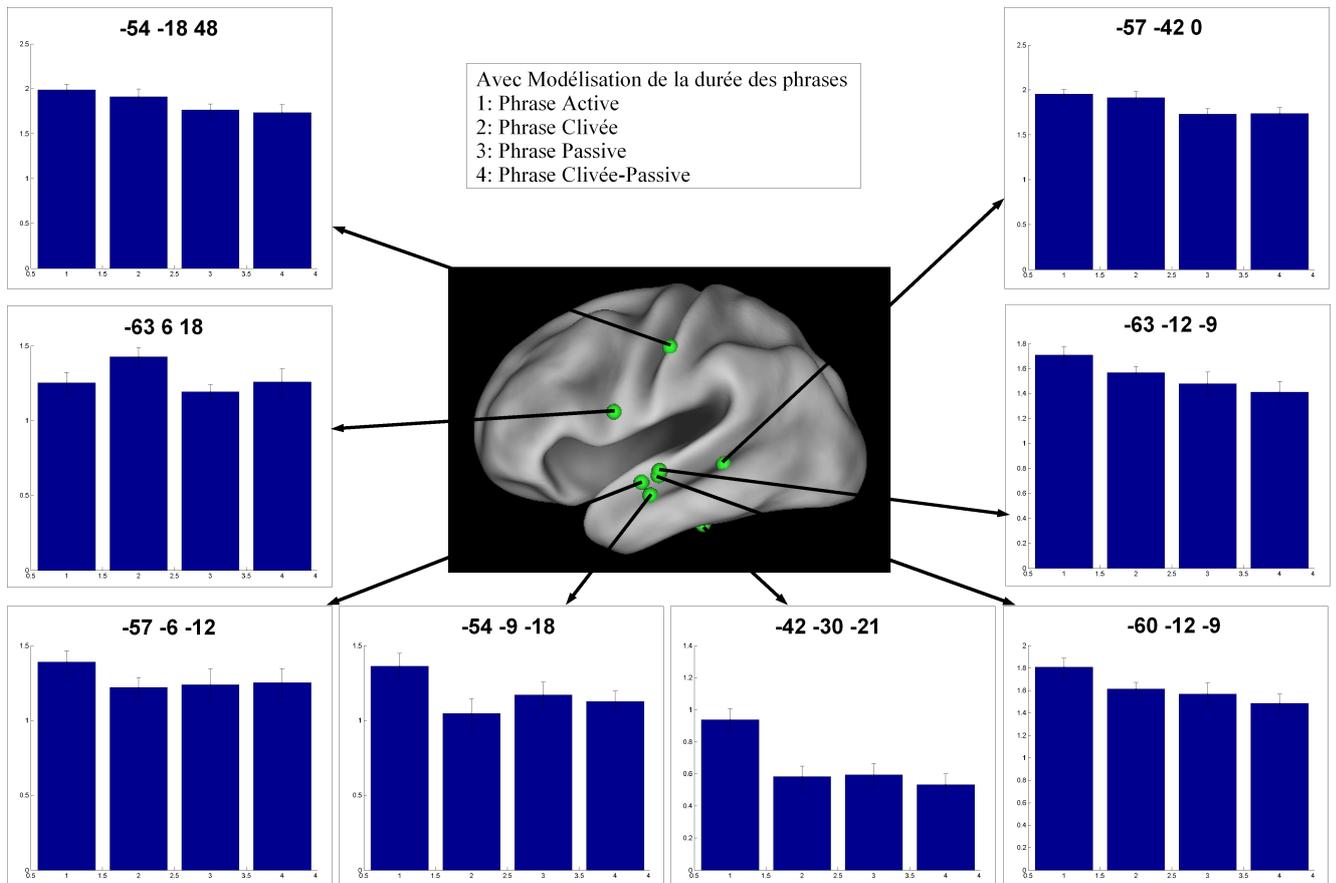


FIG. 4.4: Modèle prenant en compte la durée des phrases : Valeurs des coefficients des régresseurs au niveau des régions d'intérêt (définies à partir de la Table 4.2 page 122) pour les phrases amorces (p1) à la forme active, clivée, passive et clivée-passive.

l'amplitude des réponses aux phrases cibles (p2) en fonction de la phrase amorce (p1) qui les précédait.

Dans ces régions nous avons trouvé différents effets : adaptation à la même phrase (encadré rouge), adaptation à la même forme du mot (encadré orange), adaptation au même sens du mot (encadré violet) et un effet syntaxique (encadré bleu, qui serait expliqué par la longueur/complexité différente des phrases amorces, cf ci-dessus).

Les histogrammes de la Figure 4.6 page 128 permettent également de mettre en évidence d'autres caractéristiques de ces régions, en particulier au niveau de la partie antérieure du gyrus temporal moyen gauche.

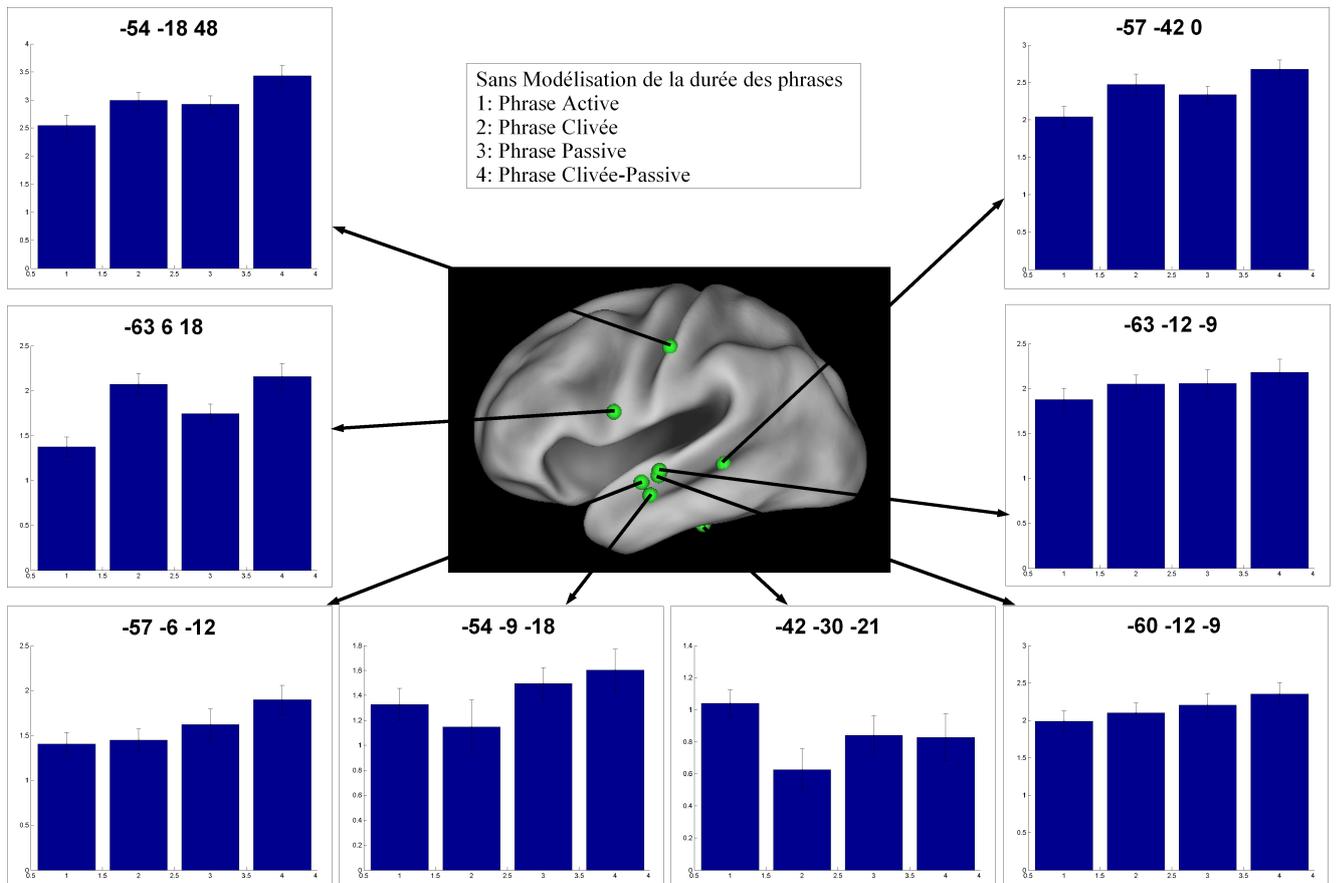


FIG. 4.5: Modèle ne prenant pas en compte la durée des phrases : Valeurs des coefficients des régresseurs au niveau des régions d'intérêt (définies à partir de la Table 4.2 page 122) pour les phrases amorces (p1) à la forme active, clivée, passive et clivée-passive.

Deux sous-parties du gyrus temporal moyen gauche (-60 -12 -9 et -63 -12 -9) présentaient un effet d'adaptation lorsque les phrases avaient les mêmes formes des mots (conditions 1 à 4). Cet effet était d'autant plus fort que la phrase avait également le même sens.

Une autre sous-partie du gyrus temporal moyen gauche (-54 -9 -18) présentait un effet d'adaptation lorsque les phrases contenaient des mots de mêmes sens (condition 1 à 8). Mais l'effet étant d'autant plus fort lorsque la phrase était répétée à l'identique (colonne 1). Cette région serait particulièrement sensible à la répétition de la même

phrase (même forme du mot, même sens du mot, même structure argumentale).

Une dernière sous-partie du gyrus temporal moyen gauche (-57 -6 -12) montrait elle aussi un effet d'adaptation plus important, plus la phrase amorce avait les mêmes mots et le même sens. Les effets d'adaptation dans cette région étaient fortement influencés par le type de structures syntaxiques qui précédait (colonnes 1, 3, 5, 7 et 9). En effet, dans cette région un effet de la longueur/complexité des phrases amorces est à noter même lorsque les phrases qui précédaient avaient un sens et des mots totalement différent.

Cet effet de la longueur/complexité des phrases est également observable dans les régions pré et post-centrales gauches (-63 6 18 et -54 -18 48) ainsi qu'au niveau d'une région postérieure du gyrus temporal moyen gauche (-57 -42 0).

Au niveau du gyrus fusiforme gauche (-42 -30 -21) un effet d'adaptation était observé lorsque la phrase amorce avait les mêmes mots de contenu que la phrase cible, et cela quelque soit la forme du mot utilisée et le sens de la phrase.

4.5 Discussion

Cette expérience nous a permis de mettre en évidence différentes régions impliquées dans le traitement de la phrase. Par contre, nous n'avons pas mis en évidence des aires distinctes impliquées dans le traitement de la forme du mot, du sens du mot ou de la structure argumentale de la phrase.

L'effet d'adaptation observé lorsque la même phrase était exactement répétée est plus faible (moins étendu) que celui observé dans les expériences précédentes (chapitre 5). Cela peut être expliqué par plusieurs paramètres.

Le premier à prendre en compte est le nombre de répétitions des stimuli. Dans cette expérience l'effet d'adaptation était observé après seulement deux répétitions, au lieu de quatre dans les expériences précédentes. Certaines régions, comme la région frontale

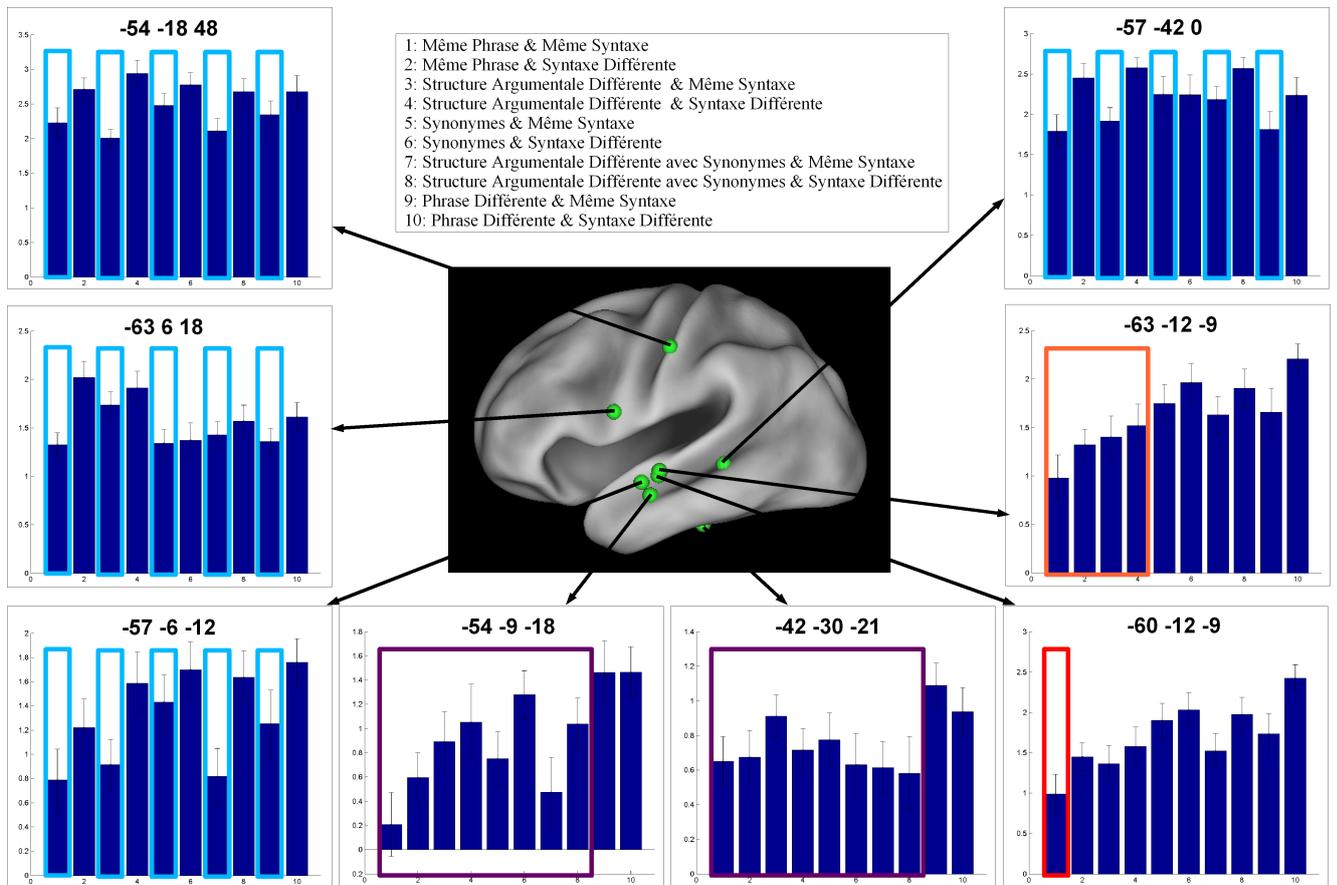


FIG. 4.6: Amplitude des réponses, au niveau des régions d'intérêt (définies à partir de la Table 4.2 page 122), des phrases cibles (p2) en fonction des phrases amorces (p1) qui les précédaient : Répétition de (1) même phrase & même syntaxe, (2) même phrase & syntaxe différente, (3) structure argumentale différente & même syntaxe, (4) structure argumentale différente & syntaxe différente, (5) synonymes & même syntaxe, (6) synonymes & syntaxe différente, (7) structure argumentale différente avec synonymes & même syntaxe, (8) structure argumentale différente avec synonymes & syntaxe différente, (9) phrase différente & même syntaxe, (10) phrase différente & syntaxe différente. Les caractéristiques des différentes conditions sont détaillées dans la Table 4.1 page 117. Ces régions d'intérêt montrent des effets particuliers (voir Figure 4.2 page 121) : adaptation à la même phrase (rouge), adaptation à la même forme du mot (orange), adaptation au même sens du mot (violet) et un effet syntaxique (bleu, qui serait expliqué par la longueur/complexité différente des phrases amorces).

par exemple, pourrait être plus lente à s'adapter par rapport aux régions temporales. Dans les expériences précédentes nous avons remarqué une adaptation moins étendue du gyrus frontal inférieur gauche après deux répétitions qu'après quatre répétitions. Mais

les différences observées n'étaient pas si importantes que cela, car toutes les principales régions étaient adaptatées après deux répétitions. C'est pour cette raison, et au vu du nombre de conditions utilisées dans cette expérience, que nous avons choisi d'étudier les effets d'adaptation après seulement deux répétitions.

Un deuxième paramètre à prendre en compte est la durée du SOA (Stimulus Onset Asynchrony) qu'il y avait entre les phrases. Il était de 3 ou 7 secondes, et cela était peut être insuffisant pour que la réponse hémodynamique redescende suffisamment pour qu'un effet d'adaptation soit observé après seulement deux répétitions.

Le troisième paramètre à prendre en compte est le fait que dans cette expérience nous avons utilisé des phrases plausibles, mais également des phrases implausibles. Les phrases implausibles ont peut être engendré un effet d'adaptation plus faible que les phrases plausibles. Les effets d'adaptation ont peut être été sous-estimés, car tous les types de phrases étaient mélangées dans les analyses.

Ces différents paramètres (nombre de répétitions, SOA, phrases implausibles) ont peut être contribué à diminuer les effets d'adaptation de cette expérience. Ces résultats sont des résultats préliminaires et afin de les affiner, il serait intéressant de refaire cette expérience en utilisant uniquement des phrases plausibles et d'augmenter le nombre de répétitions.

L'analyse de cette expérience nous a permis de mettre en évidence des régions qui avaient un profil d'adaptation particulier.

La partie antérieure du gyrus temporal moyen gauche peut être divisée en plusieurs sous-parties très proches les unes des autres (Figure 4.7 page suivante).

Deux sous-parties du gyrus temporal moyen gauche (-60 -12 -9 et -63 -12 -9 en rouge) présentaient un effet d'adaptation lorsque les phrases avaient les mêmes formes des mots. Cet effet était d'autant plus fort que la phrase avait également le même sens.

