



HAL
open science

Caractérisation de la compréhension du langage : implication des informations sémantiques et syntaxiques en relation avec les mécanismes de contrôle cognitif

Samuel El- Bouzaïdi Tiali

► To cite this version:

Samuel El- Bouzaïdi Tiali. Caractérisation de la compréhension du langage : implication des informations sémantiques et syntaxiques en relation avec les mécanismes de contrôle cognitif. Psychologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALS003 . tel-03698455

HAL Id: tel-03698455

<https://theses.hal.science/tel-03698455>

Submitted on 18 Jun 2022

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

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



THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : PCN - Sciences cognitives, psychologie et neurocognition

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Samuel EL BOUZAI DI TIALI

Thèse dirigée par **Marcela PERRONE-BERTELOTTI** et préparée au sein du **Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition** dans l'**École Doctorale Ingénierie pour la Santé la Cognition et l'Environnement**

Caractérisation de la compréhension du langage : implication des informations sémantiques et syntaxiques en relation avec les mécanismes de contrôle cognitif

Language comprehension characterization: semantic and syntactic information implication in relation with cognitive control mechanisms

Thèse soutenue publiquement le **21 février 2022**, devant le jury composé de :

Madame MARCELA PERRONE-BERTELOTTI

Maître de conférences HDR, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, Directrice de thèse

Madame STEPHANIE RIES-CORNOU

Professeur assistant, San Diego State University, Examinatrice

Madame BARBARA KOPKE

Professeur des Universités, UNIVERSITE TOULOUSE 2 - JEAN JAURES, Rapporteur

Monsieur MICHEL HOEN

Docteur en sciences, OTICON MEDICAL, Rapporteur

Madame MARIE-LINE BOSSE

Professeur des Universités, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, Présidente

Monsieur FREDERIC ISEL

Professeur des Universités, UNIVERSITE PARIS 10 - NANTERRE, Examineur

Résumé

La compréhension du langage, bien qu'étant omniprésente au quotidien, est un processus cognitif complexe dont les mécanismes et les réseaux corticaux sous-jacents sont encore peu compris. Lors de la compréhension, différents processus cognitifs semblent entrer en jeu. Il est notamment proposé que les performances de compréhension soient modulées non seulement par le type d'information linguistique traitée mais également par des mécanismes domaine-généraux. L'objectif de cette thèse était d'une part d'évaluer les interactions entre la compréhension du langage oral et le contrôle cognitif, et d'autre part de caractériser le traitement des informations sémantiques et syntaxiques dans la compréhension et dans les interactions précédemment décrites. Nous avons pour cela mené plusieurs études avec des mesures comportementales (Etude 1-4) et en électroencéphalographie intracrânienne -sEEG- (Etude 5-7). Dans ces études, nous avons mis au point différents paradigmes expérimentaux permettant d'évaluer la relation entre les processus de compréhension du langage et ceux de contrôle cognitif de manière causale et corrélative. Nous avons proposé des manipulations linguistiques en lien avec les informations lexico-sémantiques et syntaxiques. Nos études montrent que dans des situations d'ambiguïté linguistique les processus de contrôle cognitif sont impliqués et permettent de meilleures performances. De plus, d'après nos résultats les liens entre la compréhension du langage oral et le contrôle cognitif semblent être bidirectionnels. Nos études en sEEG se sont centrées tout d'abord sur la caractérisation du rôle fonctionnel des différentes bandes de fréquence (alpha, beta, low-gamma et high-gamma) lors du traitement de l'information sémantique et syntaxique. Ces études montrent que le réseau canonique du langage présente un pattern d'activité majoritairement marqué par une absence de spécificité fonctionnelle à travers les quatre bandes de fréquences explorées. Au niveau temporel deux sous-réseaux semblent émerger en termes de patterns d'activité spectrale avec un traitement sémantique soutenu par l'activité de hautes fréquences tandis que le traitement syntaxique semble être soutenu par un traitement de basses fréquences. De plus, les résultats montrent qu'une même région peut présenter une dissociation fonctionnelle en lien avec la fréquence évaluée. Finalement, nous avons évalué l'effet de ce type de dissociation fonctionnelle en lien avec les processus de contrôle cognitif (contrôle attentionnel). Cette dernière étude, en cours, semble montrer des modulations attentionnelles au sein des voies ventrale et dorsale en fonction de la spécialisation linguistique du réseau évalué. L'ensemble de ces travaux de thèse apportent des arguments quant à l'existence de liens entre les processus de compréhension du langage oral et ceux de contrôle cognitif. Ces résultats ouvrent des perspectives au niveau appliqué et notamment dans la proposition de méthodes interventionnelles par l'entraînement du contrôle cognitif lors de troubles de la compréhension.

Mots clés : compréhension du langage, contrôle cognitif, sémantique, syntaxe, sEEG, langage

Abstract

Language comprehension, although ubiquitous in everyday life, is a complex cognitive process whose mechanisms and underlying cortical networks are still poorly understood. During comprehension different cognitive processes seem to come into play. In particular, it is proposed that comprehension performance is not only modulated by the type of linguistic information processed but also by domain-general mechanisms. The aim of this thesis was to evaluate the interactions between oral language comprehension and cognitive control, and to characterize the processing of semantic and syntactic information during comprehension and in the interactions previously described. To this end, we conducted several studies with behavioral measures (Studies 1-4) and intracranial electroencephalography –sEEG– (Studies 5-7). In these studies, we developed different experimental paradigms to assess the relationship between language comprehension and cognitive control processes in a causal and correlational manner. We have proposed linguistic manipulations related to lexico-semantic and syntactic information. Our studies show that in situations of linguistic ambiguity, cognitive control processes are involved and allow better performances. Moreover, according to our results the links between oral language comprehension and cognitive control seem to be bidirectional. Our sEEG studies first focused on characterizing the functional role of the different frequency bands (Alpha, Beta, Low-gamma and High-gamma) during semantic and syntactic processing. These studies show that the canonical language network presents an activity pattern that is mostly marked by a lack of functional specificity across the four frequency bands explored. At the temporal level two subnetworks seem to emerge in terms of spectral activity patterns with semantic processing supported by high frequency activity while syntactic processing seems to be supported by lower frequency activities. Furthermore, the results show that the same region can show functional dissociation in relation to the frequency evaluated. Finally, we evaluated the effect of this type of functional dissociation in relation to cognitive control processes (attentional control). This last (in progress) study, seems to show attentional modulations within the ventral and dorsal pathways according to the linguistic specialization of the evaluated network. All of these studies provide evidence for the existence of links between the oral language comprehension and cognitive control processes. These results open applied perspectives in line with the possibility to improve performance in one domain by training another one.