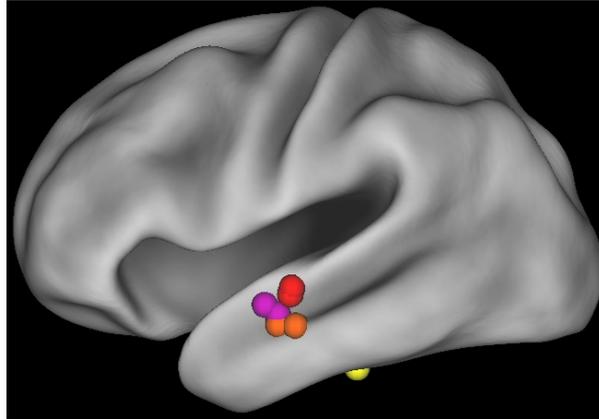


FIG. 4.7: *Sous-partie de la région antérieure du gyrus temporal moyen gauche. Vert : Gyrus temporal moyen gauche, sous-partie impliquée dans le traitement lexico-sémantique du mot ; Bleu : Gyrus temporal moyen gauche, sous-partie sensible à la répétition de la même phrase ; Rouge : Gyrus temporal moyen gauche, sous-partie impliquée dans le traitement des constituants de la phrase ; Turquoise : gyrus fusiforme gauche, impliqué dans le traitement du sens du mot.*

Ces sous-parties seraient impliquées dans le traitement lexico-sémantique du mot.

Une autre sous-partie du gyrus temporal moyen gauche (-54 -9 -18 en orange) présentait un effet d'adaptation lorsque les phrases contenaient des mots de mêmes sens. Mais l'effet étant d'autant plus fort lorsque la phrase était répétée à l'identique. Cette région serait particulièrement sensible à la répétition de la même phrase et des mêmes mots de contenu (même forme du mot, même sens du mot, même structure argumentale). Cette sous-partie, proche de la région (-60 -12 -16 en orange) mise en évidence dans l'expérience 1 (chapitre 5), montrait également un effet d'adaptation lorsque la même phrase était répétée à l'identique (voir Figure 2.2 page 68).

Une dernière sous-partie du gyrus temporal moyen gauche (-57 -6 -12 en violet) montrait elle aussi un effet d'adaptation plus important, plus la phrase amorce avait les mêmes mots et le même sens. L'effet d'adaptation dans cette région était fortement influencé par le type de structures syntaxiques qui précédait. En effet, dans cette région un effet de la longueur/complexité des phrases amorces est à noter même lorsque les

phrases qui précédaient avaient un sens et des mots totalement différents. Ce résultat est en accord avec les résultats de l'expérience 2 (chapitre 6) de cette thèse. En effet, cette région montre également une augmentation d'activation plus la taille des constituants augmente. Cette région pourrait être importante lors de la construction des constituants de la phrase.

De plus, au niveau du gyrus fusiforme gauche (-42 -30 -21 en jaune) un effet d'adaptation était observé lorsque la phrase amorce avait les mêmes mots de contenu que la phrase cible, et cela quelque soit la forme du mot utilisée et le sens de la phrase. Cette région serait donc impliquée dans le traitement du sens du mot quelque soit le sens général de la phrase (contrairement à la sous-partie antérieure (-54 -9 -18) du gyrus temporal moyen gauche).

Dans cette expérience, nous avons également pu étudier l'effet de la longueur ou de la complexité des phrases. Ces deux paramètres sont fortement corrélés et ne peuvent pas être dissociés. Les régions pré et post-centrales gauches, une sous-partie antérieure de la région temporelle moyenne gauche ainsi qu'une partie de la région postérieure du gyrus temporal moyen gauche sont fortement influencées par la longueur ou la complexité des phrases.

Bien que cette expérience ne nous a pas permis de dissocier clairement les régions impliquées dans le traitement de la forme du mot, du sens du mot ou de la structure argumentale de la phrase, nous avons pu montrer la complexité du rôle joué par la partie antérieure du gyrus temporal moyen gauche dans le traitement des phrases. En effet, des sous-parties de ce gyrus seraient influencées aussi bien par la longueur ou la complexité des phrases, par la forme du mot et son sens ou encore par le sens général de la phrase.

Dans le futur, il serait intéressant d'étudier en détail le rôle du gyrus temporal moyen gauche dans les différentes étapes du traitement des phrases.

4.6 Résultats marquants

Cette expérience nous a permis de mettre en évidence des aires impliquées dans les différents traitements de la phrase. Nous n'avons pas pu dissocier les régions impliquées dans le traitement de la forme du mot, du sens du mot ou de la structure argumentale de la phrase.

Par contre, nous avons pu montrer l'étendue du rôle joué par la partie antérieure du gyrus temporal moyen gauche dans le traitement des phrases. Des sous-parties de ce gyrus seraient influencées aussi bien par la longueur ou la complexité des phrases, par la forme du mot ou son sens ou encore par le sens général de la phrase (Figure 4.7 page 130).

Chapitre 5

Conclusion Générale et Perspectives

Ce travail de thèse avait pour but de mettre en évidence les régions cérébrales impliquées dans les traitements sémantiques et surtout syntaxiques des phrases lues ou entendues par des sujets sains en utilisant l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle.

Les résultats obtenus au cours de ces expériences ont permis de mieux comprendre les différentes étapes mises en jeu lors de la compréhension des phrases et de montrer le rôle primordial du pôle temporal gauche.

Apports scientifiques de ces travaux

Organisation fonctionnelle des régions temporales et frontales lors du traitement syntaxique et sémantique des phrases

Pour accéder au sens général d'une phrase, différentes étapes sont nécessaires. Nos travaux nous ont permis de mieux définir les régions impliquées dans le traitement syntaxique et sémantique des phrases. En se basant et en regroupant les résultats de toutes les expériences de cette thèse, nous avons pu tirer des conclusions intéressantes en particulier sur le gyrus temporal moyen gauche. Des sous-parties de ce gyrus ont des rôles

bien distincts dans les traitements syntaxiques et sémantique des phrases.

Pour une meilleure clarté des résultats obtenus, la Figure 5.1 présente les différentes régions mises en oeuvre lors du traitement syntaxique et/ou sémantique des phrases.

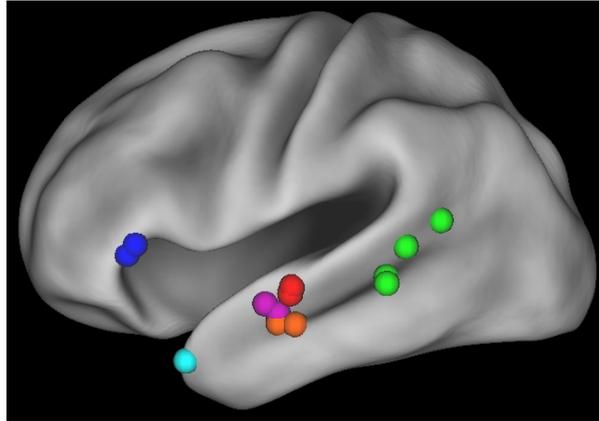


FIG. 5.1: *Récapitulatif des régions mises en évidence lors de cette thèse. Le pôle temporal gauche montre une grande diversité de fonctions regroupées dans des parties relativement proches les unes des autres.*

La partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche (région 1 en turquoise)

Lors du traitement des phrases, la partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche (région turquoise) joue un rôle dans le traitement de la phrase en général. Dans nos expériences, aucun effet d'adaptation n'a été observé dans cette région. Cela supposerait que quelque soit la phrase à traiter cette région est mise à contribution. Cette hypothèse est en accord avec les résultats obtenus lors de notre quatrième expérience (cf chapitre 3) puisque cette région serait recrutée lors de la construction des constituants. Plus la structure syntaxique d'une phrase contient un grand nombre de constituants, plus cette région est activée. Dans nos expériences d'adaptation, les stimuli étaient de longueur variables et répartis de façon équitable dans toutes les expériences, cela explique le fait que nous avons obtenu aucun effet d'adaptation dans cette région.

Si nous reprenons les résultats obtenus par Noppeney & Price (2004) nous pouvons constater que cette région montrait un effet d'adaptation syntaxique lorsque des phrases de même syntaxe, mais contenant des ambiguïtés locales, était répétées. Cela pourrait être expliqué par le fait que cette région est impliquée dans la construction des constituants d'une phrase. En effet lors de violations syntaxiques ou d'ambiguïtés l'analyseur syntaxique doit refaire son traitement pour résoudre les problèmes. On peut donc supposer que des ambiguïtés locales engendre une augmentation de l'activation de cette région puisqu'elle doit refaire le traitement. Lorsque l'on répète une même ambiguïté, ce re-traitement n'est plus nécessaire ce qui aboutit à un effet d'adaptation. Les expériences étudiant les effets de violations syntaxiques ont également observé que cette région était activées en cas d'ambiguïté syntaxiques (Friederici *et al.*, 2003). De plus la plupart des expériences qui ont comparé les activations aux phrases et aux listes de mots ou pseudomots (Mazoyer *et al.*, 1993; Kaan & Swaab, 2002; Vandenberghe *et al.*, 2002; Humphries *et al.*, 2006) ont mis en évidence l'implication de cette partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche. Cela montre bien son implication dans le traitement des phrases (et pas dans celui des listes de mots, qui ne nécessite pas la construction de constituants). De plus dans l'étude de Humphries *et al.* (2006) l'activation aux phrases était d'autant plus importante que les mots étaient sémantiquement congruents.

L'hypothèse faite sur cette région serait qu'elle soit impliquée dans la construction des constituants d'une phrase cela quelque soit les constituants à construire, c'est à dire même lorsqu'une même phrase est répétée. Grodzinsky & Friederici (2006) propose dans son modèle (Figure 1.26 page 50 que cette région soit impliquée dans la construction de la structure locale des constituants ainsi que lors du traitement d'anomalies syntaxiques.

Les sous-parties du gyrus temporal moyen gauche (régions 2ab, 3ab et 4ab respectivement en rouge, orange et violet)

Le gyrus temporal moyen gauche a une organisation complexe et des fonctions multiples. Nos expériences ont permis de mettre en évidence différentes sous-parties de ce gyrus et nous permet de mieux comprendre le traitement syntaxique et sémantique des phrases.

Une sous-partie supérieure du gyrus temporal moyen gauche (régions 2a et 2b en rouge sur la Figure 5.1 page 134) montre un effet d'adaptation lorsque l'on répète le même contenu lexico-sémantique ou les mêmes mots. Cette région serait impliquée dans le traitement lexico-sémantique du mot et/ou de la phrase. Au vu de nos résultats cette région ne semble pas jouer un rôle dans la construction des constituants de la phrases. Cela est en accord avec l'étude de Humphries *et al.* (2006) qui montrait que cette région était impliqué dans les traitements sémantiques.

Une autre sous-partie du gyrus temporal moyen gauche (régions 3a et 3b en orange sur la Figure 5.1 page 134) serait particulièrement sensible à la répétition de la même phrase ou du même contenu lexico-sémantique (même forme du mot, même sens du mot, même structure argumentale). Cette sous-partie contrairement à la précédente serait importante lors de l'accès au sens de la phrase (et non pas uniquement au sens du mot).

Une autre sous-partie très proche (régions 4a et 4b en violet sur la Figure 5.1 page 134) montre une augmentation d'activation plus la taille des constituants augmente. Elle est également sensible à la longueur ou à la complexité des phrases et montre un effet d'adaptation lorsque des mots de même sens sont répétés. Ceci pourrait concorder avec les résultats de Humphries *et al.* (2006) qui montre que le traitement sémantique et syntaxique pourrait être effectuer par cette sous-partie du gyrus temporal moyen gauche.

La partie postérieure du gyrus temporal supérieur gauche (régions 5abcd en vert)

La partie postérieure du gyrus temporal supérieur gauche montre une implication dans la construction des constituants de la phrase ou dans le traitement de phrases

longues et complexes (régions 5a, 5b et 5c sur la Figure 5.1 page 134). Une sous-partie (région 5d sur la Figure 5.1 page 134) montre également un effet d'adaptation lors de la répétition de la même phrase ou du même contenu lexico-sémantique. Au vu de l'analyse des phases, la région postérieure du gyrus temporal supérieur gauche serait dans un premier temps impliqué dans la construction des constituants de la phrase et dans un deuxième temps permettrait l'intégration des informations syntaxiques et sémantiques pour aboutir au sens de la phrase. Dans leur modèle Grodzinsky & Friederici (2006) proposent que cette région soit recrutée lors de la dernière étape du traitement des phrases pour intégrer les informations et lexicales. Nous avons mis en évidence que certaines sous-parties ne seraient pas influencées par la sémantique.

Le gyrus frontal inférieur gauche (régions 6ab en bleu)

Le gyrus frontal inférieur gauche est impliquée lors de la construction des constituants de la phrase et montre un effet d'adaptation lorsque la même phrase est répétée à l'identique, mais pas lorsque le même contenu lexico-sémantique est répété. Cette région calculerait la structure locale en constituant et intégrerait les informations sémantiques s'y rattachant. Grodzinsky & Friederici (2006) distinguent la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche qui serait impliquait dans le calcul de la structure en constituants de l'aire de Broca (BA 44 et 45) qui serait impliquée dans les relations syntaxiques et sémantiques.

Nos premières expériences ont permis de mettre en évidence les régions recrutées lors de la lecture et de l'écoute de phrases. Les régions frontales et occipitales gauches sont fortement impliquées lors de la lecture de phrases alors que des régions temporales supérieures gauches dans leurs parties plus antérieures sont impliquées lors de l'écoute de phrases. Des régions amodales (c'est à dire aussi bien impliquées dans la lecture

que dans l'écoute de phrases) ont également été mises en évidence. Ces régions sont les gyri temporaux supérieurs bilatéraux et moyens gauches ainsi que les régions frontales inférieures gauches (*pars triangularis* et *opercularis*). Lors de l'apprentissage de la lecture les régions dédiées au traitement du mot (comme le gyrus fusiforme gauche Cohen *et al.*, 2000; Dehaene *et al.*, 2001) se sont connectées aux régions dédiées au traitement du langage parlé. Ces régions amodales sont donc indispensables pour aboutir au sens de la phrase qu'elle soit lue ou entendue (Figure 2.3 page 69A).

Nos expériences nous ont permis de détailler et de donner des rôles spécifiques à des sous-parties du pôle temporal gauche, ainsi qu'un gyrus frontal inférieur gauche Figure 5.1 page 134.

La compréhension des phrases débiterait par des traitements syntaxiques et sémantique lancés en parallèle. La construction de la structure locale des constituants de la phrase se ferait au niveau de la partie antérieure du gyrus temporal supérieur gauche (région 1 en turquoise), de la partie la plus postérieure du gyrus temporal supérieure gauche (régions 5a, 5b et 5c en vert). Le traitement du sens du mot débiterait dans le gyrus temporal moyen (régions 2a et 2b en rouge), puis une intégration des informations syntaxiques et sémantiques se ferait au niveau d'une autre sous-partie du gyrus temporal moyen gauche (régions 4a et 4b en violet), au niveau de la partie la plus antérieure de la partie postérieure du gyrus temporal supérieur gauche (région 5d en vert) ainsi qu'au niveau du gyrus frontal inférieur gauche (régions 6a et 6b en bleu) pour ensuite accéder au sens des mots et au sens strict de la phrase au niveau d'une sous-partie du gyrus temporal moyen gauche (régions 3a et 3b en orange).

Le traitement syntaxiques des phrases : comment cela se passe-t-il ?

Une des questions qui nous a intéressée tout au long de ce travail était de savoir si le cerveau calculait les structures syntaxiques des phrases systématiquement et automatiquement et comment et où cela se passait-t-il ? En d'autres termes, l'idée de départ

était de voir si le cerveau dissociait et analysait les phrases de la même manière que les linguistes, c'est à dire en leur attribuant des structures syntaxiques.

Nous pouvons formuler plusieurs hypothèses concernant le traitement syntaxique des phrases au vue de nos travaux :

La première hypothèse est que le traitement syntaxique est optionnel, donc non-automatique. L'absence d'adaptation syntaxique pourrait être expliquée par le fait que la lecture ou l'écoute passive de phrases n'a pas contraint les participants à analyser complètement les phrases (Bever, 1970). En effet lors de l'expérience comportementale, les participants ont pu mettre en place une stratégie leur permettant d'anticiper la fin des phrases, alors qu'en IRMf les participants devaient lire passivement les phrases et n'avaient pas à mettre en place une stratégie pour accélérer leur compréhension. Lors de nos expériences, les participants n'étaient donc pas contraints de faire un traitement complet des structures syntaxiques des stimuli. Par contre l'expérience ayant pour but d'étudier la construction des constituants d'une phrase a pu mettre en évidence des régions impliquées dans le traitement des constituants. Et de nombreuses études ont mis en évidence des différences d'activations lorsque l'on compare les activations liées au traitement des listes de mots à celles liées au traitement des phrases (Mazoyer *et al.*, 1993; Kaan & Swaab, 2002; Humphries *et al.*, 2006; Indefrey *et al.*, 2001a). Le traitement syntaxique semble donc systématique, mais l'arbre syntaxique n'est peut être jamais représenté en entier au niveau cérébrale (voir la troisième hypothèse).

La deuxième hypothèse est qu'il y ait des régions cérébrales impliquées dans la construction de l'arbre syntaxique complet. Cela est en désaccord avec les résultats obtenus lors de nos premières expériences d'adaptation syntaxique, à moins que l'on suppose que nous n'avons pas vu d'effet d'adaptation syntaxique car la technique d'IRMf utilisée manquait de sensibilité. En effet, dans l'expérience comportementale nous avons observé un effet d'adaptation syntaxique plus faible que les effets d'adaptation à la même phrase

ou au même contenu lexico-sémantique. L'autre explication de cette absence d'adaptation syntaxique est que la répétition du même arbre syntaxique n'engendre pas de diminution d'activation dans certaines aires cérébrales, car le traitement syntaxique n'est pas "adaptable". En effet, les aires cérébrales peuvent s'adapter lorsqu'elles sont impliquées dans le traitement d'un stimulus qui se trouve facilité lors de la répétition de ce même stimulus. On peut très bien imaginer que puisque depuis des années nous sommes soumis à l'écoute de phrases (ayant toutes les structures syntaxiques possibles) le fait d'entendre plusieurs fois une même structure syntaxique ne facilite pas son traitement et n'engendre pas un effet d'adaptation dans les régions cérébrales mises en jeu dans ce traitement.

Et enfin la troisième hypothèse, est que l'absence d'adaptation syntaxique en IRMf lors de la compréhension de phrases est réelle et permettrait donc de mieux comprendre le fonctionnement de l'analyseur syntaxique. En effet, notre expérience visait à déterminer si oui ou non la répétition d'un arbre syntaxique complet provoquait une réduction de l'activité cérébrale dans les zones d'encodage des représentations linguistiques. Au vue de nos premiers résultats la réponse serait "non !". Nous pouvons alors penser que l'arbre syntaxique complet n'est à aucun moment représenté tel quel en mémoire à un instant donné. Pour l'expliquer nous pouvons prendre la métaphore de la calculatrice : quand on tape une expression, elle effectue des opérations progressivement, mais l'arbre syntaxique complet de l'expression mathématique n'est jamais "calculé" par une calculatrice de base (ce qui n'est pas le cas avec des calculatrices plus complexes ou avec les programmes compilateurs des ordinateurs). Selon cette vision procédurale, il se pourrait que certaines opérations soit amorçables et pas d'autres. Dans cette hypothèse, l'expérience étudiant les régions cérébrales impliquées dans la construction des constituants a pu mettre en évidence des activations qui corrélaient avec la taille des constituants car l'analyseur syntaxique traitait des constituants de plus en plus longs, mais ne mettait pas en mémoire toutes les étapes de ce traitement.

Perspectives scientifiques

Limites de nos études

Dans l'expérience qui étudiait les régions impliquées dans la construction des constituants d'une phrase, nous n'avons pas réellement dissociées les effets syntaxiques des effets sémantiques. Grâce aux autres expériences nous avons pu mettre en évidence certaines régions qui serait aussi influencées par le traitement sémantique. Afin de compléter cette étude nous projettons de réaliser la même expérience mais en utilisant des pseudo-mots, afin d'étudier le traitement des constituants sans que les informations sémantiques soient traitées ou intégrées. Ce serait donc une expérience en Jabberwocky.

De plus la dernière expérience ne nous a pas permis de mettre en évidence des régions distinctes pour le traitement de la forme des mots, du sens des mots et de la structure argumentales de la phrase. Comme nous l'avons vu dans la discussion de la dernière expérience, afin d'affiner les résultats il serait intéressant de refaire cette expérience en utilisant uniquement des phrases plausibles et d'augmenter éventuellement le nombre de répétitions.

Avenir et nouvelles techniques

La technique utilisée dans toutes les expériences de cette thèse était l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle, à l'aide d'un IRM à 3 Teslas. A l'heure actuelle des IRM à très haut champs commencent petit à petit à être mis en place dans le monde. Cela permettra de "regarder" dans le cerveau avec une meilleure résolution spatiale.

D'autres techniques d'imagerie sont aussi à notre disposition afin de connaître le déroulement et le traitement de certains stimuli avec une très bonne résolution temporelle. Lors de l'étude sur la construction des constituants, il serait intéressant de pouvoir décrire dans le détail les régions impliquées dans la construction des constituants. L'analyse des phases dans cette expérience nous a permis d'avoir une vague notion temporelle

des activations temporales et frontales, mais c'était à quelques secondes près. La MagnétoEncéphaloGraphie (MEG) nous permettrait d'étudier ces différentes étapes à quelques millisecondes près et de mieux comprendre le fonctionnement de l'analyseur syntaxique.

A l'avenir, l'augmentation de la sensibilité des techniques d'imagerie permettra d'établir une cartographie de plus en plus fine du cerveau humain (et d'autres espèces) et de mettre en relation l'architecture du cerveau avec les compétences. Cette démarche permet déjà quelques retombées thérapeutiques. Repérer les aires cérébrales du langage chez des personnes saines, permet, par exemple, de les éviter lors d'interventions chirurgicales cérébrales comme l'ablation d'une tumeur.

Ces nouvelles technologies permettent aussi de comprendre les ressemblances et les différences entre le cerveau humain et celui de l'animal. On sait déjà qu'il existe, chez le macaque, un précurseur de la représentation des nombres qui s'active lors du calcul mental chez l'homme. On imagine, dans ces études comparatives, les découvertes possibles quant à l'origine du langage (qui était d'ailleurs un des enjeux du projet européen dans lequel ma thèse a été réalisée).

Les études comparatives sont également une façon de mettre la neuro-imagerie au service des patients. Elles permettent de mieux comprendre les processus pathologiques de certaines affections cérébrales, neurologiques ou psychiatriques, voire de certains dysfonctionnements (dyslexie, dyscalculie, ...). Elles permettent aussi de suivre les effets des démarches thérapeutiques, qu'elles soient médicamenteuses ou rééducatives.

Il nous reste encore de nombreuses choses à découvrir sur les aires cérébrales impliquées dans le traitement du langage. L'origine, le développement, l'acquisition ou encore l'utilisation du langage sont des sujets d'étude qui vont encore poser des problèmes et des questionnements à de nombreux chercheurs.

Si tout le monde avait le même cerveau qu'Homer Simpson les neurosciences seraient peut être plus simple, mais moins exaltantes (Figure 5.2 page ci-contre) !

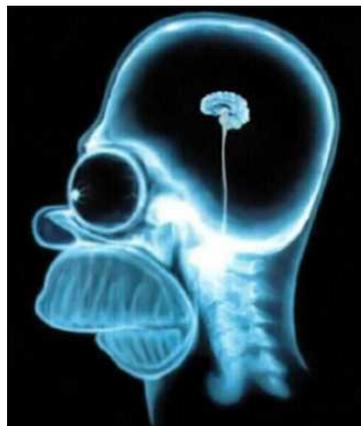


FIG. 5.2: *Le cerveau d'Homer Simpson. Pire que Mr Leborgne qui pouvait au moins dire "Tan-Tan", Homer lui ne dit que "Doh !".*

Annexes

Annexe A

Le modèle du traitement de la parole

Cette section a pour but de décrire le nouveau modèle de la parole proposé récemment par Hickok & Poeppel (2007).

La perception de la parole implique de nombreux processus que ce soit au niveau du traitement du son du langage (comme les syllabes) jusqu'au traitement du sens des mots entendus. Mais l'une des premières questions que l'on se pose est "comment le cerveau fait pour différencier les sons spécifiques du langage avec les sons de bas niveaux (c'est à dire ceux ne correspondant pas uniquement à des sons du langage humain, comme les syllabes par exemple)" ?

Les premières études d'imagerie fonctionnelle qui ont étudié la perception de la parole ont montré une implication des régions temporales supérieures bilatérales lorsque des participants écoutaient passivement des stimuli (Binder *et al.*, 1994; Mazoyer *et al.*, 1993).

Les études utilisant les tâches de discrimination ou d'identification de syllabes ont trouvé des activations dans le gyrus temporal supérieur gauche (Démonet *et al.*, 1992) et dans le lobe frontal inférieur gauche (Zatorre *et al.*, 1992). De nombreux auteurs ont postulé que les activations observées dans le gyrus frontal inférieur gauche pouvaient être liées à la tâche demandée aux participants. Cette tâche pouvait engendrer un recrutement

plus ou moins grand de la mémoire de travail (Démonet *et al.*, 1992; Price *et al.*, 1996).

Dans leur revue Hickok & Poeppel (2007), discutent les différentes études qui ont étudié la perception de la parole. La conclusion qu'ils en tirent est qu'en fonction des tâches demandées aux participants différentes aires pouvaient être impliquées.

Ils distinguent alors la "perception" de la parole qui se réfère à des tâches sub-lexicales, comme par exemple la discrimination de syllabes, ... de la "reconnaissance" de la parole qui se réfère aux traitements réalisés pour transformer un signal acoustique en une représentation lexicale.

En prenant en compte ces nouvelles définitions, Hickok & Poeppel (2007) ont proposé un modèle à double voies du traitement de la parole (Figure A.1 page suivante).

Ce modèle (Figure A.1 page ci-contre) propose que la voie ventrale (comprenant les régions temporales supérieures et moyennes) sont impliquées dans le traitement des signaux acoustiques pour la compréhension de la parole (ce qui correspond à la "reconnaissance" de la parole). La voie dorsale (comprenant le lobe frontal postérieur, le lobe temporal supérieur dans sa partie postérieure et une région pariétale) serait elle impliquée dans la transformation du signal acoustique en représentations articulatoires dans le lobe frontal (ce qui correspondrait à la "perception" de la parole). Ce rôle d'intégration audiotri-motrice de la voie dorsale diffère des arguments antérieurs qui suggéraient que la voie dorsale correspondait au "où". Mais cela est en accord avec les nouveaux concepts de la voie dorsale visuelle.

Ce modèle suggère que la voie ventrale impliquerait des régions bilatérales alors que la voie dorsale impliquerait plutôt des régions de l'hémisphère gauche.

Les différentes étapes du traitement de la parole sont prises en charge par des régions cérébrales distinctes. La Figure A.1 page suivante présente les différentes régions impliquées dans ce traitement. Le traitement débiterait par une analyse spectrotemporelle du signal acoustique dans les régions auditives primaires bilatérales, c'est-à-dire la

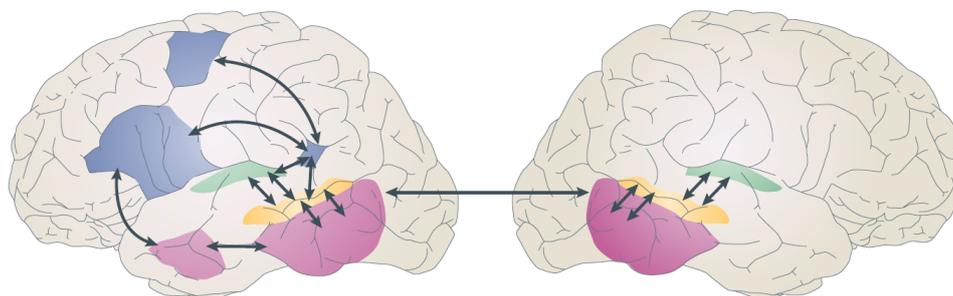


FIG. A.1: Le modèle à double voies impliqué dans le traitement de la parole. a) Diagramme schématique du modèle à double voies dans le traitement de la parole. b) Localisations anatomiques des régions impliquées dans le traitement de la parole. Analyse spectrale en vert, traitements et représentations phonologiques en jaune, voie ventrale en rose et voie dorsale en bleu. aITS : partie antérieure du sillon temporal inférieur; aMTG : partie antérieure du gyrus temporal moyen; anterior insula : Partie antérieure de l'insula; Dorsal STG : partie dorsale du gyrus temporal supérieur; Mid-post STS : parties moyenne et postérieure du sillon temporal supérieur; Parietal-temporal Spt : région à la jonction pariéto-temporale au niveau de la fissure sylvienne; pIFG : partie postérieure du gyrus frontal inférieur; PM : cortex prémoteur (Hickok & Poeppel, 2007).

partie dorsale des gyrus temporaux supérieurs bilatéraux (GTS) (vert). Puis les traitements et représentations phonologiques se feraient bilatéralement au niveau des sillons temporaux supérieurs (STS) moyens dans leurs parties postérieures, avec un léger biais pour l'hémisphère gauche (jaune). Et enfin il y aurait une séparation en deux voies :

Une voie ventrale (rose) qui comprend 1) les parties postérieures du gyrus temporal moyen (GTM) et du sillon temporal inférieur (STI) (avec un biais pour l'hémisphère gauche) qui auraient un rôle d'interface lexicale et qui lieraient les informations phonologiques et sémantiques, 2) les parties antérieures du gyrus temporal moyen (GTM) et du sillon temporal inférieur (STI) gauches correspondraient à un réseau combinatoire des différentes informations.

Une voie dorsale (bleue) qui comprend 1) une région sylvienne à la jonction pariéto-temporale qui aurait un rôle d'interface sensori-motrice 2) la partie antérieure du lobe frontal (incluant probablement l'aire de Broca) et le cortex pré-moteur auraient un rôle

articulatoire.

Annexe B

Le modèle de la lecture

Dans notre société la lecture est perçue par la plupart des personnes comme une activité cognitive aussi naturelle que le langage oral. Mais contrairement au langage oral nul n'est capable de lire une phrase sans avoir suivi un apprentissage fastidieux de plusieurs années.

Les résultats présentés ci-dessous sont en accord avec le modèle de lecture à double voie. Ce modèle provient de l'observation systématique des types d'erreurs effectuées par des patients alexiques¹. Dans les années 1970, Marshall et Newcombe (Marshall & Newcombe, 1973) publièrent un article très influent dans lequel ils développaient une approche négligée jusque-là et qui consistait à regrouper les patients alexiques en fonction de différentes catégories d'erreurs de lecture. Cette approche a abouti à une description détaillée des différents processus nécessaires à la lecture chez le sujet normal et qui fut largement reprise dans le domaine de la psychologie.

Selon cette conception, la lecture de mots pouvait être effectuée par le biais de deux voies opérant indépendamment l'une de l'autre, et les patients alexiques pouvaient alors souffrir de l'atteinte sélective de l'une de ces deux voies. Ces altérations sélectives ont permis de définir deux types d'alexie, l'alexie phonologique et l'alexie de surface, qui

¹L'alexie est un déficit sélectif acquis de la lecture.

sont rassemblées sous le terme d'alexie centrale du fait qu'elles interviennent à des étapes de traitements ultérieures à la perception purement visuelle des mots. Il y a une voie indirecte ou grapho-phonémique qui permet d'avoir accès au sens du mot par le biais d'une reconstitution phonologique (s'il y a un problème à ce niveau on parle d'alexie phonologique). Il y a une voie directe ou lexico-sémantique qui fait intervenir un lien direct entre les formes visuelles des mots et leurs sens (s'il y a un problème à ce niveau on parle d'alexie de surface). Si les deux voies sont atteintes on parle d'alexie profonde.

B.1 Une région dédiée au traitement orthographique du mot

Dans les années 90, une étude menée par Steve Petersen avait pour but de mettre en évidence les bases neurales sous-tendant les différents niveaux de traitement impliqués dans la lecture (Petersen *et al.*, 1988, 1990). Lors de cette étude différents stimuli qui variaient dans leur complexité visuelle ont été présentés à des participants dans le but de discriminer les processus nécessaires à la lecture. Les sujets devaient effectuer des traitements visuels simples avec des chaînes de caractères factices pour aboutir, après le traitement de chaînes de consonnes, au traitement supposé plus intégré des mots et des pseudomots. Une aire au sein du lobe occipital ne semblait pas active pour la perception de lettres et de chaînes de caractères factices mais dont l'activité augmentait lors de la lecture de mots ou de pseudomots (Petersen *et al.*, 1990) (Figure B.1 page ci-contre). Cette aire occipitale médiane antérieure proche du gyrus lingual devait être l'aire correspondant au lexique orthographique.

Quelques auteurs ont montré dans cette région un effet de la longueur du stimulus visuel (verbal ou non) plutôt que de sa régularité orthographique en comparant différentes tailles de chaînes de police factice à des pseudomots (Indefrey *et al.*, 1997), (Figure B.2

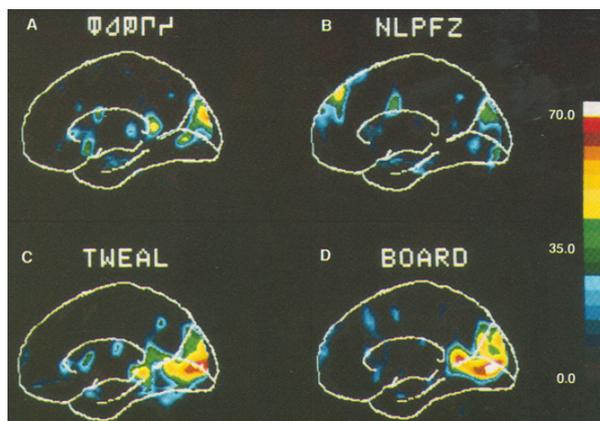


FIG. B.1: Régions cérébrales activées lors de la lecture de chaînes de caractères factices (A), de chaînes de lettres (B), de pseudomots prononcables (C) et de vrais mots (D). L'activation d'une aire occipitale médiane antérieure proche du gyrus lingual est observable uniquement lors de la lecture de mots ou de pseudomots (Petersen et al., 1990).

page suivante). Compte-tenu des résultats peu convergents en ce qui concerne cette aire, il semblerait qu'elle soit davantage impliquée dans des traitements de nature purement visuelle et non nécessairement dans des traitements spécifiques aux mots.

Par contre une aire située à la jonction occipito-temporale serait un bon candidat comme aire de la forme visuelle du mot (La *Visual Word Form Area* ou VWFA en anglais). Dans une première étude Cohen *et al.* (2000) ont combiné des techniques de présentation de mots par hémichamp visuel, avec l'imagerie magnétique fonctionnelle et les potentiels évoqués. Cette étude a montré que quelque soit l'hémichamp visuel de présentation, la lecture de mots engendrait l'apparition d'une onde négative dans le lobe temporal inférieur gauche aux environs de 180-200 msec. après la présentation du stimulus (Figure B.3 page 155). Cette onde négative témoignerait du traitement de l'information visuelle liée au mot quelle que soit sa provenance, et correspondrait à l'activation d'une aire située à la jonction ventrale entre les lobes occipital et temporal (Figure B.4 page 156).

Une autre étude de la même équipe (Dehaene *et al.*, 2001) utilisa un paradigme

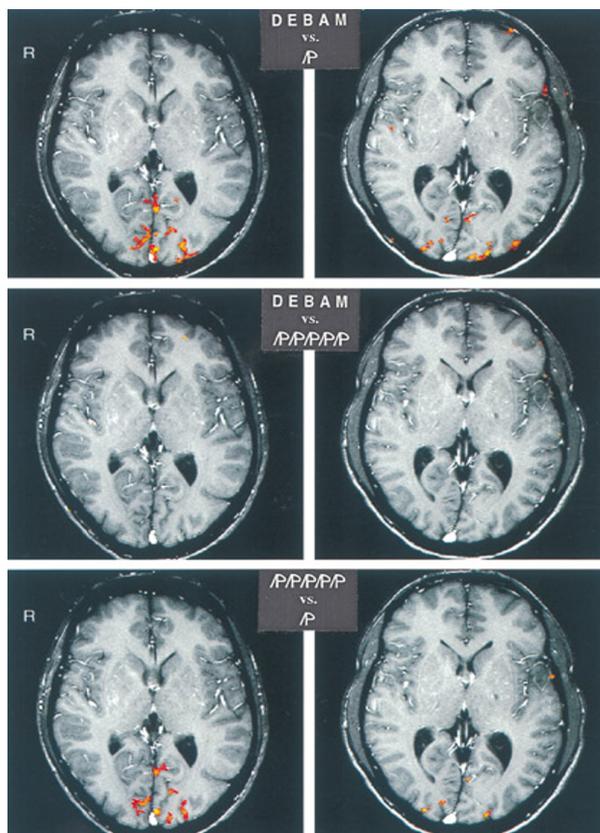


FIG. B.2: Régions cérébrales plus activées lors de la lecture de pseudomots que lors de la lecture d'une seule lettre factice (1^{ère} ligne). Régions cérébrales plus activées lors de la lecture de pseudomots que lors de la lecture d'une chaîne de caractères factices (2^{ème} ligne). Régions cérébrales plus activées lors de la lecture d'une lettre factice que lors de la lecture d'une chaîne de caractères factices (3^{ème} ligne). R : Hémisphère droit (Indefrey et al., 1997).

original recourant à la notion d'amorçage inconscient et qui permet d'étayer le rôle spécifique de cette aire dans le traitement des mots. Les sujets étaient soumis à un flux d'écrans commençant par une présentation de bruit visuel et à l'issue duquel était présenté un mot (cible) pendant 500 msec. dont ils devaient juger s'il désignait un objet naturel ou manufacturé (Figure B.5 page 156).