Key-words: language comprehension, cognitive control, semantic, syntax, sEEG, language

Remerciements

Nombreuses sont les personnes qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin durant ma thèse. Je ne pourrais prétendre pouvoir remercier tout le monde et encore moins prétendre n'oublier personne, je m'en excuse d'avance.

Tout d'abord, je souhaite remercier Barbara Köpke, Michel Hoen, Marie-Line Bosse, Frédéric Isel, et Stéphanie Riès-Cornou d'avoir accepté de lire et évaluer mon travail de thèse.

Un grand merci Marcela Perrone-Bertolotti. Merci pour ton expertise, ton énergie, ton recul, ta disponibilité et ton soutien. J'ai énormément appris à tes côtés durant ces années et travailler avec toi était un plaisir.

Merci Juan Vidal, pour tes conseils, ton expertise mais également ta positivité et ton enthousiasme sans faille.

Merci Fanny Meunier et Elsa Spinelli de m'avoir aidé, conseillé et pour nos échanges stimulants.

Merci Lorella Minotti et Philippe Kahane d'avoir accepté de collaborer avec moi et aux techniciennes du pôle épilepsie pour votre gentillesse et votre patience.

Merci à tous les patients et tous les participants ayant pris part à nos études.

Merci Alan, Richard et Sylvain pour ces trois années à donner des cours de stats avec vous, c'était top. Sylvain merci également pour ces semaines du cerveau dans les classes et pour tes conseils en traitement du signal.

Evidemment, merci à mes collègues de bureaux, Olivier, Ali et Maëlle. La thèse n'aurait pas été la même sans vous. Merci pour votre aide, pour les débats, les pauses, les goûters et pour votre soutien. Olivier merci pour ton soutien et pour ton humour, je ne me lasse jamais de tes petites blagues. Ali merci pour tes graphs en tout genre, tes conseils et ta folie. Maëlle merci pour tes conseils, ton réalisme, tes gâteaux et ta gentillesse. C'était un véritable plaisir d'être dans ce bureau avec vous.

Merci également Laura pour ta gentillesse, tes petites attentions et nos discussions. Merci Méline pour ton premier degré. Merci Elie pour tes rage quit. Merci Brice pour ta franchise. Merci Sonja pour ta gentillesse et tes conseils. Merci Cynthia pour ton énergie. Merci Lucrèce pour nos discussions. Merci Elise pour tes conseils. Merci Rémi pour ta sérénité. Merci Lise pour tes As. Merci Thomas pour ces débats. Merci à tous les doctorants de manière générale pour les échanges que l'on a pu avoir et pour cette atmosphère bienveillante et positive.

Merci la team Arcachon pour votre soutien d'un peu partout.

Merrick, que les années ont défilé. Tout ce chemin depuis la L1. Merci pour ta vision futuriste, ta curiosité, ta gentillesse, pour tous nos débats et toutes nos parties. Hâte de voir dans quel futur nous serons.

Un énorme merci à mes parents. Merci pour votre amour et votre soutien inconditionnel depuis toujours de près ou de loin, je n'en serais pas là sans tout ça. Merci également à mon frère et ma sœur de toujours être là. Merci Tiago pour ta gentillesse. Merci Anna et Emma d'avoir pointé votre petit bout de nez dans la famille. Merci pour vos petits sourires qui me remplissent de joie.

Enfin, merci Pauline pour tout. Merci de me soutenir et me supporter depuis toutes ces années. Merci d'être à mes côtés au quotidien et de rendre mes jours plus heureux. Hâte de partir à l'aventure avec toi.

Table des Matières

Table des Figures.....	xxi
Table des Tableaux.....	xxv
Préambule.....	xxvii
SECTION THEORIQUE.....	1
Chapitre 1 : Compréhension du langage.....	3
1. Fondements de l'étude de la compréhension du langage	3
1.1 Approche générativiste.....	4
1.1.1 Approche fonctionnelle.....	5
2. Informations traitées lors de la compréhension du langage	6
2.1 Informations syntaxiques et les modèles dits <i>Syntax-First</i>	6
2.1.1 Les premiers modèles <i>Syntax-First</i>	6
2.1.2 Modèle de traitement des phrases auditives d'Angela Friederici	7
2.2 Informations sémantiques linguistique et non-linguistiques : vers des modèles interactifs.....	13
2.2.1 Traitement précoce des informations sémantiques linguistiques	13
2.2.2 Modèle <i>Good-Enough</i> de Fernanda Ferreira.....	14
2.2.3 Traitement des informations non-linguistiques.....	15
2.3 Modèle MUC de Peter Hagoort	16
En résumé.....	22
Chapitre 2 : Traitement du langage oral : automaticité, prédiction et ambiguïté.....	23
1. Processus automatiques de traitement du langage	24
1.1. Automaticité dans le traitement phonologique	24
1.2. Automaticité dans l'accès lexico-sémantique	25
1.3. Automaticité dans le traitement syntaxique	27
2. Prédiction dans le langage	29

2.1. Prédications d'informations phonologiques	29
2.2. Prédications d'informations sémantiques	30
2.3. Prédiction d'informations syntaxiques	32
2.4. Différentes approches des mécanismes prédictifs	33
3. Ambiguïté et situations complexes	36
3.1. Ambiguïté lexicale et sémantique	36
3.2. Ambiguïté syntaxique	39
4. Compréhension de la parole dans le bruit.....	44
4.1. Masquage énergétique.....	44
4.2. Masquage Informationnel et parole dans la parole.....	45
En résumé.....	48
Chapitre 3 : Contrôle cognitif et compréhension du langage	49
Abstract.....	53
1. Introduction.....	54
2. What do we mean by cognitive control?.....	55
3. Cognitive control and language comprehension during cognitive development	57
4. Cognitive control and language comprehension in adulthood.....	61
5. Cognitive control and language comprehension in aging.....	66
6. Bilingualism: A particular case on the cognitive control and language interaction	69
7. Conclusion and perspectives.....	71
En résumé.....	73
Problématique	75
SECTION EXPERIMENTALE	77
Chapitre 4 : Evaluation comportementale de l'implication du contrôle cognitif lors de la compréhension du langage	79