Parmi ce flux de bruit visuel était glissé un écran présentant un mot pendant une durée d'exposition si faible (29 msec.) que sa perception consciente était impossible (ce qui correspond à une présentation subliminale du mot). Le mot intercalé pouvait être le

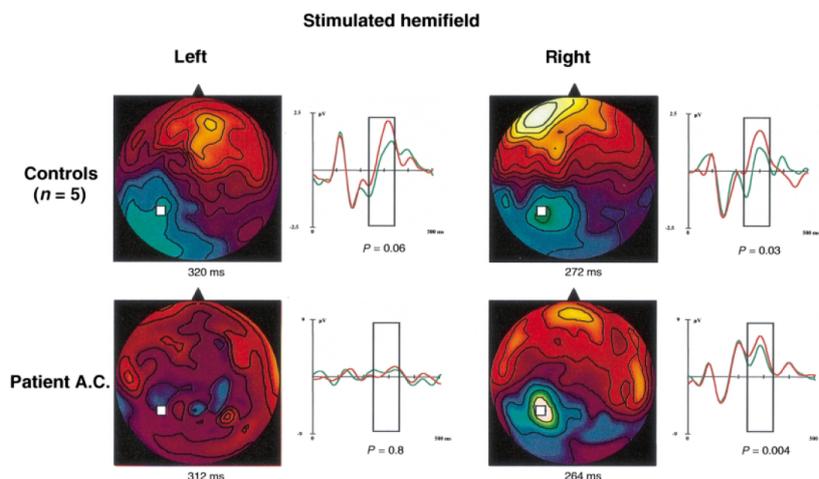


FIG. B.3: *Topographie des potentiels évoqués lorsque l'on soustrait la lecture de non-mots à la lecture de mots chez un sujet contrôle et chez un patient hémialexique gauche présentant une lésion occipito-temporal inférieure gauche. Ce patient était incapable de reconnaître et de lire les lettres et des mots présentés dans son champ visuel gauche. Une négativité temporelle gauche est observable chez le sujet contrôle dans les deux hémichamps et seulement dans l'hémichamps droit chez le patient hémialexique gauche (Cohen et al., 2000).*

même que le mot cible (et constituait ce qu'on appelle alors une amorce). Les amorces pouvaient être décrites ou non de manière visuellement identique au mot cible (ceci étant manipulé par l'utilisation de lettres majuscules ou minuscules).

L'activité de la jonction occipito-temporale décrite précédemment se révéla modulée par la présence ou non d'une amorce. L'effet d'amorçage s'opérait avec la même amplitude quelle que soit la correspondance de casse (majuscule ou minuscule) entre l'amorce et le mot cible, ce qui constitue un argument solide en faveur du rôle de cette structure dans l'accès au mot. Une telle indépendance vis-à-vis des aspects purement perceptifs des mots indique que cette région semble prendre en charge les caractéristiques abstraites du mot, permettant ainsi d'assurer sa reconnaissance même s'il n'existe pas de correspondance visuelle stricte (c'est-à-dire "CHIEN" et "chien" sont identifiés comme renvoyant à la même entité).

Enfin, des résultats de la même équipe semblent indiquer que cette aire est spéci-

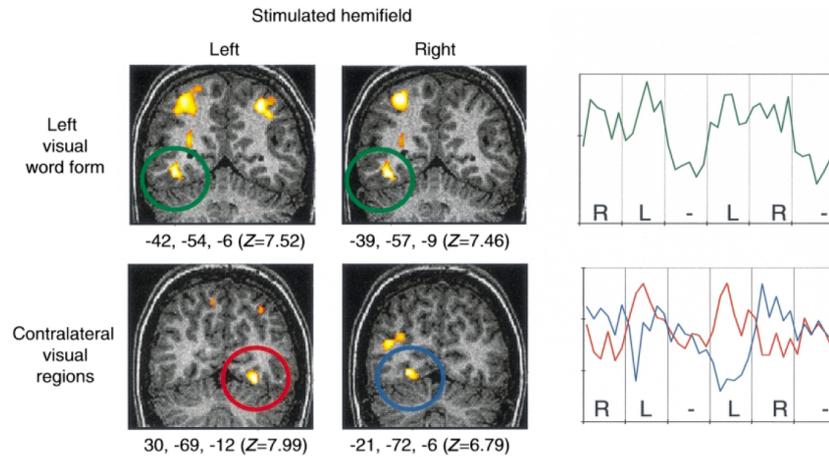


FIG. B.4: Activation du gyrus fusiforme gauche lors de la lecture de mots chez le sujet contrôle quelque soit l'hémichamps de lecture (1^{ère} ligne, cercles verts). Activation occipito-temporale médiale controlatéral lors de la stimulation des hémichamps visuels chez le sujet contrôle (Cohen et al., 2000).

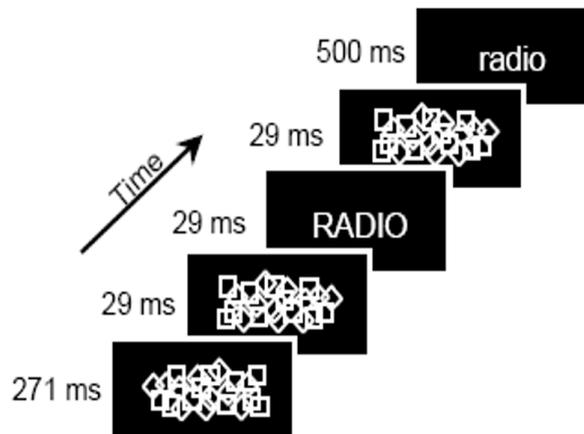


FIG. B.5: Présentation subliminale d'un mot répété. Protocole expérimental utilisé par Dehaene et al. (2001).

fique à la modalité visuelle puisqu'elle répond aux mots écrits mais pas aux mots entendus. Il a en outre été montré que l'activité de cette aire ne semble pas être modifiée par la teneur sémantique des stimuli, confirmant son intervention à un niveau prélexical (Dehaene *et al.*, 2002).

L'activation de cette aire a été décrite dans un très grand nombre d'études avec

une variabilité spatiale très faible (Figure B.6).

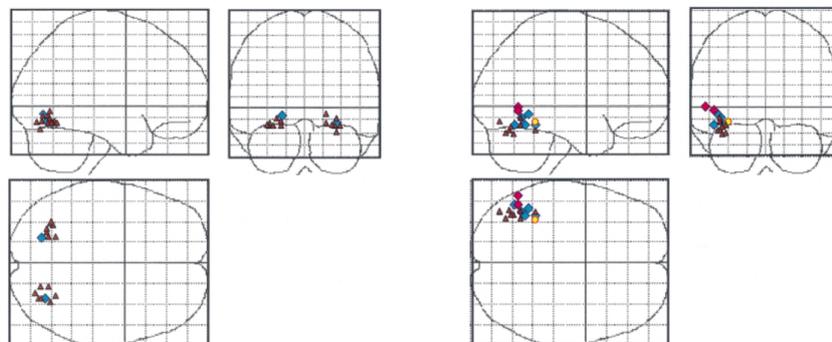


FIG. B.6: *A gauche* : Activations controlatérales lors de la stimulation d'un hémichamps visuel dans l'étude de Cohen et al. (2000) (symboles bleus) et dans des études précédentes (symboles rouges, Zeki et al., 1991; McKeefry & Zeki, 1997; Hadjikhani et al., 1998; Hasnain et al., 1998; Howard et al., 1998; Zeki & Marini, 1998). *A droite* : Activations du gyrus fusiforme gauche lors de la lecture de mots dans l'étude de Cohen et al. (2000) (sujet contrôle : symboles bleus, patient : symboles roses) et dans des études précédentes utilisant la Tomographie par Emission de Position ou l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (symboles rouges, Puce et al., 1996; Wagner et al., 1998) ou lors d'enregistrements intracrâniens (symboles jaunes, Nobre et al., 1994).

Cette région aurait un rôle dans la segmentation et la classification des mots et pseudomots lors du traitement de chaînes de lettres orthographiquement conformes. Quelques études menées en neuroimagerie semblent en désaccord avec la spécialisation de cette structure cérébrale pour les stimuli similaires aux mots. Vandenberghe et Moore ont indiqué que cette région ne semblait pas spécifique aux mots ou pseudomots, puisqu'elle était activée de façon équivalente lorsque les sujets devaient nommer des mots et des images d'objets (Vandenberghe *et al.*, 1996; Moore & Price, 1999).

De même, plusieurs études ont obtenu des activations similaires dans les deux hémisphères, lors de la perception d'objets, ou dans des tâches d'imagerie mentale (Mellet *et al.*, 2000a,b). Une activation sélective de la VWFA à gauche cependant était généralement rencontrée lors de comparaisons opposant les tâches d'imagerie mentale portant sur des objets dénommables et d'autres portant sur des objets de complexité équivalente

mais auxquels on ne pouvait pas rattacher de label.

Ces résultats dans leur ensemble invitent à affiner davantage les investigations futures afin de caractériser la nature de la spécialisation de cette jonction occipito-temporale.

Enfin, les études qui ont cherché à comparer les différences d'activations lors de la perception de mots ou d'objets portaient essentiellement sur des études de groupes. Il apparaît nécessaire de caractériser le comportement de cette jonction occipito-temporale au niveau individuel afin de pouvoir statuer sur l'exactitude des correspondances spatiales au niveau intra-individuel pour ces types de stimuli. Le rôle de cette région occipito-temporale serait de segmenter, classifier et relayer l'information visuelle ayant trait aux mots vers les autres aires nécessaires aux étapes ultérieures pour permettre l'accès à leur sens.

B.2 Deux voies distinctes pour accéder aux mots

L'observation des différents types d'alexie semblait indiquer l'existence de deux voies d'accès aux mots écrits, par contre jusque récemment l'existence de ces deux voies avait trouvé peu de soutien en neuroimagerie. Néanmoins, de plus en plus d'études tendent aujourd'hui à confirmer la possibilité de deux réseaux de traitements distincts pour lire les mots.

B.2.1 La voie directe

La lecture par voie directe (ou lexico-sémantique) est supposée faire intervenir un lien direct entre les formes visuelles des mots et leur sens. L'ensemble des images visuelle serait stocké dans un lexique orthographique. Ces formes visuelles doivent faire abstraction au divers format sous lesquels un même mot peut être présenté (écriture majuscule/minuscule, polices de caractère différentes, ...). La lecture par voie directe

consiste en une récupération de la signification associée avec l'image du mot présenté. Cette voie serait principalement mise en jeu par la lecture de mots familiers, car le lecteur a pu mémoriser leurs formes, mais aussi lors de la lecture de formes orthographiquement irrégulières qui sont en général apprises par coeur (par exemple : femme, monsieur, oignon, ...).

Montrer l'existence de cette voie revient à mettre en évidence une aire spécialisée dans le traitement des formes visuelles des mots. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, une aire occipito-temporale serait impliquée lors du traitement prélexical des mots ainsi que de toute chaîne de lettres orthographiquement conforme à une langue donnée. Dans le cas de la lecture par voie directe, la jonction occipito-temporale permettrait non pas de diviser le mot en unités infra-lexicales connues, mais au contraire d'identifier la forme globale du mot comme une seule large unité correspondant à un mot familier. L'accès direct au sens des mots à partir de leur forme visuelle pourrait être rendu possible par l'activation conjointe des aires de traitement sémantique et de cette jonction occipito-temporale.

B.2.2 La voie indirecte

Plusieurs aires cérébrales sont identifiées dans la littérature comme étant impliquées dans des tâches faisant appel à la conversion des graphèmes (lettres) en phonèmes (sons) pendant la lecture. Cela peut être dû soit aux stimuli (tels que les pseudomots, mots Kana²), soit aux tâches à effectuer (comme lire à voix haute ou effectuer des jugements de nature phonologique).

Un premier ensemble d'aires impliquées dans la conversion grapho-phonémique des mots lus se situe le long du gyrus temporal supérieur et remonte jusqu'au sein du *planum*

²Les kana sont des caractères de l'écriture japonaise qui notent chacun une more (unité de rythme différente de la syllabe). Ils ne sont donc pas similaires aux lettres de l'alphabet latin qui, elles, notent théoriquement des phonèmes.

temporale (Quaglino *et al.*, 2004; Kiehl *et al.*, 1999). Cet ensemble d'aires fait l'objet d'une spécialisation sans équivoque pour l'accès au mot par voie indirecte. Il est intéressant de noter que ces régions ont été décrites également dans des études dépassant le simple cadre de la lecture puisque la partie antérieure du sillon temporel supérieur et la partie postérieure du gyrus temporel supérieur ont été généralement observées lors d'études faisant appel à des tâches de langage oral maximisant le traitement phonologique (voir l'Annexe A page 147). Ces régions sont en outre recrutées de façon constante dans la compréhension de la parole, lors du traitement de la voie humaine et plus particulièrement dans des tâches d'expertise phonologique. Tous ces éléments pointent vers un recrutement des mêmes aires que celles qui permettent la reconnaissance effective des mots perçus auditivement, traduisant ainsi le fait que les sujets effectuent la transformation des stimuli visuels perçus en leurs équivalents auditifs lors de la lecture par la voie indirecte.

Le second ensemble d'aires rassemble deux régions cérébrales distinctes, le gyrus supramarginal et la partie operculaire du gyrus frontal inférieur formant un réseau décrit initialement par Paulesu *et al.* (1993) comme sous-tendant la mémoire de travail.

L'hypothèse d'un rôle de mémoire de travail pour ces régions cérébrales est en accord avec le fait qu'il y ait un accroissement de ces besoins lors de l'accès au mot par voie indirecte. Le processus de reconstruction phonologique des mots implique en effet des traitements s'effectuant de manière séquentielle et nécessite que le lecteur stocke, maintienne actif en mémoire et assemble chacun des résultats intermédiaires (correspondant aux transformations des lettres ou groupement de lettres en sons) afin d'obtenir une représentation phonologique adéquate au mot lu.

B.3 L'accès au sens du mot

Le but de la lecture étant la compréhension des mots/phrases que l'on lit, l'accès sémantique représente l'étape ultime commune aux deux voies d'accès pouvant être em-

pruntées par le mot. Pour cette raison, les régions cérébrales impliquées dans l'accès au sens des mots devraient être communes aux deux voies. Trois régions semblent prendre en charge une telle fonction.

Une première région a été désignée par Howard (Howard *et al.*, 1992) comme étant un site possible pour le lexique des formes visuelles des mots. Elle est située dans la partie postérieure du gyrus temporal moyen, près de l'extrémité postérieure du sillon temporal supérieur. Cette région semble constituer un noeud d'intégration sous-tendant la compréhension du langage, puisqu'elle reçoit des informations en provenance d'autres modalités que la modalité visuelle et son activité est modulée par la charge sémantique imposée par les différentes tâches.

La deuxième région identifiée se situe au sein de la voie ventrale, dans la partie postérieure du gyrus temporal inférieur et se trouve en fait située dans le prolongement de la jonction occipito-temporale. Cette aire fut décrite par Büchel *et al.* (1998) lors d'une étude pendant laquelle des sujets aveugles étaient confrontés à une lecture de mots en Braille, mais aussi lors de la compréhension orale de mots (Figure B.7 page suivante). Cette région prendrait en charge l'accès sémantique des mots et des objets, et s'insérerait dans une vue plus générale de la voie ventrale dans laquelle l'information se propagerait ventralement du cortex visuel unimodal dédié au traitement des caractéristiques purement visuelles de bas niveau vers des aires multimodales prenant en charge des traitements plus intégrés.

La troisième et dernière région est localisée au sein de l'aire de Broca, et plus précisément dans sa partie triangulaire. Cette région antérieure de l'aire de Broca a été décrite dans de nombreuses études de langage impliquant des tâches de jugement sémantique ou de génération de verbes sémantiquement liés à un mot cible, confirmant son rôle dans la manipulation des attributs sémantiques relatifs aux stimuli soumis (Poldrack *et al.*, 1999).

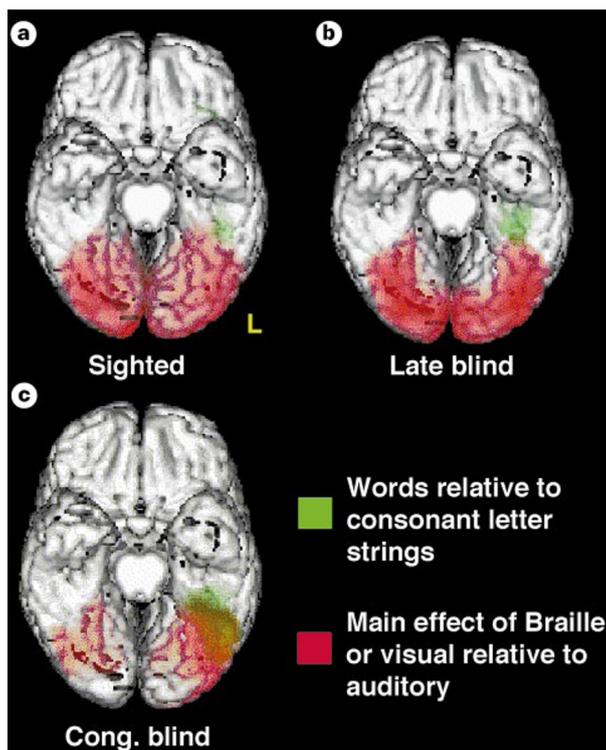


FIG. B.7: *Dissociation des régions antérieures et postérieures de la voie ventrale du traitement des mots. Les activations non-spécifiques aux mots lus (c'est à dire répondant aux mots et aux non-mots lus) sont représentées en rouge sur la figure. Les activations spécifiques aux mots lus (c'est à dire répondant aux mots dans la modalité visuelle ou en braille) sont représentées en vert (Büchel et al., 1998).*

Très peu d'études ont mis en évidence une activation conjointe de toutes ces régions lorsque les sujets lisaient. Cette remarque nous amène donc à nous interroger sur les modalités de fonctionnement de l'accès sémantique. En effet, l'accès aux propriétés sémantiques des mots peut nécessiter la co-activation d'un ensemble d'aires cérébrales distinctes, à moins qu'il émerge du recrutement de seulement certaines de ces aires sémantiques, en fonction des demandes cognitives de la tâche.