1. Etude 1 : Traitement d’ambiguïtés lexicales dans une situation de parole dans la parole et implication du contrôle cognitif.....	81
Abstract.....	82
1.1 Introduction.....	83
1.2 Method	87
1.2.1 Participants	87
1.2.2 Tasks and Stimuli.....	87
1.2.3 Session 1: Online Language Comprehension Task.....	87
1.2.3.1 Procedure.....	89
1.2.4 Session 2: Cognitive Control Tasks.....	90
1.2.4.1 Procedures.....	90
1.3 Data Analyses	92
1.3.1 Online Language comprehension task	93
1.3.1.1 Behavioral performances analysis	93
1.3.1.2 Eye-tracking Analyses	93
1.3.2 Cognitive control tasks	94
1.3.2.1 Flanker task.....	94
1.3.2.2 N-Back task.....	94
1.3.2.3 SART.....	95
1.3.3 Online language task and cognitive control performances relationship.....	95
1.4 Results	96
1.4.1 Behavioral	96
1.4.2 Eyetracking	97
1.4.2.1 Probability of look	97
1.4.2.2 Proportion of look	100
1.4.3 Online language comprehension and executive function relationship.....	102
1.5 Discussion	103
1.6 Conclusion.....	106
1.6.1 Supplementary material	107
En résumé.....	108
2. Etude 2 : Influence du traitement d’ambiguïtés lexicales sur les processus de contrôle cognitif : paradigme en double tâche	109

Abstract	110
2.1 Introduction.....	111
2.2 Materials and methods	115
2.2.1 Participants	115
2.2.2 Task	115
2.2.3 Stimuli	116
2.2.4 Flanker items	116
2.2.4.1 Auditory language comprehension stimuli	117
2.2.5 Procedure	118
2.3 Data Analyses	119
2.3.1 Verification analyses	120
2.3.2 Confirmatory (preregistered) analyses	120
2.3.3 Exploratory (non-preregistered) analyses.....	121
2.4 Results	122
2.4.1 Verification analyses	122
2.4.2 Confirmatory results	124
2.4.3 Exploratory results	125
2.5 Discussion	128
2.6 Conclusion.....	131
2.6.1 Supporting Information.....	133
En résumé.....	134
3. Etude 3 : Évaluation de l'engagement du contrôle cognitif lors de la compréhension du langage : réplication de l'étude de Hsu et Novick (2016)	135
Abstract.....	136
3.1 Introduction.....	137
3.2 Méthode	143
3.2.1 Participants	143
3.2.2 Stimuli et Matériel.....	143
3.2.2.1 Session 1 : Contrôle Cognitif	144
3.2.2.2 Session 2 : Réplication de l'étude de Hsu et Novick (2016).....	147
3.3 Analyses.....	149

3.3.1	Analyses confirmatoires	149
3.3.2	Analyses exploratoires	151
3.3.2.1	Tâche Flanker	151
3.3.2.2	Tâche N-back	152
3.3.2.3	Tâche Number-Letter	152
3.3.2.4	Tâche SART	153
3.3.2.5	Corrélations	153
3.4	Résultats	154
3.4.1	Résultats confirmatoires	154
3.4.1.1	Vérification de l'effet Stroop	154
3.4.1.2	Proportion d'actions correctes	155
3.4.1.3	Temps de réaction	155
3.4.1.4	Probabilité de regards	156
3.4.1.5	Proportion de fixation	157
3.4.2	Résultats exploratoires	159
3.5	Discussion	159
	Matériel Supplémentaire	164
	En résumé	165
4.	Etude 4 : Traitement de phrases non-canoniques et implication du	
	contrôle cognitif.....	167
	Abstract	168
4.1	Introduction	169
4.2	Method	173
4.2.1.1	Participants	173
4.2.2	Language Session	174
4.2.2.1	Material	174
4.2.2.2	Procedure	174
4.2.3	Executive Control Session	175
4.2.3.1	Flanker Task	175
4.2.3.2	N-Back Task	176
4.2.3.3	Number-Letter Task	176
4.2.3.4	SART	177

4.3	Analyses.....	178
4.3.1	Language Session	179
4.3.2	Executive Control Session	180
4.3.2.1	Flanker Task.....	180
4.3.2.2	N-Back Task.....	180
4.3.2.3	Number-Letter Task.....	181
4.3.2.4	SART.....	181
4.4	Results	181
4.5	Discussion	185
4.6	Conclusion.....	188
	En résumé.....	189
4.7	Perspective : Adaptation de la tâche en sEEG	190

Chapitre 5 : Evaluation des mécanismes cérébraux de la compréhension du langage et du contrôle cognitif..... 193

1. Etude 5 : Traitement de l'information sémantique et syntaxique pendant la compréhension du langage oral : une approche spectrale en EEG intracrânien..... 195

	Abstract	196
1.1	Introduction.....	197
1.2	Method	201
1.2.1	Participants	201
1.2.2	Electrode implantation and positioning	202
1.2.3	SEEG recordings	203
1.2.4	Language comprehension task and stimuli.....	203
1.2.5	Preprocessing sEEG signal.....	205
1.2.6	Regions of interest (ROI).....	205
1.2.7	Amplitude Analysis	207
1.3	Results	207
1.3.1	Semantic effects.....	207
1.3.2	Syntactic effect.....	210
1.4	Discussion	213
1.5	Conclusion.....	216

Supplementary Material	217
En résumé.....	218
2. Etude 6 : Spécification de l'activité oscillatoire du gyrus frontal inférieur gauche lors de la compréhension du langage.....	221
Abstract.....	222
2.1 Introduction.....	223
2.2 Method	224
2.2.1 Participants	224
2.2.2 Electrode implantation.....	225
2.2.3 SEEG recordings	226
2.2.4 Region of interest.....	227
2.2.5 Cognitive task and procedure.....	227
2.2.5.1 Auditory perception task.....	227
2.3 Analysis.....	228
2.3.1 Preprocessing sEEG signal.....	228
2.3.2 Statistical analyses.....	228
2.4 Results	229
2.4.1 Pars orbitaris.....	229
2.4.2 Pars triangularis	229
2.4.3 Pars opercularis	229
2.5 Discussion	232
2.6 Supplementary material.....	234
En résumé.....	235
3. Etude 7 : Dynamique cérébrale de l'interaction du langage et du contrôle attentionnel : étude en cours	237
En résumé.....	241
Chapitre 6 : Discussion générale et perspectives	243
Résumé et discussion générale des principaux résultats.....	244
Manipulations, mesures expérimentales et leurs implications.....	252
Demande de la situation et compréhension	257
Perspectives.....	258

Conclusion	259
Annexes	260
Annexe 1 : Enveloppes de dynamiques cérébrales Etude 5	260
Annexe 2 : Complément étude 7 en cours : Introduction, méthode, et analyses des données	262
Bibliographie	270