B.4 Le modèle de la lecture

Le modèle de la lecture proposé par Déjerine en 1892 s'est considérablement compliqué et précisé (Figure B.8 page suivante, Dehaene, 2007). A l'heure actuelle le modèle que l'on peut proposer repose sur le fait qu'il n'y ait plus de région dédiée dans le traitement des formes visuelles des mots, mais plutôt une région dédiée au traitement prélexical commune aux mots et à toute chaîne de lettres orthographiquement légale du point de vue de la langue considérée.

Ce traitement serait effectué grâce au recrutement d'une aire située à la jonction occipito-temporale, sur le sillon séparant ventralement les gyri fusiforme et temporal inférieur. A l'heure actuelle, il n'est pas possible de statuer sur la spécificité de cette voie d'accès lexical pour les mots (au regard du réseau recruté par la perception d'objets).

Les premières étapes du traitement visuel étant effectuées, l'accès au mot écrit semble reposer sur la mise en place de deux itinéraires cérébraux possibles (correspondant à la voie directe et à la voie indirecte décrites précédemment).

L'accès au mot par reconstitution grapho-phonologique (par la voie indirecte) est pris en charge par un ensemble d'aires dédiées à l'analyse phonologique ainsi qu'à un réseau d'aires dédiées à la mémoire de travail verbale nécessaire au stockage et au maintien des résultats intermédiaires de la conversion des graphèmes en phonèmes. Les aires phonologiques sont situées postérieurement dans le gyrus temporal supérieur ou le long de la partie moyenne du sillon temporal supérieur, tandis que le réseau de mémoire de travail rassemble le gyrus supramarginal et la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche.

La voie directe pour accéder au mot reposerait, quant à elle, sur l'activation conjointe de la région responsable du traitement prélexical et des aires dévolues au traitement sémantique. Ces aires, permettant l'accès au sens et aux propriétés sémantiques associées aux mots lus, sont la région occipito-temporale ventrale, la partie postérieure

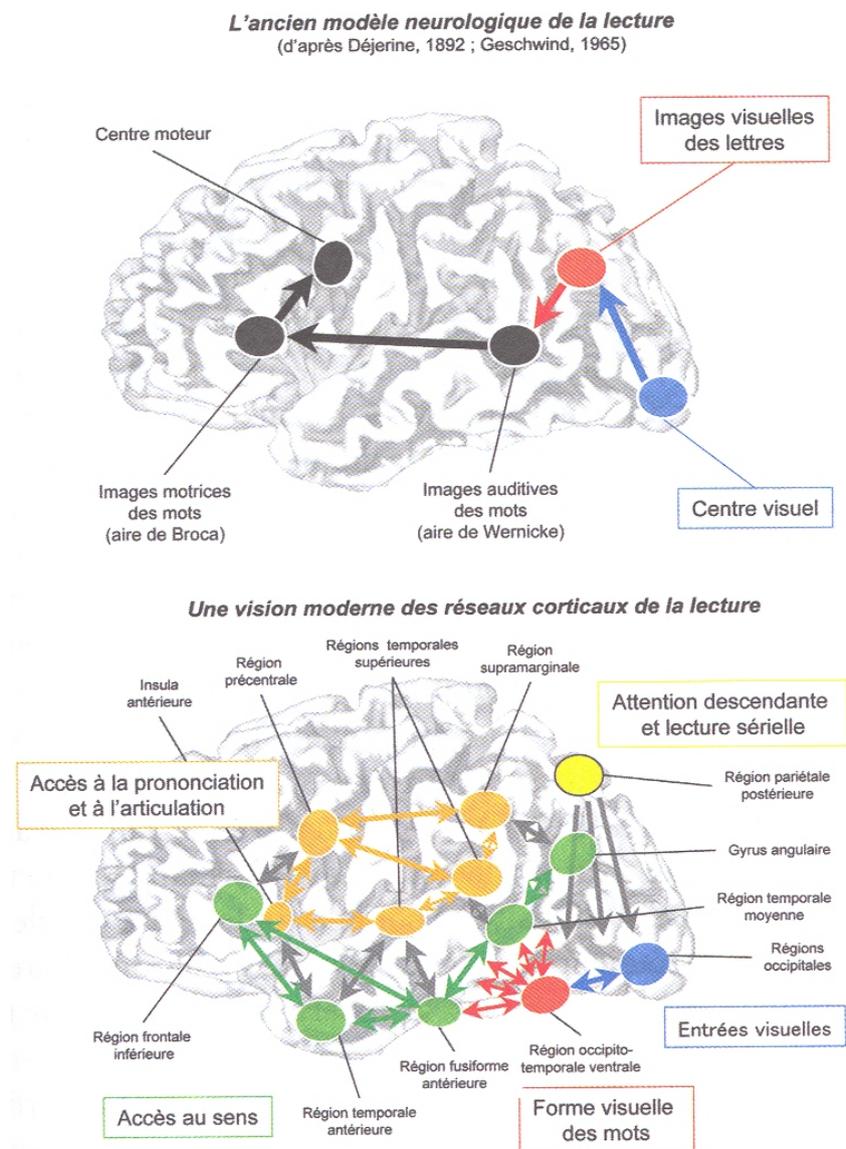


FIG. B.8: Ancien (en haut) et nouveau modèle (en bas) neurologique de la lecture. Dans le nouveau modèle les régions représentées en vert et orange ne sont pas spécifiques à la lecture (Dehaene, 2007).

du gyrus temporal moyen et la partie triangulaire du gyrus frontal inférieur gauche.

Ces résultats indiquent que la lecture de mots semble reposer sur un réseau d'aires que l'on savait impliqué dans différents traitements de type visuel ou langagier. L'accès au mot par voie directe repose en effet sur un réseau extrêmement similaire à la dénomination d'objets (Moore & Price, 1999), tandis que les aires impliquées dans la conversion grapho-

phonémique ont été découvertes par ailleurs comme ayant un rôle dans le rappel, le maintien ou la manipulation d'attributs phonologiques pendant des tâches de langage oral (voir l'Annexe A page 147).

Annexe C

Les représentations syntaxiques en linguistique et psycholinguistique

C.1 Les représentations syntaxiques : Généralités

A l'intérieur de la linguistique théorique¹, la syntaxe est l'étude de l'architecture des groupes de mots, des propositions et des phrases (Shapiro, 1997). La parution du livre "Structures Syntaxiques" de Noam Chomsky en 1957 a profondément modifié la manière d'aborder la syntaxe.

Cette section a pour objectif de donner quelques notions sur la syntaxe et les représentations syntaxiques. Elle s'appuie majoritairement sur les travaux de Noam Chomsky même si le modèle décrit par Chomsky est aujourd'hui critiqué, le plus souvent davantage pour les positions qu'il défend sur l'innéité² que pour son analyse purement linguistique. Son modèle conserve une grande force d'interprétation et regroupe de nombreux parti-

¹La linguistique théorique est la branche de la linguistique qui s'occupe de modéliser la connaissance linguistique. Cette approche implique la recherche et l'explication des universaux linguistiques, qui sont des propriétés que toutes les langues ont en commun. Les champs d'étude généralement considérés comme le noyau de la linguistique théorique sont la syntaxe, la phonologie, la morphologie et la sémantique.

²Très schématiquement, Chomsky propose que les super-règles syntaxiques sont innées et universelles, tandis que les paramètres sont construits par l'apprentissage. Pour de plus amples développements, voir Pinker (1999) et surtout Piatteli-Palmarini (1982).

sans tant dans le domaine de la linguistique que dans celui des neurosciences (Pinker, 1999).

C.2 La réalité des structures syntaxiques

Pinker considère que la syntaxe fait partie de la grammaire³, et que la grammaire doit être entendue comme un “ensemble de règles qui déterminent la forme et le sens des mots et des phrases dans une langue donnée telle qu’elle est parlée par une communauté donnée” (Pinker, 1999).

Un des objectifs principaux des travaux initiés par Chomsky était de construire un modèle qui rendrait compte des principes et des processus selon lesquels les phrases sont construites dans les langues particulières. Pour Chomsky, le processus majeur dans le langage est la créativité, c’est “un usage infini de moyens finis” (Humboldt cité par Changeux, 2002). Cette créativité est à même de produire ou de comprendre un nombre infini de phrases à l’aide d’un nombre restreint et fini d’éléments et de règles.

La grammaire sera donc l’étude des processus qui témoignent de la créativité linguistique et qui permet de rendre compte de la totalité des phrases d’une langue. Un processus inconscient et intuitif nous permet de juger instantanément si une phrase est correcte ou non grammaticalement. Si on considère les deux phrases suivantes :

(a) Marc et Sophie sont à la plage.

³Dans son livre “L’instinct du langage” (1999), Pinker accorde plusieurs acceptions au terme de grammaire : 1- grammaire générative : ensemble de règles qui déterminent la forme et le sens des mots et des phrases dans une langue donnée. 2- grammaire mentale : grammaire générative hypothétique qui est stockée inconsciemment dans le cerveau d’un individu. 3- grammaire prescriptive ou stylistique : grammaire enseignée à l’école et dans les livres, ensemble de directives sur la manière dont on “doit” utiliser un dialecte. 4- grammaire de structure syntagmatique : grammaire générative constituée uniquement des règles qui définissent les structures syntagmatiques. 5- grammaire transformationnelle : grammaire composée d’un ensemble de règles de structure syntagmatique qui construisent un arbre de structure profonde et d’une ou plusieurs règles de transformation qui déplacent les syntagmes dans la structure profonde pour produire un arbre de structure de surface. 6- grammaire universelle : schéma de base sous-jacent aux grammaires de toutes les langues humaines ; désigne également la circuiterie présente dans le cerveau de l’enfant, qui lui permet d’apprendre la grammaire de la langue de ses parents.

(b) *Marc et Sophie nagent la plage.

L'intuition linguistique nous permet de décider sans effort que la phrase (a) est correcte, c'est à dire grammaticalement bien formée, tandis que la phrase (b) est agrammaticale. Ce jugement intuitif de la grammaticalité est pour Chomsky une preuve de l'existence d'une grammaire. Cette grammaire ne fait pas appel au sens des phrases mais seulement à leur acceptabilité structurelle. En effet, si on prend un exemple de Chomsky (1957) :

(c) Des idées vertes incolores dorment furieusement.

(d) Dorment incolores furieusement vertes des idées.

Bien que ces deux phrases soient dépourvues de signification, un locuteur du français trouve la phrase (c) plus acceptable que la phrase (d). La phrase (c) est parfaitement acceptable sur le plan grammatical, même si son sens est absurde. Le fait que tout locuteur d'une langue puisse émettre ce type de jugement vis-à-vis des séquences qu'on lui soumet est une preuve de l'existence d'une compétence linguistique sous-jacente partagée par l'ensemble des locuteurs.

Cette compétence comporte, entre autres, des connaissances et des règles qui déterminent la bonne formation syntaxique, et qui associent une (des) interprétation(s) sémantique(s) appropriée(s) aux phrases bien formées. Cet ensemble de connaissances et de règles permet aux locuteurs de produire et d'interpréter des énoncés.

Il est intéressant de noter que ces règles n'ont jamais été enseignées aux locuteurs de façon explicite : un enfant qui commence à parler n'a bien sûr jamais été exposé à toutes les bonnes formations syntaxiques possibles ni à la liste exhaustive de ces règles.

L'objectif principal de la linguistique consiste à rendre compte de cette compétence et à en expliciter le contenu et le fonctionnement.

C'est en se fondant sur les jugements des locuteurs et en essayant de caractériser les phrases acceptables d'une langue, que le linguiste a été amené à nous renseigner sur les propriétés du langage. Son travail est de créer un modèle (ou une grammaire) de la langue qui rend compte des énoncés grammaticaux. Tout d'abord, les phrases générées par le modèle devront être acceptables par un locuteur humain et le modèle doit pouvoir analyser toutes les phrases générées par tout locuteur. Chomsky rappelle que la construction de la structure linguistique doit être établie à l'aide de concepts (tel que phonème⁴, syntagme⁵, ...) indépendants de toutes langues particulières. Une représentation en graphes arborescents (appelés arbres syntaxiques) constitue une base sur laquelle ont pu se développer non seulement les premiers modèles chomskyens mais aussi des théories plus récentes sur la représentation syntaxique des phrases.

Cette grammaire est basée sur l'attribution de structures syntaxiques aux phrases, qui correspondent à des structures en constituants organisés hiérarchiquement (voir la section suivante) et qui peuvent être représentés sous forme d'arbres syntaxiques.

C.3 Les constituants de la phrase

Les phrases sont composés de mots et ces mots ne sont pas seulement des éléments disposés de gauche à droite dans un ordre sériel (Bever, 1970). Les linguistes ont examiné les propriétés phonologiques⁶, morphologiques⁷ et distributionnelles⁸ des mots pour en extraire des catégorisations lexicales plus rationnelles.

Dans une phrase grammaticalement correcte, les noms apparaissent à certains en-

⁴Un phonème est la plus petite unité que l'on puisse isoler par segmentation de la parole et qui permettent de distinguer des mots les uns des autres.

⁵Un syntagme est un groupe de mots qui se comporte comme une unité dans une phrase et qui a un sens cohérent.

⁶La phonologie étudie l'organisation des sons dans une langue.

⁷La morphologie étudie la façon dont les morphèmes (plus petite unité de son que l'on peut isoler porteuse de sens) se combinent pour former des mots.

⁸Les propriétés distributionnelles permettent de formaliser la distribution d'un mot dans une phrase considérée comme représentative de la langue étudiée.

droits où les verbes ne peuvent aller. Les noms peuvent être accompagnés par des adjectifs (gros mangeur), être quantifiés et spécifiés (trois chats/le chat), à l'inverse des verbes (gros manger, trois chasser/un chasser). En conséquence, on ne dira plus d'un nom qu'il représente une personne, mais qu'il appartient à la classe distributionnelle des "noms" puisqu'il peut être précédé et/ou suivi d'un adjectif, précédé d'un article, . . . L'idée étant que deux mots appartenant à la même classe sont susceptibles de se substituer l'un à l'autre. D'après les deux exemples ci-dessous :

(e) Mon frère déteste cet homme mesquin.

(f) Mon frère trouve cet homme mesquin.

Même si ces deux phrases sont formées de mots appartenant à des catégories syntaxiques identiques (Déterminant, Nom, Verbe, Déterminant, Nom et Adjectif), elles ne s'interprètent pas de la même manière. Leurs structures respectives diffèrent, c'est à dire que les mots ne sont pas regroupés semblablement dans les phrases (e) et (f) et n'entretiennent pas des relations identiques entre eux.

Dans la phrase (e), les mots de la séquence *cet homme mesquin* sont regroupés et forment un constituant ; on pourrait écrire : *C'est [cet homme mesquin] que mon frère déteste*. Dans la phrase (f), les mots de la séquence *cet homme mesquin* peuvent être séparés en deux groupes et former ainsi deux constituants distincts. On pourrait écrire : *C'est [cet homme] que mon frère trouve [mesquin]*.

Dit d'une façon plus intuitive et informelle, dans la phrase (e) le verbe est suivi d'un seul syntagme, qui est son complément d'objet direct. Dans la phrase (f), en revanche, le verbe est suivi de deux syntagmes, un syntagme nominal et un syntagme adjectival.

On ne forme donc pas une phrase avec des mots, mais avec des syntagmes (ou constituants). Ces syntagmes sont définis comme des groupements de mots qui respectent les règles de la bonne formation syntaxique et qui se comportent comme une unité face aux

opérations syntaxiques. L'élément central de chaque syntagme en détermine la nature : on parlera ainsi de syntagme nominal (SN), syntagme adjectival (SA), syntagme verbal (SV), syntagme prépositionnel (SP), syntagme adverbial (SAdv), ... L'élément central d'un syntagme est aussi appelé la tête⁹ du syntagme.

Les phrases (e) et (f) peuvent être représentées sous la forme d'un arbre syntaxique qui donne les informations sur l'organisation hiérarchique de ses constituants (Figure C.1) :

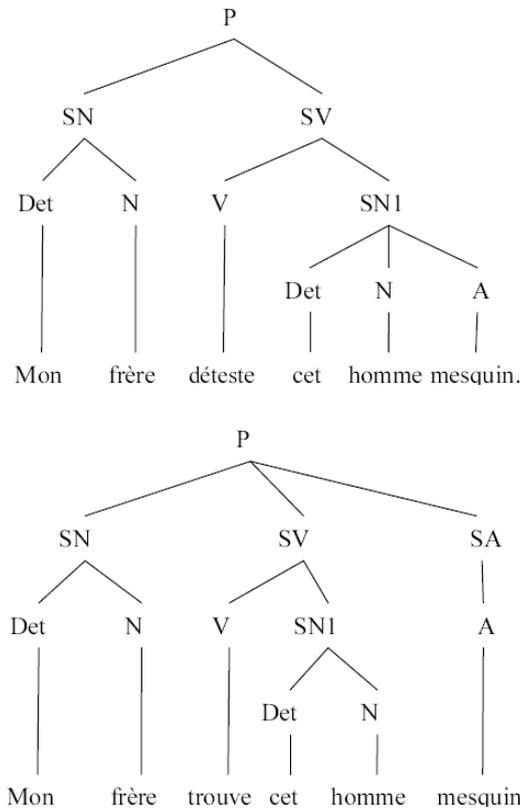


FIG. C.1: Représentation sous forme d'arbre syntaxique des phrases : *Mon frère déteste cet homme mesquin* (en haut) et *Mon frère trouve cet homme mesquin* (en bas). P : phrase ; SN : syntagme nominal ; SV : syntagme verbal ; Det : déterminant ; N : nom ; V : verbe ; A : adjectif.