Table des Figures

Figure 1.1 : Schéma descriptif des étapes de traitement du langage oral (A) et des régions impliquées lors de la compréhension du langage selon le modèle de Friederici	7
Figure 1.2 : Trois composantes du modèle MUC : Mémoire (en jaune), Unification (en bleu) et Control (en rose). Tiré de Hagoort (2013).....	17
Figure 1.3 : Schéma des patterns de la connectivité fonctionnelle (A) et anatomique (B) dans le réseau perisylvian gauche du langage	18
Figure 2.1 : Tableau décrivant les conditions expérimentales d'une tâche classique de Stroop.....	26
Figure 2.2 : Exemple de scène visuelle utilisée dans l'étude d'Altmann et Kamide (1999) permettant d'étudier la prédiction dans la compréhension du langage	31
Figure 2.3 : Design expérimental de l'étude de Chambers, Tanenhaus, et Magnuson (2004)	43
Figure 4.1.1: Task and Noise conditions	88
Figure 4.1.2: Example of typical trials and the visual scene displayed	90
Figure 4.1.3: Cognitive control tasks' designs including the Flanker task (A), the N-Back task (B) and the SART (C).....	92
Figure 4.1.4: Behavioral performances in terms of accuracy (left) and reaction times (right)	97
Figure 4.1.5: Probability of look to the correct and to the incorrect target during the total sentence presentation time for each crossing between Noise and Sentence Type experimental conditions	98
Figure 4.1.6: Probability of looking to the phonological and semantic distractors during the total sentence presentation time for each crossing between Noise and Sentence Type experimental conditions	99
Figure 4.1.7: Probability of looking to the correct and to the incorrect target during homophone sentences in silence	100
Figure 4.1.8: Fixation proportions on each of the four elements of the scene (correct and incorrect target, and semantic and phonological distractors) for the two sentence	

types (control and homophone) with and without babble noise during the ambiguity time window (2500ms-4000ms).....	101
Figure 4.1.9: Time participants last looked at the incorrect target as a function of Noise Condition and Sentence Type	102
Figure 4.1.S1: A) Correlation between SART false alarm index and Sentence Type index for incorrect target fixations. B) Correlation between Flanker difference index for RT and Noise index for phonological distractor fixations	107
Figure 4.1.S2: A) Correlation between FactorG1 and Noise index for incorrect target fixations. B) Correlation between FactorG2 and Homophone index for incorrect target fixations	107
Figure 4.2.1: Dual-task paradigm involving a Flanker task and an auditory language comprehension task	116
Figure 4.2.2: Reaction times for the Flanker items as a function of Flanker situation and Flanker congruency conditions	124
Figure 4.2.3: Mean reaction times for each experimental sentence type as a function of synchronized Flanker congruency	125
Figure 4.2.4: Mean reaction times to synchronized Flanker items as a function of synchronized and n-1 Flanker congruency and Sentence congruency	126
Figure 4.2.5: Mean reaction time difference between incongruent and congruent synchronized Flanker items as a function of sentence Type and n-1 Flanker Congruency	127
Figure 4.2.S1: Reaction times to Flanker items as a function of Flanker congruency and sentence type	133
Figure 4.3.1 : Tâches utilisées pour l'évaluation du Contrôle Cognitif (session 1). 146	
Figure 4.3.2 : Paradigme expérimental adapté de Hsu et Novick (2016) afin d'évaluer l'engagement du CC lors de la révision syntaxique en temps réel	148
Figure 4.3.4 : Probabilité de regard sur l'image incorrecte et correcte au cours du temps en fonction de l'ambiguïté de la phrase et du type d'essai Stroop réalisé précédemment.....	157
Figure 4.3.5 : Proportion de fixation sur l'image correcte en fonction de l'ambiguïté et du type d'essai Stroop <i>n-1</i>	158

Figure 4.3.S1 : Corrélation entre le facteur général G1 et l'indice de coût de congruence durant la tâche de langage	164
Figure 4.3.S2 : Corrélation entre le facteur général G2 et l'indice de coût d'ambiguïté sur la proportion de regard sur l'image correcte	164
Figure 4.4.1: Typical trial of the sentence-picture verification task.	175
Figure 4.4.2: Experimental design of the four cognitive control tasks used in the cognitive control session.....	178
Figure 4.4.3: Results from the sentence-picture verification task in terms of accuracy (percent of correct responses) and reaction times (in milliseconds) showing the effect of sentence type (Affirmative and Negative sentences) and sentence structure (Active and Passive sentences).....	182
Figure 4.4.4: Results from the sentence-picture verification task in terms of accuracy (percent of correct responses) and reaction times (in milliseconds) showing the effect of Congruency (Congruent and Incongruent conditions) as a function of both sentence structure and sentence type (i.e., each sentence condition crossing)	184
Figure 4.4.5: Correlation between cognitive control tasks and each condition crossing for the sentence-picture verification task	185
Figure 4.4.6 : Résultats préliminaires chez un patient pour la tâche de vérification d'images	190
Figure 5.5.1: Anatomical coverage for the P1-P11 in the left hemisphere. A total of 1182 cortical sites were included.....	203
Figure 5.5.2: Trial examples for each of the four experimental conditions according to the semantic and syntactic information manipulation (Sentences, Word lists, jabberwocky and pseudoword lists). Items in the present study was adapted from Pallier et al. (2011)	204
Figure 5.5.3: Spatial distribution of each of the region of interest including: the specific number of cortical sites / the number of patients	206
Figure 5.5.4: Semantic effect in each of the IFG ROI for each of the frequency band evaluated.....	208
Figure 5.5.5: Semantic effect in each of the temporo-parietal ROI for each of the frequency band explored	210
Figure 5.5.6: Syntactic effect in each of the IFG ROI for each of the frequency band explored.....	211

Figure 5.5.7: Syntactic effect in each of the temporo-parietal ROI for each of the frequency band explored	213
Figure 5.5.S1: Z-Score amplitude responses for each language condition and each frequency band assessed in the temporal pole and Post STG	217
Figure 5.6.1: Anatomical coverage for the P1-P15 in the left hemisphere. A total of 1257 cortical sites were included	226
Figure 5.6.2: ROIs evaluated in the left inferior frontal gyrus (LIFG) including: the pars orbitalis (in green) the pars triangularis (in red) and the pars opercularis (in bleu) .	231
Figure 5.7.1 : Représentations spatiales des réseaux spécifiques pour chaque condition de stimuli auditif évaluées	238
Figure 5.7.2 : Sites corticaux de chacun des réseaux spécifiques et leur réponse en lien avec les modulations attentionnelles lors d’une tâche verbale (AV en violet), d’une tâche non verbale (ANV en bleu) ou des deux (AVNV en noir)	239
Figure 5.7.3 : Décours temporel de l’activité de haute fréquence pour les sites corticaux du réseau sélectif au langage natif pour les tâches attentionnelles verbales (AV) et non-verbales (ANV). Trois sites corticaux différents sont présentés	240
Figure 6.1 : Représentation schématique de l’effet observé dans l’Etude 2 (en vert) ainsi que des effets hypothétiques en fonction de la manipulation de la synchronisation de l’apparition des essais Flanker pendant la tâche	253
Figure A1 : Exemple de l’activité en haute fréquence gamma pour les quatre types de stimuli présentés dans l’étude 5 (phrases, en vert, jabberwockys en rouge, listes des mots en jaune et listes de pseudomots en violet)	261
Figure A2.1: Experimental design used in the AREAD task	266
Figure A2.2: Experimental design used in the VISE task	267