Cette analyse, dite distributionnelle, des constituants de la phrase permet de la

⁹Selon les ouvrages on peut trouver la dénomination tête (Pollock, 1997) ou noyau (Pinker, 1999; Chiss *et al.*, 1998)

considérer comme une organisation hiérarchique de diverses catégories syntaxiques. Un arbre syntaxique nous fournit instantanément trois informations :

1. La hiérarchie des constituants présents dans la phrase. Elle est donnée par une lecture descendante de l'arbre.
2. Les catégories auxquelles appartiennent les différents composants de la phrase (*trouve* est un verbe, *mesquin* est un adjectif, ...).
3. Une représentation des fonctions des éléments et de leurs relations avec les autres éléments (ce qui correspond aux branches de l'arbre).

Les relations syntagmatiques entre les éléments sont données par une lecture ascendante de l'arbre. Grâce à cette représentation, la phrase n'apparaît plus comme une suite linéaire de mots, mais comme une hiérarchie de groupes syntaxiques s'emboîtant les uns dans les autres pour former des unités de plus en plus vastes convergeant vers la phrase.

La plupart du temps, une phrase (P) est formée d'un syntagme nominal (SN) suivi d'un syntagme verbal (SV). Par exemple :

(g) $P \rightarrow SN + SV : [P [SN \text{ Mon frère}] [SV \text{ ferme la porte avec la clé}]]$

Un syntagme nominal consiste obligatoirement en un nom qui peut être précédé éventuellement d'un déterminant et précédé ou suivi d'un syntagme adjectival. Un syntagme verbal contient au moins un verbe et potentiellement plusieurs autres éléments, parmi lesquels d'autres syntagmes nominaux ou prépositionnels et même d'autres phrases. On a donc :

(h)

$SV \rightarrow V : [SV [V \text{ nage}]]$

$SV \rightarrow V SN : [SV [V \text{ ferme}] [SN \text{ la porte}]]$

174 Annexe C. Les représentations syntaxiques en linguistique et psycholinguistique

SV \rightarrow V SN SP : [SV [V ferme] [SN la porte] [SP avec la clé]]

SV \rightarrow V P : [SV [V ferme] [SN la porte] [P que le vent avait ouvert]]

Cette méthode distributionnelle vient des travaux des structuralistes¹⁰ américains, en particulier de Harris (1951) et auparavant de Bloomfield (1933).

Elle considère que deux mots appartenant à la même classe sont susceptibles de se substituer l'un à l'autre dans une phrase. Ce postulat pose problème par rapport aux affirmations de Chomsky, en particulier sur le fait qu'une théorie ne doit pas pouvoir générer de phrases agrammaticales. Considérons que :

(i) P \rightarrow SN SV

En insérant des items lexicaux à la place des catégories lexicales, on peut d'après (i) générer la phrase grammaticale (j) et la phrase agrammaticale (k) :

(j) Mon frère partage le pain.

(k) *Mon frère pense le pain.

Les deux phrases sont toutes deux représentées par la schématisation (i) ce qui pose un problème théorique et montre les insuffisances du modèle dans cet état.

Pour empêcher ce type d'erreurs, Chomsky propose de modifier les procédés distributionnels de Harris pour en refaire des règles pouvant servir à générer des phrases et des syntagmes grammaticaux. Ce sont les règles syntagmatiques, ou règles de réécriture¹¹.

L'application de ces règles syntagmatiques donne les structures syntaxiques pos-

¹⁰Le terme de structuralisme trouve son origine dans le Cours de linguistique générale de Ferdinand de Saussure (Saussure, 1916), qui propose d'appréhender toute langue comme un système dans lequel chacun des éléments n'est définissable que par les relations d'équivalence ou d'opposition qu'il entretient avec les autres, cet ensemble de relations formant la structure.

¹¹Les règles syntagmatiques ou de réécriture, servent à générer des syntagmes ou des propositions. Cette notion a été introduite par Noam Chomsky en 1957 dans le cadre de la Théorie Standard et constitue une réponse aux procédés distributionnels de Z.S. Harris et de L. Bloomfield pour qui la syntaxe est le résultat de la distribution de morphèmes dans la phrase.

sibles d'une langue et permet de faire des prédictions quant à la forme des phrases qu'on peut rencontrer dans cette même langue. Chomsky s'est vu contraint de remanier et d'étendre plusieurs fois son modèle pour faire entrer certaines phrases incompatibles¹²

Les trois théories majeures connues de Chomsky sont la Théorie Standard (Chomsky, 1957, 1965), la Théorie du Gouvernement et du Liage (Chomsky, 1986; Haegeman, 1991) et le Programme Minimaliste¹³ (Chomsky, 1995; Lasnik, 2002).

Chomsky (1957) a également introduit le concept de transformations. Ce concept permet de montrer et d'expliquer, les liens qui existent entre deux ou plusieurs phrases (par exemple entre une phrase active et une phrase passive : *Le chat mange la souris* et *La souris a été mangée par le chat*). Cela implique qu'une phrase "noyau" à la forme active (*Le chat mange la souris*) peut avoir plusieurs structures syntaxiques associées après transformation (*La souris a été mangée par le chat*). La structure syntaxique d'une phrase peut être décrite par sa structure "noyau", appelée structure-D (c'est à dire sa structure profonde), ou sa structure obtenue après transformation (c'est à dire après le mouvement d'éléments de la phrase noyau), appelée structure-S (pour sa structure de surface).

Une des questions que l'on peut se poser serait de savoir si les représentations

¹²Par exemple la phrase *L'enseignant a été corrigé par les copies* est correcte grammaticalement mais n'a aucun sens. Le concept de transformation introduit par Chomsky, tel que conçu alors, était trop puissant en ce sens que tout (ou presque) était permis. Le concept même devait être réévalué et la solution proposée consiste en l'hypothèse qu'il existe des contraintes indépendantes qui permettent de réduire la capacité des transformations sans avoir à en compliquer la formulation. Certaines de ces contraintes s'avèrent bientôt être en fait des principes généraux et universaux de telle sorte que plus l'on découvrira de ces principes plus les règles transformationnelles pourront être réduites au maximum (Chomsky, 1977; Chomsky & Lasnik, 1977).

¹³Dans les années 1990, Chomsky a concentré ses travaux sur ce qu'il a appelé le "programme minimaliste". Celui-ci tente de démontrer que les facultés langagières du cerveau sont les facultés minimales auxquelles on pourrait s'attendre étant donné certaines conditions extérieures qui nous sont imposées de manière indépendante. Autrement dit, Chomsky met moins l'emphase sur quelque chose comme une grammaire universelle inscrite dans notre cerveau que sur un grand nombre de circuits cérébraux plastiques. Et avec cette plasticité viendrait un nombre infini de concepts. Notre cerveau procéderait alors à une association des sons et des concepts. Et les règles de grammaire que l'on observe ne seraient en fait que les conséquences, ou les effets secondaires de la façon dont le langage fonctionne.

syntaxiques décrites par les linguistes ont une réalité psychologique ? En d'autres termes, ces représentations sont-elles utilisées lors de la compréhension des phrases ? Et si oui, de quelle façon ?

C.4 L'analyseur syntaxique

Tous les modèles de compréhension du langage supposent l'existence d'un analyseur syntaxique humain (ou encore appelé parseur)¹⁴. La question est de savoir comment ce parseur assigne une structure syntaxique à une phrase et s'il le fait de façon automatique ou optionnel/superficiel ?

Depuis Bever (1970) on suppose qu'il attribue, dès que possible, à chaque mot décodé une fonction dans une structure syntagmatique construite au fur et à mesure, de gauche à droite. Lors de la compréhension des phrases, l'analyseur syntaxique n'est certainement pas le seul à être à l'oeuvre et d'autres sources d'informations sont également activées telles que les informations pragmatiques¹⁵, lexicales¹⁶ ou sémantiques¹⁷. Mais ces différents types d'informations peuvent soit interagir lors du traitement de la phrase, soit être indépendantes les unes des autres.

A l'heure actuelle, plusieurs hypothèses ont été postulées sur le fonctionnement de l'analyseur syntaxique. Traite-t-il la structure syntaxique de la phrase de façon indépendante vis-à-vis des autres informations (sémantique, ...) ou au contraire interagit-il avec les autres informations ? Les analyses (syntaxiques, sémantique, ...) se font-elles de façon parallèle ou plutôt de façon sérielle ?

¹⁴L'analyseur syntaxique correspond au "programme mental qui analyse la structure de la phrase au cours de la compréhension du langage" (Pinker, 1999). Nommé "parser" dans la littérature anglophone.

¹⁵La pragmatique est la branche de la linguistique qui s'intéresse aux éléments du langage dont la signification ne peut être comprise qu'en connaissant le contexte.

¹⁶Le lexique d'une langue constitue l'ensemble de ses mots.

¹⁷La sémantique est une branche de la linguistique qui étudie la signification des mots.

C.4.1 Analyse syntaxique indépendante

Une première hypothèse serait que l'analyseur syntaxique traite la structure syntaxique de la phrase de façon sérielle et sans prendre en compte les autres informations environnantes (pragmatique, lexicale ou sémantique).

L'idée sous-jacente de cette hypothèse serait que le traitement sémantique ne pourrait pas agir sur le traitement syntaxique, sauf si l'analyseur syntaxique a fini son traitement. Dans ce cas, si celui-ci suspecte une contradiction ou une anomalie entre les informations élaborées par l'analyseur syntaxique et par l'analyseur sémantique (ou pragmatique,...) une ré-analyse de la phrase sera enclenchée pendant laquelle de nouvelles structures syntaxiques seront construites, en tenant compte des premiers essais (Frazier & Rayner, 1982; Ferreira & Clifton, 1986).

Ce modèle postule que l'analyseur syntaxique construit des structures arborescentes similaires aux structures syntaxiques décrites par les linguistes (voir la section précédente).

L'exemple le plus célèbre, et sans doute le plus utilisé, pour expliquer cette hypothèse est l'effet engendré par les phrases en "garden-path"¹⁸ initié par Frazier et ses collaborateurs (Frazier, 1978). Ces phrases contiennent des ambiguïtés locales. Par exemple : "*The horse raced past the barn fell*" doit être lue "*The horse (that was raced past the barn) fell*" ou encore *Mon père conduit jusqu'à Lyon était dans le coma* doit être lue *Mon père [conduit jusqu'à Lyon] était dans le coma* (Frazier, 1978).

Frazier (1978) explique ce phénomène par deux règles principales : "l'attachement minimal" qui élimine tous les noeuds¹⁹ inutiles d'une phrase (c'est à dire en minimisant le nombre de syntagmes dans la phrase) et la "clôture tardive" qui attache chaque nouvel item lexical dans la structure syntaxique en cours d'élaboration.

Ces deux règles prennent leur place en cas d'ambiguïté dans la construction de la phrase. Ainsi, si une ambiguïté syntaxique est rencontrée, l'analyseur syntaxique explore

¹⁸Garden-path vient de l'expression *to be led in garden path*, c'est-à-dire *être mené en bateau*

¹⁹Les noeuds d'une phrase correspondent aux intersections des branches d'un arbre syntaxique.

la représentation la plus simple, soit en ne créant pas de noeud inutile qu'on chercherait à garder en mémoire le temps de résoudre l'ambiguïté (attachement minimal), soit en intégrant les items qui génèrent l'ambiguïté à la structure qu'il avait commencé à construire (clôture tardive).

D'après le principe de l'attachement minimal, l'analyseur syntaxique créera un arbre syntaxique à 6 noeuds pour la phrase ambiguë *Le gendarme arrête le garçon avec le sifflet* puisque le modèle cherche à générer la représentation syntaxique la plus simple. Il suppose donc que l'interprétation serait [Le gendarme[arrête [le garçon avec le sifflet]]], même si la phrase devrait être lue [Le gendarme[arrête [le garçon]] avec le sifflet] (Figure C.2).

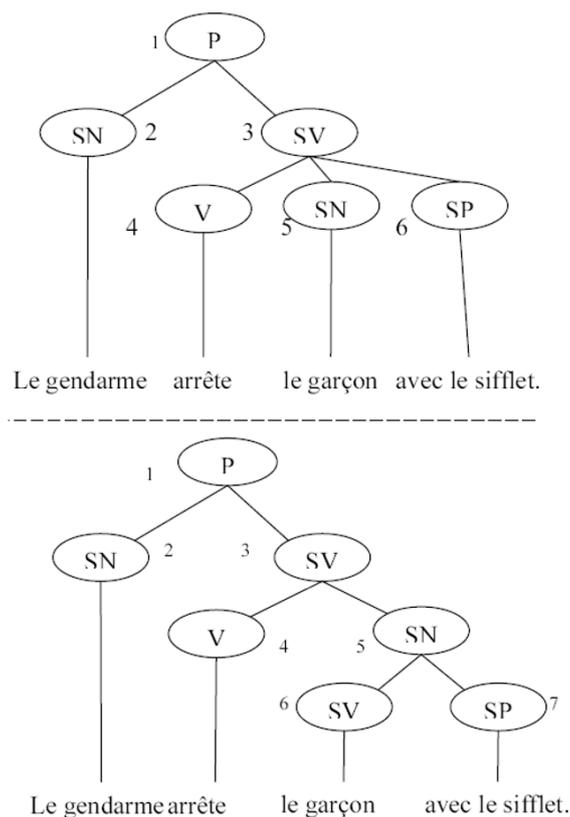


FIG. C.2: Exemple d'attachement minimal (en haut) à 6 noeuds et non-minimal (en bas) à 7 noeuds de la phrase : *Le gendarme arrête le garçon avec le sifflet*.

Dans la phrase *La fille aime le garçon et le chien aime son maître* le principe de

la clôture tardive fait que l'analyseur syntaxique traite la phrase pas à pas. Jusqu'au syntagme nominal *le chien*, il construit une structure syntaxique en intégrant les items les uns après les autres de gauche à droite, ce qui est a priori plus simple. La rencontre du deuxième *aime* va le conduire à recommencer depuis le début son analyse où il modifiera les attachements pour les rendre compatibles avec les nouvelles informations (Figure C.3).

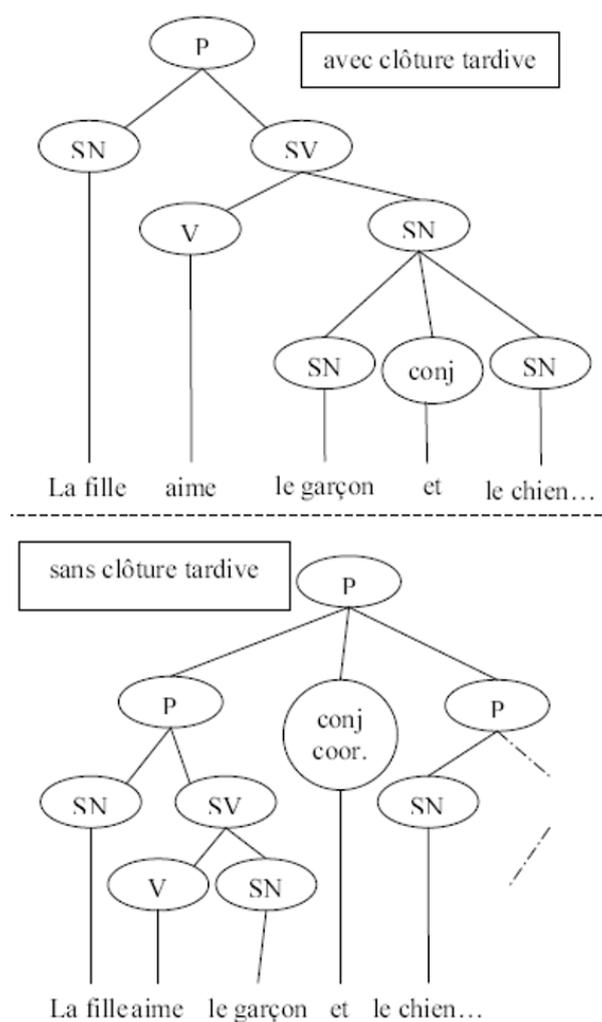


FIG. C.3: Analyse de la phrase *La fille aime le garçon et le chien aime son maître* selon le principe de la clôture tardive.

Selon les travaux de Frazier & Rayner (1982), les durées de fixation seraient plus longues sur la partie de la phrase levant l'ambiguïté lorsqu'elle existe : le lecteur met

plus de temps à lire les phrases avec un attachement non-minimal que les phrases à attachement minimal. Les lecteurs procèdent également à des régressions (retours) oculaires vers les zones ambiguës, pour pouvoir procéder à une nouvelle analyse de la phrase.

Toutefois, ces expériences ne sont pas sans susciter de vives controverses. Tout d'abord, le principe d'attachement minimal ne semble pas être possible dans toutes les langues, contrairement aux énoncés de Frazier (Frazier, 1978). D'autre part, l'indépendance totale de l'analyseur syntaxique est une conception du fonctionnement cérébral particulièrement contesté (voir la section suivante).

C.4.2 Analyse syntaxique interactive

Une deuxième hypothèse serait que l'analyseur syntaxique traite la structure syntaxique de la phrase en prenant en compte les autres informations environnantes qui seraient toutes traitées en parallèle. Une interaction de ces informations serait alors possible une fois que chaque traitement aura rendu son "verdict".

Crain & Steedman (1985) proposent que des informations référentielles (construites soit par le contexte linguistique précédent, soit par la connaissance du discours dans lequel s'insère la phrase que le lecteur analyse), sont susceptibles de jouer un rôle dans la sélection de l'analyse syntaxique la plus pertinente.

D'une certaine façon, le contexte référentiel informe et prévient le lecteur des éventuelles mauvaises constructions syntaxiques qu'il pourrait être amené à faire. Dans les phrases présentées plus haut *Le gendarme arrête le garçon avec un sifflet*, le syntagme prépositionnel *avec un sifflet* présente une ambiguïté : soit il précise l'instrument avec lequel le gendarme fait stopper le garçon (attachement au verbe), soit il précise le garçon que le gendarme arrête (attachement au nom).

Dans cet exemple, Crain & Fodor (1985) considèrent que sa résolution sera faite en référence à l'éventuel contexte précédant l'apparition de la phrase ou du discours

dans lequel elle se situe. Ils ont observé les temps de lecture de phrases présentant une ambiguïté dans des contextes soit neutres soit favorisant une interprétation. Si le contexte est en accord avec une interprétation, alors on doit observer des temps de lecture plus courts. Les résultats montrent que dans les contextes favorisant telle ou telle construction syntaxique, l'effet favorisant la structure la plus simple disparaît, alors qu'il est toujours présent quand le contexte est neutre (Crain & Fodor, 1985; Altman & Steedman, 1988).