Table des Tableaux

Table 4.2.1: Example of the four experimental conditions with a similar homophone presentation (the homophone word is in bold and underlined in the sentence)..... 118

Table 5.1.1: Demographic and clinical information of patients included in the study 202

Table 5.6.1: Demographic and clinical information of patients included in the study 225

Table 5.6.S1: MNI coordinates of each cortical site included for each of the three frontal ROIs 234

Préambule

Le langage a longtemps été considéré comme étant un module indépendant du reste de la cognition. Il a ainsi longtemps été étudié isolément de tout autre processus cognitif. En effet, le « module » du langage a été considéré, pendant longtemps, comme nécessaire et suffisant pour le traitement du langage. Cette vision modulaire des mécanismes langagiers se voit aujourd'hui reculer face aux arguments montrant des interactions fonctionnelles des processus de traitement du langage avec d'autres mécanismes non-langagiers tels que les processus de contrôle cognitif. Dans ce manuscrit, nous nous intéresserons plus particulièrement à cette interaction des mécanismes de compréhension du langage oral avec ceux de contrôle cognitif. Nous nous intéresserons également aux mécanismes cérébraux sous-tendant les traitements sémantiques et syntaxiques lors de la compréhension du langage et à l'interaction de ces mécanismes avec ceux de contrôle cognitif. Les processus de contrôle cognitif sont connus pour apparaître dès lors qu'un but est poursuivi. Or, bien qu'il nous arrive de comprendre du langage sans réel objectif, la plupart du temps l'écoute de la parole et l'engagement d'une compréhension sont accompagnés d'un objectif, interne ou externe (e.g., tenir une conversation, réflexion issue de l'écoute, apprentissage, réalisation d'une instruction, prise d'une décision). De ce fait, l'étude de cette interaction entre les mécanismes de traitement du langage et ceux de contrôle cognitif serait essentielle afin d'appréhender au mieux les processus de compréhension. Ainsi, dans ce manuscrit nous faisons l'hypothèse que la machinerie cognitive et neurale à l'œuvre pour aboutir à la compréhension du langage oral implique l'action conjointe de systèmes cognitifs et de réseaux neuronaux non seulement spécialisés dans le traitement de la parole et du langage, mais également des processus plus généraux et notamment exécutifs.

L'objectif de ce travail était donc d'évaluer les liens possibles entre la compréhension du langage et le contrôle cognitif d'un point de vue des mécanismes cognitifs et neuraux. Pour ce faire, nous avons réalisé des études avec une approche expérimentale comportementale et neurale en électroencéphalographie.

Ce manuscrit est divisé en deux grandes sections : une section théorique et une section expérimentale. La section théorique comporte trois chapitres. Le *Chapitre 1*

est une revue de la littérature de différents modèles de la compréhension du langage. Il permet de dresser un aperçu des différentes visions des mécanismes de compréhension du langage et leurs implications ainsi que de mettre en avant l'approche théorique dans lequel notre travail se situe. Le *Chapitre 2*, quant à lui, décrit les mécanismes à l'œuvre dans la compréhension qui reflètent son fonctionnement. Nous nous intéresserons ainsi aux processus qui permettent de rendre compte de la rapidité, de l'efficacité du traitement du langage oral, et qui ont fait émerger dans la littérature la conception d'automatisme de la compréhension du langage. Le *Chapitre 3* présente brièvement le contrôle cognitif avant de dresser un état de l'art des travaux portant sur l'interaction entre les mécanismes de compréhension du langage et ceux de contrôle cognitif.

La section expérimentale est divisée en deux chapitres rapportant les travaux expérimentaux réalisés au cours de ce travail de thèse. Dans le premier chapitre (*Chapitre 4*) nous présenterons quatre études dans lesquelles nous avons proposé des protocoles expérimentaux permettant d'évaluer le lien entre la compréhension du langage oral et le contrôle cognitif de manière directe (protocoles d'essais entrelacés, ou double tâches) et indirecte (études corrélationnelles). En effet, à l'heure actuelle, il existe très peu de protocoles expérimentaux qui permettent l'évaluation de cette interaction. De ce fait, une grande partie de ce travail de thèse a été consacrée au design et à l'évaluation de ce type de protocole. De plus, il faut également souligner la volonté dans ce travail d'utiliser des protocoles qui permettraient de se rapprocher des situations de compréhension de la parole écologiques (e.g., manipulation de la parole dans la parole, absence d'utilisation de protocoles de violation). De plus, nous avons manipulé des facteurs linguistiques et psycholinguistiques nous permettant d'approfondir leurs effets dans la compréhension de phrases. Ainsi, nous avons proposé deux protocoles dans lesquels nous avons manipulé l'ambiguïté lexicale par le biais de l'utilisation d'homophones (*Etude 1* et *Etude 2*) ainsi que la manipulation des paramètres syntaxiques avec des ambiguïtés transitoires (*Etude 3*) et l'utilisation des phrases canoniques et non-canoniques (*Etude 4*). Ces protocoles nous ont également permis, de par leur design, d'évaluer non seulement l'impact du contrôle cognitif dans la compréhension mais également l'impact du degré de complexité de la compréhension du langage sur le contrôle cognitif. Cela nous a permis ainsi d'évaluer le possible lien bidirectionnel entre les deux systèmes.

Le *Chapitre 5* présentera les études en lien avec les bases neurales de la compréhension du langage et abordera également les liens avec le contrôle cognitif. Nous présenterons ici trois études en électroencéphalographie intracrânienne. Tout d'abord, nous avons évalué l'impact des informations sémantiques et syntaxiques lors de la compréhension du langage oral (phrases auditives, Etude 5) avec un protocole orthogonal fréquemment utilisé en neuroimagerie hémodynamique (IRMf et PET). Par la suite, nous avons exploré les modulations oscillatoires au niveau d'une région clef du traitement du langage oral, le gyrus frontal inférieur (GFI) (Etude 6). Nous avons ainsi pu évaluer comment le traitement d'un message ayant un sens se distingue d'un message n'ayant pas de sens en termes d'activité oscillatoire sur différentes bandes de fréquences au niveau du GFI. Ensuite, nous avons évalué le lien entre les mécanismes de contrôle attentionnel et l'écoute de phrases (Etude 7). Cela nous a permis d'évaluer comment le réseau neural spécialisé dans le traitement du langage oral est modulé par le contrôle cognitif, et notamment le contrôle attentionnel. Enfin, le *Chapitre 6* constitue une discussion générale des résultats observés ainsi que des perspectives liées aux différents travaux menés.