Dans ce cas, une structure syntaxique serait soutenue par un contexte référentiel. L'analyseur syntaxique fournirait des informations à l'analyseur contextuel qui lui dirait de continuer en cas de congruence ou de stopper en cas d'incohérence avec le contexte sémantique.

Shapiro et ses collaborateurs eux considèrent que l'analyseur syntaxique est gouverné par les entrées lexicales. Ils ont montré que quand un verbe était rencontré dans une phrase, toutes les structures que ce verbe est susceptible de générer sont activées (Tyler & Marslen-Wilson, 1977; Marslen-Wilson & Tyler, 1980; Shapiro *et al.*, 1987, 1989, 1991; Rubin *et al.*, 1996). Cette activation rend primordial le rôle du verbe dans l'analyse syntaxique, puisque le verbe peut indiquer à l'analyseur les différentes structures qu'il est susceptible de rencontrer. Ainsi le verbe *partir* peut s'employer dans plusieurs contextes structurels (1) :

(1)

seul : Je pars.

[partir + où] : Je pars à la mer.

[partir + avec] : Je pars avec ma famille.

Une combinaison [partir + où + avec], avec les deux ordres possibles de construc-

tion.

D'autres études (Johnson-Laird, 1977; Spivey-Knowlton & Sedivy, 1995; MacDonald *et al.*, 1994; Trueswell & Tanenhaus, 1994) proposent que le rôle thématique²⁰ d'un mot donné ou ses propriétés sémantiques seraient également des sources importantes d'information pour la construction de la structure et du sens d'une phrase (Spivey-Knowlton & Sedivy, 1995; MacDonald *et al.*, 1994; Trueswell & Tanenhaus, 1994).

Par exemple, lors de l'interprétation des phrases interrogatives on peut se demander dans quelle mesure le contexte et la sémantique jouent un rôle dans le traitement syntaxique. En effet, les phrases interrogatives requièrent qu'un constituant apparaissant tôt dans une phrase soit gardé en mémoire en attendant que sa fonction puisse être identifiée. Par exemple, à *quel endroit*, qui est le constituant initial de la phrase (m), a été déplacé dans cette position depuis la position indiquée par un trait (ce qu'on appelle la "trace" du constituant).

(m) À quel endroit crois-tu que Pierre a rencontré sa propriétaire _ hier soir ?

Le rôle de l'analyseur syntaxique rencontrant un constituant comme à *quel endroit* serait de mettre ce constituant en attente dans la mémoire à court terme le temps de retrouver la "trace" laissé par le déplacement (Fodor, 1978). Le constituant en attente taxe la mémoire de travail²¹ et on suppose que l'analyseur syntaxique cherche à lui attribuer une interprétation le plus tôt possible (Crain & Fodor, 1985). Mais que veut dire "le plus tôt possible" ? Pickering *et al.* (1994) présentent des données suggérant que le constituant

²⁰Le rôle thématique caractérise le rôle joué par un argument (qui peut être considéré comme un participant) par rapport au prédicat (qui peut être un verbe, un nom, un adjectif ou une préposition). Par exemple dans la phrase *Georges est professeur de français à Brest*, *professeur* est le prédicat et *Georges*, *français* et *Brest* sont les arguments.

²¹La mémoire de travail est une mémoire à court-terme qui permet de retenir pendant un laps de temps assez court un nombre d'informations limitées. C'est cette mémoire que nous utilisons pour retenir un numéro de téléphone avant de le noter sur un papier.

est déchargé de la mémoire de travail dès qu'un sélectionneur potentiel est rencontré pour l'élément déplacé, et non pas dès qu'une "trace" potentielle est rencontrée. Dans l'exemple (m), le mot serait interprété immédiatement après *rencontré*, et non après *propriétaire*. Ici encore, on peut se demander dans quelle mesure le contexte et la sémantique jouent un rôle dans le traitement syntaxique.

Il est important de noter que la plupart des expériences qui ont étudié le fonctionnement de ce parseur ont été réalisées essentiellement dans la modalité visuelle. Par ce fait, les phrases lues pouvaient être comprises et dans certains cas désambiguïsées à l'aide des signes de ponctuation, par exemple la virgule. Il faut garder en mémoire que dans la modalité auditive, le rôle de la prosodie²² pourrait être pertinent, car il permet de lever des ambiguïtés locales dans les phrases.

Ces différents travaux soulèvent la question de l'aspect interactif du traitement. Une des questions qui reste encore en suspend est de savoir si l'analyseur syntaxique assigne la structure syntaxique d'une phrase automatiquement et systématiquement ou si ce traitement est optionnel ou superficiel.

²²La linguistique a redéfini la prosodie comme l'ensemble des phénomènes qui échappent au découpage de la parole en phonèmes : c'est à dire l'accent, la quantité et l'intonation.

Références

Travaux Scientifiques réalisés pendant la thèse

Publications Scientifiques

Devauchelle, A.D., Pallier, C., Rizzi, L., Boureau, Y.L. & Dehaene S. (2008). Neural evidence for constituent-structure analysis of sentences, in prep.

Devauchelle, A.D., Oppenheim, C., Rizzi, L., Dehaene, S. & Pallier C. (2008). Sentence Syntax and Content in the Human Temporal Lobe : An fMRI adaptation study in auditory and visual modalities *Journal of Cognitive Neuroscience*, in press.

Communication Affichées

Devauchelle, A.D., Boureau, Y.L., Dehaene, C. & Pallier C. (12-15 avril 2008). Sentence Processing and Grammatical Complexity. *Human Brain mapping*, Melbourne, Australie.

Devauchelle, A.D., Boureau, Y.L., Dehaene, C. & Pallier C. (15-19 juin 2008). Sentence Processing and Grammatical Complexity. *Cognitive Neuroscience Society*, San-Francisco, Etats-Unis.

Devauchelle, A.D., Boureau, Y.L., Dehaene, C. & Pallier C. (23-25 mai 2007). Decomposing the sentence comprehension network with fMRI in the visual modality. *Society of Neurosciences*, Montpellier, France.

Devauchelle, A.D., Oppenheim, C. & Pallier, C., June 11-15 2006, Comparison of sparse versus fast event related acquisition for auditory fMRI. *Human Brain Mapping*, Florence, Italy.

Devauchelle, A.D., Oppenheim, C., Rizzi, L., Dehaene, S. & Pallier C. (8-13 avril 2006). An fMRI study of syntactic and semantic adaptation. *Cognitive Neuroscience Society*, San-Francisco, Etats-Unis.

Bibliographie

- Altman, G. & Steedman, M. (1988). Interaction with context during human sentences processing. *Cognition*, 30 :191–238.
- Büchel, C., Price, C., & Friston, K. (1998). A multimodal language region in the ventral visual pathway. *Nature*, 394(6690) :274–277.
- Ben-Shachar, M., Hendler, T., Kahn, I., Ben-Bashat, D., & Grodzinsky, Y. (2003). The neural reality of syntactic transformations : evidence from functional magnetic resonance imaging. *Psychol Sci*, 14(5) :433–440.
- Ben-Shachar, M., Palti, D., & Grodzinsky, Y. (2004). Neural correlates of syntactic movement : converging evidence from two fmri experiments. *Neuroimage*, 21(4) :1320–1336.
- Bever, T. (1970). The cognitive basis for linguistic structures. In J. R. Hayes (Ed.), *Cognition and the development of language*, pp. 279–360. New York : Wiley.
- Binder, J. R., Rao, S. M., Hammeke, T. A., Yetkin, F. Z., Jesmanowicz, A., Bandettini, P. A., Wong, E. C., Estkowski, L. D., Goldstein, M. D., & Haughton, V. M. (1994). Functional magnetic resonance imaging of human auditory cortex. *Ann Neurol*, 35(6) :662–672.
- Bloomfield, L. (1933). *Language*. New York : Holt, Rinehart & Winston.
- Bock, J. K. (1986). Syntactic persistence in language production. *Cognitive Psychology*, 18 :355–387.
- Bock, K., Dell, G. S., Chang, F., & Onishi, K. H. (2007). Persistent structural priming from language comprehension to language production. *Cognition*.
- Bookheimer, S. Y., Zeffiro, T. A., Blaxton, T. A., Gaillard, W. D., Malow, B., & Theodore, W. H. (1998). Regional cerebral blood flow during auditory responsive naming : evidence for cross-modality neural activation. *Neuroreport*, 9(10) :2409–2413.
- Bornkessel, I., Zysset, S., Friederici, A. D., von Cramon, D. Y., & Schlesewsky, M. (2005). Who did what to whom? the neural basis of argument hierarchies during language comprehension. *Neuroimage*, 26(1) :221–233.

- Bottini, G., Corcoran, R., Sterzi, R., Paulesu, E., Schenone, P., Scarpa, P., Frackowiak, R. S., & 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.
- Branigan, H. (2006). Syntactic priming. *Language and Linguistic Compass*, 1 :1749–1818.
- Branigan, H., Pickering, M., Pearson, J., McLean, J., & Nass, C. (2003). Syntactic alignment between computers and people : the role of belief about mental states. In *Proceedings of the Twenty-fifth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Boston, MA*.
- Branigan, H. P., Pickering, M. J., & Cleland, A. A. (2000a). Syntactic co-ordination in dialogue. *Cognition*, 75(2) :B13–B25.
- Branigan, H. P., Pickering, M. J., & McLean, J. F. (2005). Priming prepositional-phrase attachment during comprehension. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 31(3) :468–481.
- Branigan, H. P., Pickering, M. J., McLean, J. F., & Cleland, A. A. (2007). Syntactic alignment and participant role in dialogue. *Cognition*, 104(2) :163–197.
- Branigan, H. P., Pickering, M. J., Stewart, A. J., & McLean, J. F. (2000b). Syntactic priming in spoken production : linguistic and temporal interference. *Mem Cognit*, 28(8) :1297–1302.
- Broca, P. (1861). Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie. *Bulletin de la Société Anatomique*, 6 :330–357.
- Caplan, D., Alpert, N., & Waters, G. (1998). Effects of syntactic structure and propositional number on patterns of regional cerebral blood flow. *J Cogn Neurosci*, 10(4) :541–552.
- Caplan, D., Alpert, N., & Waters, G. (1999). Pet studies of syntactic processing with auditory sentence presentation. *Neuroimage*, 9(3) :343–351.
- Caplan, D., Alpert, N., Waters, G., & Olivieri, A. (2000). Activation of broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation. *Hum Brain Mapp*, 9(2) :65–71.
- Caramazza, A., Berndt, R. S., Basili, A. G., & Koller, J. J. (1981). Syntactic processing deficits in aphasia. *Cortex*, 17(3) :333–348.
- Caramazza, A. & Zurif, E. B. (1976). Dissociation of algorithmic and heuristic processes in language comprehension. *Brain and Language*, 3 :572–582.
- Changeux, J. (2002). *L'homme de vérité*. paris : Odile Jacob.

- Chee, M. W. L., Soon, C. S., & Lee, H. L. (2003). Common and segregated neuronal networks for different languages revealed using functional magnetic resonance adaptation. *J Cogn Neurosci*, 15(1) :85–97.
- Chiss, J., Filliolet, J., & Mainguenaud, D. (1998). *Linguistique Française : Communication - Syntaxe - Poétique*. Paris : Hachette.
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic Structures*. La Haye : Mouton. Book.
- Chomsky, N. (1965). *Aspects of the Theory of Syntax*. Cambridge : The MIT Press.
- Chomsky, N. (1977). *Formal Syntax*, chap. On Wh-Movement, pp. 71–132. Academic Press, New-York.
- Chomsky, N. (1986). *Knowledge of Language Its Nature Origin and Use*. New-York : Praeger. Book.
- Chomsky, N. (1995). *The Minimalist Programm*. Cambridge : MIT Press.
- Chomsky, N. & Lasnik, H. (1977). Filters and control. *Linguistic Inquiry*, 8 :425–504.
- Cleland, A. A. & Pickering, M. (2006). Do writing and speaking employ the same syntactic representations? *Journal of Memory and Language*, 54 :185–198.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., & Michel, F. (2000). The visual word form area : spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123 (Pt 2) :291–307.
- Cohen, L., Jobert, A., Bihan, D. L., & Dehaene, S. (2004). Distinct unimodal and multimodal regions for word processing in the left temporal cortex. *Neuroimage*, 23(4) :1256–1270.
- Cooke, A., Zurif, E. B., DeVita, C., Alsop, D., Koenig, P., Detre, J., Gee, J., Pinango, M., Balogh, J., & Grossman, M. (2002). Neural basis for sentence comprehension : grammatical and short-term memory components. *Hum Brain Mapp*, 15(2) :80–94. 1065-9471 (Print)Journal Article.
- Corley, M. & Scheepers, C. (2002). Syntactic priming in english sentence production : categorical and latency evidence from an internet-based study. *Psychon Bull Rev*, 9(1) :126–131.
- Crain, S. & Fodor, J. D. (1985). *Natural Language Parsing : Psychological, Computational and Theoretical Perspectives*, chap. How can grammars help parsers?, pp. 94–128. Cambridge University Press.
- Crain, S. & Steedman, M. (1985). *Natural language parsing : Psychological, computational, and theoretical perspectives*, chap. On not being led up the garden path : The use of context by the psychological syntax processor. Cambridge University Press.

- Davis, M. H. & Johnsrude, I. S. (2003). Hierarchical processing in spoken language comprehension. *J Neurosci*, 23(8) :3423–3431.
- Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Odile Jacob.
- Dehaene, S., Clec'H, G. L., Poline, J.-B., Bihan, D. L., & Cohen, L. (2002). The visual word form area : a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport*, 13(3) :321–325.
- Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Bihan, D. L., Mangin, J. F., Poline, J. B., & Rivière, D. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nat Neurosci*, 4(7) :752–758.
- Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., Anton, J.-L., Campagne, A., Ciuciu, P., Dehaene, G. P., Denghien, I., Jobert, A., Lebihan, D., Sigman, M., Pallier, C., & Poline, J.-B. (2006). Functional segregation of cortical language areas by sentence repetition. *Human Brain Mapping*, 27(5) :360–371.
- Desimone, R. (1996). Neural mechanisms for visual memory and their role in attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93 :13494–13499.
- Démonet, J. F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J. L., Wise, R., Rascol, A., & Frackowiak, R. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115 (Pt 6) :1753–1768.
- Ferreira, F., Bailey, K., & Ferraro, V. (2002). Good-enough representation in language comprehension. *Currents directions in psychological science*, 11 :11–15.
- Ferreira, F. & Clifton, C. (1986). The independence of syntactic processing. *Journal of Memory and Language*, 25 :348–368.
- Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., Lohmann, G., von Cramon, D. Y., & Friederici, A. D. (2005). Revisiting the role of broca's area in sentence processing : syntactic integration versus syntactic working memory. *Hum Brain Mapp*, 24(2) :79–91.
- Fodor, J. D. (1978). Parsing strategies and constraints on transformations. *Linguistic Inquiry Amherst, Mass*, 9 :427–473.
- Frazier, L. (1978). *On comprehending Sentences : Syntactic Parsing Strategies*. Ph.D. thesis, Université du Connecticut à Storrs.
- Frazier, L. (1998). Getting there (slowly). *Journal of Psycholinguistic Research*, 27 :123–146.
- Frazier, L. & Rayner, K. (1982). Making and correcting errors during sentence comprehension : Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive Psychology*, 14 :178–210.

- Frazier, L., Taft, L., Roeper, T., Clifton, C., & Ehrlich, K. (1984). Parallel structure : a source of facilitation in sentence comprehension. *Mem Cognit*, 12(5) :421–430.
- Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cogn Sci*, 6(2) :78–84.
- Friederici, A. D., Bahlmann, J., Heim, S., Schubotz, R. I., & Anwander, A. (2006a). The brain differentiates human and non-human grammars : functional localization and structural connectivity. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103(7) :2458–63. 0027-8424 (Print)Journal Article.
- Friederici, A. D., Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., Bornkessel, I. D., & von Cramon, D. Y. (2006b). Processing linguistic complexity and grammaticality in the left frontal cortex. *Cereb Cortex*. 1047-3211 (Print)Journal article.
- Friederici, A. D., Meyer, M., & von Cramon, D. Y. (2000). Auditory language comprehension : an event-related fMRI study on the processing of syntactic and lexical information. *Brain and Language*, 75(3) :289–300.
- Friederici, A. D., Rüschemeyer, S.-A., Hahne, A., & 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.
- Geschwind, N. (1965). Disconnexion syndromes in animals and man. *Brain*, 88 :237–294.
- Geschwind, N. (1979). Specializations of the human brain. *Scientific American*, 241 :180–199.
- Golestani, N., Alario, F.-X., Meriaux, S., Bihan, D. L., Dehaene, S., & Pallier, C. (2006). Syntax production in bilinguals. *Neuropsychologia*, 44(7) :1029–1040.
- Grewe, T., Bornkessel, I., Zysset, S., Wiese, R., von Cramon, D. Y., & Schlesewsky, M. (2005). The emergence of the unmarked : a new perspective on the language-specific function of broca's area. *Hum Brain Mapp*, 26(3) :178–190.
- Gries, S. T. (2005). Syntactic priming : a corpus-based approach. *J Psycholinguist Res*, 34(4) :365–399.
- Grill-Spector, K. & Malach, R. (2001). fmr-adaptation : a tool for studying the functional properties of human cortical neurons. *Acta Psychologia*, 107(1-3) :293–321.
- Grodzinsky, Y. & Friederici, A. D. (2006). Neuroimaging of syntax and syntactic processing. *Curr Opin Neurobiol*, 16(2) :240–246.
- Hadjikhani, N., Liu, A. K., Dale, A. M., Cavanagh, P., & Tootell, R. B. (1998). Retinotopy and color sensitivity in human visual cortical area v8. *Nat Neurosci*, 1(3) :235–241.
- Haegeman, L. (1991). *Introduction to Government and Binding Theory*. Oxford : Basil Blackwell.