SECTION THEORIQUE

1

Chapitre 1 : Compréhension du langage

Dans ce manuscrit, il est important de noter que nous faisons la différence entre perception de la parole et compréhension du langage oral. En effet, la compréhension du langage implique, en plus des mécanismes de décodage et de perception de la parole, des mécanismes de traitement et d'unification des informations linguistiques (tels que la syntaxe et la sémantique) nécessaires à l'extraction du message véhiculé par la parole. De plus, nous concevons la compréhension comme impliquant des mécanismes plus généraux, et donc ne se limitant pas qu'à des processus purement linguistiques.

1. Fondements de l'étude de la compréhension du langage

Avant de présenter les différents modèles neurocognitifs actuels de la compréhension du langage, il est important de discuter les différentes théories fondatrices que conditionnent la conceptualisation du langage. La conceptualisation fait par chacune d'entre elles va conditionner non seulement la manière de concevoir le langage d'un point de vue cognitif mais également la manière dont elle est évaluée et étudiée.

1.1 Approche générativiste

L'approche générativiste de l'étude du langage a marqué un grand bouleversement dans la conceptualisation et l'étude du langage, dominée à l'époque par la vision du behaviorisme. Cette approche a été proposée dans les années 1950 par Noam Chomsky et est fondée sur les concepts de « grammaire générative » et de « grammaire universelle ». Chomsky (1957) propose une approche cognitive de l'étude du langage basée sur l'esprit et non pas sur le comportement. Il introduit la notion de *grammaire générative* selon laquelle la grammaire est un système comportant et suivant un ensemble de règles qui permet une linguistique créative (i.e. reflétant la capacité de générer et de comprendre des phrases nouvelles et jamais entendues ou lues auparavant). Cette notion de grammaire générative fait également référence au caractère infini du langage décrivant la possibilité de générer un nombre infini de phrases grammaticales à partir d'un nombre fini d'éléments. Chomsky complète ses propos en proposant également que tout être humain serait doté dès la naissance (i.e., de manière innée) d'une *grammaire universelle*. Cette grammaire universelle représenterait les fondements de ce qui nous permet d'acquérir nos connaissances linguistiques. Elle correspondrait à un ensemble de règles de grammaire qui nous permettrait de comprendre les phrases, et ce quel que soit le langage. Chomsky soutient cette théorie d'une grammaire universelle et notamment son aspect inné avec l'argument qu'il nomme « la pauvreté du stimulus ». Selon lui, un enfant serait exposé à trop peu de langage pour pouvoir apprendre la grammaire de la langue dans toute sa complexité sans aucun sens inné du langage. Ainsi, un sens inné de la grammaire prédisposerait les enfants à l'acquisition des règles de grammaire et de la linguistique de manière générale.

Cette vision innée du langage et d'une grammaire universelle va ainsi donner lieu à un ensemble de modèles du traitement et de la compréhension du langage centrés sur la syntaxe (i.e., modèles dits *Syntax-first*). On retrouvera notamment parmi ces modèles le modèle de la compréhension du langage d'Angela Friederici (2017) qui s'appuie sur des recherches neurocognitives et propose un modèle sériel avec comme traitement fondamental le traitement syntaxique. Nous reviendrons plus en détail sur ce modèle plus tard dans ce chapitre.

1.1.1 Approche fonctionnelle

En réaction à cette vision innée, sérielle et syntaxo-centrée du traitement du langage, certains chercheurs ont proposé une approche basée sur la psychologie expérimentale et donnant une importance à l'information sémantique lors du traitement du langage (Bever, 1970). Slobin (1966) a notamment montré qu'une phrase passive n'était pas plus difficile qu'une phrase active lorsque celle-ci comportait une seule relation sémantique possible suggérant une influence directe de l'information sémantique durant le traitement langagier. Alors que l'approche générative et formelle s'axe principalement sur la structure du langage, l'approche fonctionnelle met en avant la fonction de communication du langage (voir les travaux de Simon C. Dik et d'André Martinet). Selon cette dernière approche, le langage sert à transmettre une information et la compréhension de l'information va dépendre de la situation et des connaissances du monde de la personne qui comprend le message en train d'être transmis. D'un point de vue développemental cette approche s'oppose à la grammaire universelle et innée en ce que l'acquisition du langage se ferait à travers les interactions sociales et l'expérience de langage. On retrouve notamment la théorie basée sur l'usage (Tomasello, 2003) selon laquelle la structure du langage chez l'enfant émerge de l'utilisation et de l'expérience que ce dernier a du langage. Cette conception du langage comme un moyen de communiquer et de transmettre une information pousse à essayer de comprendre quelles sont les informations linguistiques et non-linguistiques traitées lors de la compréhension du langage. En effet, on se rend rapidement compte que, dans une conversation, prendre en compte le contexte, les connaissances sémantiques et générales du monde seront autant d'informations pertinentes qui s'ajoutent aux informations linguistiques traitées afin de donner du sens au message traité. Dans la partie suivante, nous nous intéresserons aux différentes informations traitées lors de la compréhension du langage et aux différents modèles de la compréhension du langage.

2. Informations traitées lors de la compréhension du langage

2.1 Informations syntaxiques et les modèles dits *Syntax-First*

2.1.1 Les premiers modèles *Syntax-First*

Un certain nombre de modèles considèrent l'information syntaxique comme étant la base de la compréhension du langage. Selon ces modèles, l'information syntaxique serait traitée en premier sans quoi la compréhension ne serait possible. On retrouve parmi ces modèles, le modèle dit « Garden-Path » (Frazier, 1987; Frazier & Rayner, 1982) et le modèle « Sausage-Machine » (Frazier & Fodor, 1978) selon lesquels chaque fois que l'on rencontre un mot, celui-ci serait associé à une sous-structure en fonction de sa catégorie grammaticale (première étape). Cette élaboration de la structure serait régie par deux principes : 1) Attachement minimal (MA) – il ne faut pas ajouter de nouveau nœud structurel à une structure si ce n'est pas nécessaire 2) Clôture tardive – tant qu'il est possible il faut rattacher le nouveau mot à la structure en cours d'élaboration. Dans un second temps (deuxième étape), les différentes sous-structures seraient combinées afin de créer un tout cohérent, la phrase. Selon cette approche, c'est seulement si la structure ne peut intégrer un nouveau mot entrant, que la structure est ré-analysée dans son ensemble (manifestant ainsi l'aspect sériel de ces modèles). Cette vision du traitement du langage vient de l'étude d'ambiguïtés lexicales et syntaxiques locales ou temporaires apparaissant dans le langage. En effet, Frazier et Rayner (1987) ont notamment montré que la révision de l'interprétation d'un mot ambigu dans une phrase était réalisée uniquement lorsqu'un nouveau mot ne pouvait pas être intégré à la structure syntaxique construite et menant ainsi à des temps de lecture plus long. Ce type d'effet est appelé l'effet « garden-path » (de « down the garden-path » en français « se faire berner ») et fait référence aux situations dans lesquelles l'interprétation d'une portion de phrase est réalisée d'une certaine manière qui s'avère ensuite erronée à l'apparition d'un nouveau mot. Ceci nécessiterait une réinterprétation de l'ensemble de la phrase (e.g., Local people are concerned that the theater shows ... lots of expensive productions. / are very expensive productions). Selon le modèle de Frazier, cet effet serait dû à un traitement syntaxique incorrect suite à l'application du principe de clôture tardive (Ferreira & Clifton Jr., 1986; Frazier, 1987; Frazier & Rayner, 1982; Rayner et al., 1983).

2.1.2 Modèle de traitement des phrases auditives d'Angela Friederici

Le modèle de Friederici (2002, 2011, 2017) fait partie des modèles dits « *syntax-first* » bien que ses révisions le dirigent vers une approche à la fois sérielle et partiellement parallèle du traitement du langage. En effet, dans son modèle, Friederici postule que l'information syntaxique serait traitée avant l'information sémantique. Son modèle se base principalement sur des données d'électroencéphalographie et met en avant différentes phases du traitement de l'information linguistique. Selon l'auteur, l'accès au sens d'une phrase se déroulerait en trois phases. Dans un premier temps, la structure syntaxique initiale serait construite à partir des informations relevant de la catégorie lexicale (100-300ms). Ensuite, les processus de traitement lexico-sémantiques et morphosyntaxiques entreraient en jeu. C'est lors de cette phase que l'attribution des rôles thématiques débiterait (300-500ms). Enfin, les différentes informations seraient intégrées en un ensemble ayant un sens (500-1000ms), c'est l'interprétation (voir Figure 1A pour une représentation schématique des étapes de traitement et Figure 1B pour les aires cérébrales associées aux différents traitements). Ainsi, l'interaction entre les informations syntaxiques, sémantiques et contextuelles aurait lieu uniquement lors des deux dernières phases de traitement.

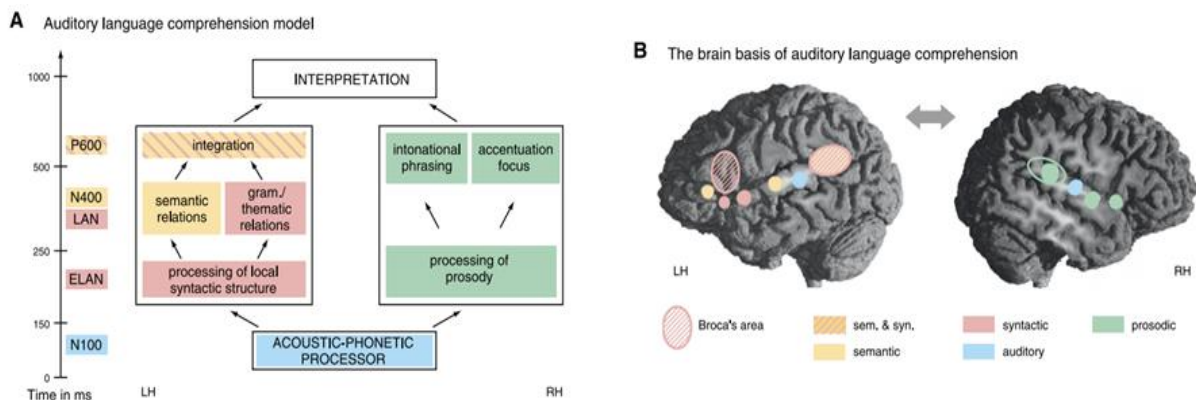


Figure 1.1 : Schéma descriptif des étapes de traitement du langage oral (A) et des régions impliquées lors de la compréhension du langage selon le modèle de Friederici

La première phase correspond à l'accès à l'information relative à la catégorie lexicale traitée (e.g., verbe, adjectif, nom) permettant un traitement initial de la structure syntaxique locale. Dans ce modèle, cette phase précède le traitement syntaxique, sémantique et thématique, car l'information de catégorie lexicale est nécessaire à la construction de la structure d'une phrase. Cette information renseigne sur la structure à venir, mais également sur son début ou sa fin (i.e., un mot peut

renseigner sur ce qui doit suivre, e.g. en français après un verbe nous rencontrons un complément) et permet de faciliter le regroupement ultérieur des informations syntaxiques, sémantiques et contextuelles. Les principaux arguments en faveur de ce postulat proviennent d'études électrophysiologiques. En effet, les études portant sur le marqueur ELAN supportent l'idée selon laquelle la compréhension du langage débiterait par un traitement syntaxique de l'information de catégorie lexicale. Ce marqueur apparaît très tôt (125-200ms) suite à une violation syntaxique (Friederici et al., 1993; Neville et al., 1991), allant ainsi dans le sens d'une première phase de traitement syntaxique spécifiquement impliqué dans le traitement de la catégorie lexicale (Friederici & Weissenborn, 2007). Étant donné l'aspect sériel du modèle, Friederici propose qu'une violation de la catégorie lexicale doive empêcher les traitements syntaxiques (plus globaux) et sémantiques ultérieures. Dans ce sens, Hahne et Friederici (2002) ont observé l'apparition de la composante ELAN lors de l'écoute de phrases contenant une violation de catégorie lexicale, mais également lorsque ce type de violation lexicale était présenté conjointement à une violation sémantique. Ainsi, dans cette seconde condition, uniquement un marqueur physiologique du traitement de la structure syntaxique (ELAN) était observé (sans marqueur physiologique du traitement sémantique, e.g., la N400, voir ci-après). Les auteurs proposent que ce résultat est le reflet d'un traitement sériel avec une impossibilité dans la construction de la structure syntaxique locale initiale qui entrave l'accès à l'information sémantique portée par la phrase (voir également Friederici et al., 2004; Frisch et al., 2004). Cependant, cette composante ELAN, qui est un des arguments majeurs de ce modèle et de sa caractéristique "syntax-first" a été remise en question¹ (Lau et al., 2006; Steinhauer & Drury, 2012).