- Hagoort, P., Hald, L., Bastiaansen, M., & Petersson, K. M. (2004). Integration of word meaning and world knowledge in language comprehension. *Science*, 304(5669) :438–441.
- Harris, Z. (1951). *Methods in structural linguistics*. University of Chicago Press.
- Hasnain, M. K., Fox, P. T., & Woldorff, M. G. (1998). Intersubject variability of functional areas in the human visual cortex. *Hum Brain Mapp*, 6(4) :301–315.
- Hasson, U., Nusbaum, H. C., & Small, S. L. (2006). Repetition suppression for spoken sentences and the effect of task demands. *J Cogn Neurosci*, 18(12) :2013–2029.
- Haywood, S. L., Pickering, M. J., & Branigan, H. P. (2005). Do speakers avoid ambiguities during dialogue? *Psychol Sci*, 16(5) :362–366.
- Hickok, G. & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nat Rev Neurosci*, 8(5) :393–402.
- Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, W. D., Friston, K., Weiller, C., & Frackowiak, R. (1992). The cortical localization of the lexicons. positron emission tomography evidence. *Brain*, 115 (Pt 6) :1769–1782.
- Howard, R. J., ffytche, D. H., Barnes, J., McKeefry, D., Ha, Y., Woodruff, P. W., Bullmore, E. T., Simmons, A., Williams, S. C., David, A. S., & Brammer, M. (1998). The functional anatomy of imagining and perceiving colour. *Neuroreport*, 9(6) :1019–1023.
- Humphries, C., Binder, J. R., Medler, D. A., & Liebenthal, E. (2006). Syntactic and semantic modulation of neural activity during auditory sentence comprehension. *J Cogn Neurosci*, 18(4) :665–679.
- Humphries, C., Love, T., Swinney, D., & Hickok, G. (2005). Response of anterior temporal cortex to syntactic and prosodic manipulations during sentence processing. *Hum Brain Mapp*, 26(2) :128–138.
- Humphries, C., Willard, K., Buchsbaum, B., & Hickok, G. (2001). Role of anterior temporal cortex in auditory sentence comprehension : an fmri study. *Neuroreport*, 12(8) :1749–1752.
- Indefrey, P., Brown, C. M., Hellwig, F., Amunts, K., Herzog, H., Seitz, R. J., & Hagoort, P. (2001a). A neural correlate of syntactic encoding during speech production. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 98(10) :5933–5936. 0027-8424 (Print)Journal Article.
- Indefrey, P., Hagoort, P., Herzog, H., Seitz, R. J., & Brown, C. M. (2001b). Syntactic processing in left prefrontal cortex is independent of lexical meaning. *Neuroimage*, 14(3) :546–555.
- Indefrey, P., Hellwig, F., Herzog, H., Seitz, R. J., & Hagoort, P. (2004). Neural responses to the production and comprehension of syntax in identical utterances. *Brain Lang*, 89(2) :312–319.

- Indefrey, P., Kleinschmidt, A., Merboldt, K. D., Krüger, G., Brown, C., Hagoort, P., & Frahm, J. (1997). Equivalent responses to lexical and nonlexical visual stimuli in occipital cortex : a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage*, 5(1) :78–81.
- Jobard, G., Vigneau, M., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2007). Impact of modality and linguistic complexity during reading and listening tasks. *Neuroimage*, 34(2) :784–800.
- Johnson-Laird, P. (1977). *Tutorial essays in psychology*, chap. Psycholinguistics without linguistics, pp. 75–135. N.S. Sutherland.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., Keller, T. A., Eddy, W. F., & Thulborn, K. R. (1996). Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science*, 274(5284) :114–116.
- Kaan, E. & Swaab, T. Y. (2002). The brain circuitry of syntactic comprehension. *TICS*, 6(8) :350–356.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. (1997). The fusiform face area : a module in human extrastriate cortex specialised for face perception. *Journal of Neuroscience*, 17 :4302–4311.
- Keller, T. A., Carpenter, P. A., & Just, M. A. (2001). The neural bases of sentence comprehension : a fmri examination of syntactic and lexical processing. *Cereb Cortex*, 11(3) :223–37. 1047-3211 (Print)Journal Article.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., Smith, A. M., Mendrek, A., Forster, B. B., & Hare, R. D. (1999). Neural pathways involved in the processing of concrete and abstract words. *Hum Brain Mapp*, 7(4) :225–233.
- Klein, D., Zatorre, R. J., Chen, J.-K., Milner, B., Crane, J., Belin, P., & Bouffard, M. (2006). Bilingual brain organization : a functional magnetic resonance adaptation study. *Neuroimage*, 31(1) :366–375.
- Lasnik, H. (2002). The minimalist programm in syntax. *Trends in Cognitive Sciences*, 6 :432–437.
- Levelt, W. & Kelter, S. (1982). Surface form and memory in question answering. *Cognitive Psychology*, 14 :78–106.
- MacDonald, M. C., Pearlmutter, N. J., & Seidenberg, M. S. (1994). The lexical nature of syntactic ambiguity resolution [corrected]. *Psychol Rev*, 101(4) :676–703.
- Marshall, J. C. & Newcombe, F. (1973). Patterns of paralexia : a psycholinguistic approach. *J Psycholinguist Res*, 2(3) :175–199.
- Marslen-Wilson, W. & Tyler, L. (1980). The temporal structure of spoken language understanding. *Cognition*, 8 :1–71.

- Mazoyer, B. M., Dehaene, S., Tzourio, N., Frak, V., Murayama, N., Cohen, L., Lévrier, O., Salamon, G., Syrota, A., & Mehler, J. (1993). The cortical representation of speech. *JCN*, 5 :467–479.
- McKeefry, D. J. & Zeki, S. (1997). The position and topography of the human colour centre as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Brain*, 120 (Pt 12) :2229–2242.
- Mehler, J. & Carey, P. (1967). Role of surface and base structure in the perception of sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 6 :335–338.
- Mellet, E., Briscogne, S., Tzourio-Mazoyer, N., Ghaëm, O., Petit, L., Zago, L., Etard, O., Berthoz, A., Mazoyer, B., & Denis, M. (2000a). Neural correlates of topographic mental exploration : the impact of route versus survey perspective learning. *Neuroimage*, 12(5) :588–600.
- Mellet, E., Tzourio, N., Denis, M., & Mazoyer, B. (1998). Cortical anatomy of mental imagery of concrete nouns based on their dictionary definition. *Neuroreport*, 9(5) :803–808.
- Mellet, E., Tzourio-Mazoyer, N., Bricogne, S., Mazoyer, B., Kosslyn, S. M., & Denis, M. (2000b). Functional anatomy of high-resolution visual mental imagery. *J Cogn Neurosci*, 12(1) :98–109.
- Moore, C. J. & Price, C. J. (1999). Three distinct ventral occipitotemporal regions for reading and object naming. *Neuroimage*, 10(2) :181–192.
- Moro, A., Tettamanti, M., Perani, D., Donati, C., Cappa, S. F., & Fazio, F. (2001). Syntax and the brain : disentangling grammar by selective anomalies. *Neuroimage*, 13(1) :110–8. 1053-8119Clinical TrialJournal Article.
- Mériaux, S., Kherif, F., Pallier, C., Izard, V., Brett, M., Garnero, L., & Poline, J.-B. (2003). Assessing the homogeneity of subject's samples for random effect analyses in fMRI. In *Proceedings of 9th OHBM Meeting*. New York, USA : OHBM.
- Naccache, L. & Dehaene, S. (2001). The priming method : imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cerebral Cortex*, 11 :966–974.
- Newman, A. J., Pancheva, R., Ozawa, K., Neville, H. J., & Ullman, M. (2001). An event-related fMRI study of syntactic and semantic violations. *Journal of Psycholinguistics Research*, 30(3) :339–364.
- Nobre, A. C., Allison, T., & McCarthy, G. (1994). Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature*, 372(6503) :260–263.
- Noppeney, U. & Price, C. J. (2004). An fmri study of syntactic adaptation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(4) :702–713.

- Osterhout, L. & Holcomb, P. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31 :785–806.
- Pallier, C., Dehaene, S., Poline, J.-B., LeBihan, D., Argenti, A.-M., Dupoux, E., & Mehler, J. (2003). Brain imaging of language plasticity in adopted adults : can a second language replace the first ? *Cereb Cortex*, 13(2) :155–161.
- Paulesu, E., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362(6418) :342–345.
- Pereira, F. (1990). Finite-state approximations of grammars. In *Proceeding of the Second Speech and Natural Language Workshop*, pp. 20–25.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M., & Raichle, M. E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331(6157) :585–589.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Snyder, A. Z., & Raichle, M. E. (1990). Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science*, 249(4972) :1041–1044.
- Piattelli-Palmarini, M. (1982). *Théories du langage, Théories de l'apprentissage. Le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky*. Paris : Seuil.
- Pickering & Branigan (1999). Syntactic priming in language production. *Trends in Cognitive Science*, 3(4) :136–141.
- Pickering, M., Barton, S., & Shillock, R. (1994). *Perspectives on Sentence Processing*, chap. Unbounded dependencies, island constraints and processing complexity, pp. 199–224. Hillsdale, New-Jersey : Lawrence ErlbaumH.
- Pickering, M. & Branigan, H. (1998). The representation of verbs : Evidence from syntactic priming in language production. *Journal of Memory and Language*, 39 :633–651.
- Pinker, S. (1999). *L'instinct du langage*. Paris : Odile Jacob.
- Poldrack, R. A., Wagner, A. D., Prull, M. W., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *Neuroimage*, 10(1) :15–35.
- Pollock, J. (1997). *Langage et Cognition*. Paris : PUF.
- Potter, M. C. & Lombardi, L. (1998). Syntactic priming in immediate recall of sentences. *Journal of Memory and Language*, 38 :265–282.
- Price, C. J., Wise, R. J., Warburton, E. A., Moore, C. J., Howard, D., Patterson, K., Frackowiak, R. S., & Friston, K. J. (1996). Hearing and saying. the functional neuroanatomy of auditory word processing. *Brain*, 119 (Pt 3) :919–931.

- Puce, A., Allison, T., Asgari, M., Gore, J. C., & McCarthy, G. (1996). Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures : a functional magnetic resonance imaging study. *J Neurosci*, 16(16) :5205–5215.
- Quaglino, V., De Marco, G., Bourdin, B., Pottel, A., Czternasty, G., & Meyer, M. (2004). Etude par irmf des processus phonologiques impliqués dans la lecture de mots et de pseudo-mots. *ITBM-RBM*, 25 :205–211.
- Rodd, J. M., Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2005). The neural mechanisms of speech comprehension : fmri studies of semantic ambiguity. *Cereb Cortex*, 15(8) :1261–9. 1047-3211 (Print)Journal Article.
- Rubin, S., Newhoff, M., Peach, R., & Shapiro, L. P. (1996). Electrophysiological indices of lexical processing : the effects of verb complexity and age. *Journal of Speech and Hearing Research*, 39 :1071–1080.
- Santi, A. & Grodzinsky, Y. (2007). Working memory and syntax interact in broca's area. *Neuroimage*, 37(1) :8–17.
- Saussure, F. D. (1916). *Cours de linguistique générale*. Payot.
- Schacter, D. L. & Buckner, R. L. (1998). On the relations among priming, conscious recollection, and intentional retrieval : evidence from neuroimaging research. *Neurobiol Learn Mem*, 70(1-2) :284–303. 1074-7427Journal ArticleReviewReview, Tutorial.
- Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27 :379–423 and 623–656.
- Shapiro, L. P. (1997). Tutorial : an introduction to syntax. *J Speech Lang Hear Res*, 40(2) :254–272.
- Shapiro, L. P., Brookins, B., Gordon, B., & Nagel, N. (1991). Verb effects during sentence processing. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 17(5) :983–996.
- Shapiro, L. P., Zurif, E., & Grimshaw, J. (1987). Sentence processing and the mental representation of verbs. *Cognition*, 27(3) :219–246.
- Shapiro, L. P., Zurif, E. B., & Grimshaw, J. (1989). Verb processing during sentence comprehension : contextual impenetrability. *J Psycholinguist Res*, 18(2) :223–243.
- Smith, M. & Wheeldon, L. (2001). Syntactic priming in spoken sentence production - an online study. *Cognition*, 78(2) :123–164.
- Spivey-Knowlton, M. & Sedivy, J. C. (1995). Resolving attachment ambiguities with multiple constraints. *Cognition*, 55(3) :227–267.
- Stowe, L. A., Broere, C. A., Paans, A. M., Wijers, A. A., Mulder, G., Vaalburg, W., & Zwarts, F. (1998). Localizing components of a complex task : sentence processing and working memory. *Neuroreport*, 9(13) :2995–9. 0959-4965 (Print)Journal Article.

- Stowe, L. A., Paans, A. M., Wijers, A. A., Zwarts, F., Mulder, G., & Vaalburg, W. (1999). Sentence comprehension and word repetition : a positron emission tomography investigation. *Psychophysiology*, 36(6) :786–801. 0048-5772 (Print)Clinical TrialJournal Article.
- Stromswold, K., Caplan, D., Alpert, N., & Rauch, S. (1996). Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain and Language*, 52(3) :452–473.
- Szmrecsanyi, B. (2005). Creatures of habit : A corpus linguistic analysis of persistence in spoken english. *Corpus Linguistics and Linguistic Theory*, 1 :113–149.
- Trueswell, J. & Tanenhaus, M. (1994). *Perspectives on Sentence Processing*, chap. Toward a lexicalist framework for constraint-based syntactic ambiguity resolution, pp. 155–179. Hillsdale, New-Jersey : Lawrence Erlbaum.
- Tulving, E., Kapur, S., Markowitsch, H. J., Craik, F. I., Habib, R., & Houle, S. (1994). Neuroanatomical correlates of retrieval in episodic memory : auditory sentence recognition. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 91(6) :2012–2015.
- Tyler, L. & Marslen-Wilson, W. (1977). The on-line effects of semantic context on syntactic processing. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 16 :683–692.
- Vandenberghe, R., Nobre, A. C., & Price, C. J. (2002). The response of left temporal cortex to sentences. *J Cogn Neurosci*, 14(4) :550–560.
- Vandenberghe, R., Price, C., Wise, R., Josephs, O., & Frackowiak, R. S. (1996). Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature*, 383(6597) :254–256.
- Wagner, A. D., Schacter, D. L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A. M., Rosen, B. R., & Buckner, R. L. (1998). Building memories : remembering and forgetting of verbal experiences as predicted by brain activity. *Science*, 281(5380) :1188–1191.
- Wartenburger, I., Heekeren, H. R., Burchert, F., Heinemann, S., Bleser, R. D., & Villringer, A. (2004). Neural correlates of syntactic transformations. *Hum Brain Mapp*, 22(1) :72–81.
- Wiggs, C. & Martin, A. (1998). Properties and mechanisms of perceptual priming. *Current Opinion in Neurobiology*, 8 :227–233.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E., & Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256(5058) :846–849.
- Zeki, S. & Marini, L. (1998). Three cortical stages of colour processing in the human brain. *Brain*, 121 (Pt 9) :1669–1685.
- Zeki, S., Watson, J. D., Lueck, C. J., Friston, K. J., Kennard, C., & Frackowiak, R. S. (1991). A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex. *J Neurosci*, 11(3) :641–649.

TITLE Investigation/examination of the brain network involved in the syntactic and lexico-semantic processing in sentences.

ABSTRACT Previous studies on syntax have not reached a clear consensus on the location of brain areas involved in the syntactic processing compared with those involved in semantic processing of sentences. The goal of this thesis was to explore areas involved in these syntactic and semantic processes and those involved in the integration of these two pieces of information. The first experiments showed that repetition of the same lexico-semantic content led to an adaptation effect in the majority of temporal and frontal areas belonging to the sentence processing network, and that this adaptation was equally strong for both the visual and auditory modalities.

However, no syntactic adaptation effect was observed when the same syntactic structure was repeated, except during a behavioural experiment where participants had to press a button when they understood the sentence. This difference could be explained by the fact that the behavioural task induced participants to rely on peculiar strategies, not present during fMRI, to anticipate the end of the sentence.

This lack of syntactic adaptation in fMRI could either mean that there is no brain area involved in the construction of the entire syntactic tree or that these areas are not sensitive to the adaptation paradigm. In this context, we ran an experiment to identify regions involved in the building of the syntactic trees. This approach consisted in looking for areas that showed greater activations as the size of the constituents increased. A positive correlation between activations and the size of the constituents was observed in both left anterior and posterior temporal regions and in left inferior frontal regions.

This work permitted a clearer delineation of the areas involved in syntactic and lexico-semantic sentence processing and to distinguish different levels of syntactic processing.

TITRE Exploration du réseau cérébral impliqué dans les traitements syntaxiques et lexico-sémantiques des phrases.

RESUME Les études antérieures sur la syntaxe n'ont pas abouti à un consensus clair concernant la localisation des aires cérébrales impliquées dans le traitement syntaxique par rapport à celles impliquées dans le traitement sémantique des phrases. Ce travail de thèse avait pour but d'explorer les réseaux cérébraux impliqués dans ces traitements syntaxiques et sémantiques ainsi que ceux impliqués dans l'intégration de ces deux informations.

Les premières expériences ont permis de montrer que la répétition du contenu lexico-sémantique entraînait un phénomène d'adaptation dans la plupart des aires temporales et frontales appartenant au réseau de traitement des phrases, aussi bien dans la modalité visuelle que dans la modalité auditive. Cependant aucun effet d'adaptation syntaxique n'a pu être observé lorsque la même structure syntaxique était répétée, excepté lors d'une expérience comportementale où les participants devaient appuyer sur un bouton lorsqu'ils avaient compris la phrase. Cette différence pourrait être expliquée par la mise en place d'une stratégie par les participants afin d'anticiper la fin de la phrase.

Cette absence d'adaptation syntaxique en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle pourrait signifier qu'il n'y ait pas d'aire cérébrale impliquée dans la construction de l'arbre syntaxique global ou que ces aires ne soient pas sensibles au paradigme d'adaptation. Dans cette optique, nous avons réalisé une expérience qui nous a permis de mettre en évidence des régions impliquées dans la construction des constituants d'une phrase. Une corrélation positive des activations avec la taille des constituants a été observée dans les régions temporales antérieures et postérieures gauches ainsi que dans des régions frontales inférieures gauches.

Ce travail a permis de mettre en évidence les régions cérébrales impliquées dans les traitements syntaxiques et/ou lexico-sémantiques des phrases et de distinguer différents niveaux de traitements syntaxiques.

DISCIPLINE Neurosciences

SPECIALITE Neurosciences Cognitives

MOTS-CLEFS Homme, IRMf, Langage, Syntaxe, Sémantique

LABORATOIRE D'ACCUEIL Unité Inserm-CEA de NeuroImagerie Cognitive. CEA/SAC/DSV/I²BM/NeuroSpin, Bâtiment 145, Point Courrier 156, 91191 GIF/YVETTE, FRANCE