Cette première phase de traitement des informations de catégorie lexicale serait principalement en lien avec une implication des régions antérieures du gyrus temporal supérieur gauche (GTSa) et de l'opercule frontal gauche. En effet, dans une première étude de neuroimagerie (Friederici et al., 2006) les auteurs ont observé, lors d'un

¹ Steinhauer & Drury (2012) passent en revue plusieurs critiques concernant la réalité de cette composante et notamment le contexte restreint dans lequel elle est observée (voir aussi Lau et al., 2006). Leur première critique est la méthodologie : souvent mise en évidence par violation syntaxique. En effet, la plupart des études observant cette composante en utilisant des violations syntaxiques flagrantes dans des paradigmes manipulant le contexte (et non pas dans des paradigmes de manipulation de cible). L'ELAN est observée dans des paradigmes où la cible reste constante et où uniquement le contexte change. Ces auteurs (voir aussi Lau et al., 2006) proposent que cette composante est le reflet des processus top-down en lien avec des attentes contextuelles plutôt que le reflet d'un traitement bottom-up lié à la classe grammaticale des mots.

paradigme d'apprentissage d'une grammaire artificielle, un recrutement de ces régions lorsqu'une suite de syllabes ne respectait pas les règles grammaticales apprises deux jours auparavant. Dans une autre étude, cette fois utilisant des stimuli naturels, Friederici, Rüschemeyer, Hahne et Fiebach (2003) ont également observé une activation de la portion antérieure du GTS et de l'opercule frontal lors de l'écoute de phrases syntaxiquement incorrectes (voir également Vandenberghe et al., 2002) pour une étude montrant une activation de l'opercule frontal en présentation visuelle d'éléments grammaticaux complexes). Ainsi, ces deux régions seraient impliquées lors de la première phase de traitement syntaxique précoce dans la compréhension du langage.

La deuxième phase correspond à une phase de traitement à la fois des informations syntaxiques et sémantiques. En effet, lors de cette phase, les informations lexico-sémantiques, morphosyntaxiques et contextuelles sont intégrées dans la structure en cours de construction afin de permettre l'affectation des rôles thématiques dans la phrase (c'est-à-dire définir *qui fait quoi, à qui*). Cette intégration des différents types d'informations se reflète à travers différents marqueurs électrophysiologiques et implique différentes régions cérébrales. Le traitement de l'information sémantique, serait reflété par la composante N400² qui est observée lors de l'apparition d'un mot incongruent avec le contexte sémantique. En ce qui concerne le traitement de l'information syntaxique au cours de cette phase, il serait reflété par une onde antérieure négative (LAN) située au niveau de l'hémisphère gauche. Ce marqueur a initialement été observé par Münte, Heinze et Mangun (1993) dans une étude lors de laquelle les participants lisaient des paires de mots présentés un à un, les mots pouvant être reliés sémantiquement, syntaxiquement ou non reliés. Ainsi, les auteurs ont observé une onde N400 lors de la lecture de mots sémantiquement non reliés et une onde négative latéralisée à gauche entre 300-600ms après l'attaque du second mot syntaxiquement non relié (LAN). De manière similaire, Rösler et collaborateurs (1998) ont observé une LAN lors de la lecture de phrases non-canoniques, c'est-à-dire des phrases correctes grammaticalement mais dont l'ordre des mots est peu habituel, induisant une complexité syntaxique plus importante (voir

² La N400 correspond à une onde négative donnant lieu à un pic d'amplitude négatif centro-pariétal environ 400ms après l'apparition d'un mot déviant de son contexte sémantique (Bentin et al., 1995; Kutas & Hillyard, 1980; Kutas & Van Petten, 1988; McCallum et al., 1984).

également Matzke et al., 2002 pour une étude similaire). Ainsi, la composante LAN serait le reflet du traitement morphosyntaxique sous-tendant l'affectation des rôles grammaticaux dans une phrase qui aurait donc lieu en même temps que le traitement lexico-sémantique.

Cette deuxième phase impliquerait différentes régions cérébrales reflétant l'intégration des différents types d'informations traitées. En effet, un certain nombre d'études en IRMf ont montré une implication de la portion postérieure du GTS gauche et du sulcus temporal supérieur (STS) lors du traitement de l'information syntaxique (Friederici et al., 2009; Humphries et al., 2006; Kinno et al., 2008). Ces régions (avec le gyrus temporal moyen –GTM–, et le gyrus temporal inférieur –GTI–) semblent également recrutées lors d'ambiguïtés sémantiques (Rodd et al., 2005). Ainsi, ces études suggèrent que le GTS postérieur et le STS gauche seraient impliqués dans l'intégration des informations syntaxiques et sémantiques. D'autres études ont montré que la portion antérieure du lobe temporal était principalement impliquée lors du traitement d'un matériel langagier comportant une composante syntaxique mais pas pour un matériel dépourvu de syntaxe. Par exemple, Mazoyer et collaborateurs (1993) ont observé une activation du lobe temporal antérieur lors de l'écoute de phrases correctes, de phrases comportant une anomalie sémantique et de phrases comportant une structure syntaxique correcte mais sans sémantique (mots de contenu remplacés par des pseudo-mots, également appelés *Jabberwockys*), mais aucune activation du lobe temporal antérieur lors de l'écoute de suite de mots (aucune syntaxe mais de la sémantique) suggérant une implication du lobe temporal antérieur dans le traitement syntaxique (voir également Friederici et al., 2000; Humphries et al., 2006). Cependant, dans une étude utilisant un paradigme d'attention sélective, Rogalsky et Hickok (2009) ont montré que la portion antérieure du lobe temporal était également impliquée lors du traitement sémantique. Cette implication de la portion antérieure moyenne et supérieure du lobe temporal lors du traitement syntaxique et sémantique a également été observée dans une méta-analyse de Visser, Jefferies, et Lambon Ralph (2010). Il semblerait donc que le lobe temporal antérieur moyen et supérieur soit impliqué à la fois dans le traitement syntaxique et sémantique reflétant possiblement l'intégration de deux types d'informations. De plus, une implication sélective au niveau du gyrus frontal inférieur -GFI- gauche a été observé lors de cette phase. En effet, d'après cette auteure, le GFI au niveau de l'aire de Brodmann 44 (BA 44) serait impliqué dans le

traitement de la structure syntaxique tandis que l'aire BA 44/45 serait associée au traitement du rôle thématique dans la phrase et l'aire BA 45/47 aux processus sémantiques (Friederici, 2002; voir Rogalsky & Hickok, 2011 pour une revue). Cette « dissociation » de l'implication du GFI dans le traitement de différentes informations linguistiques (sémantiques et syntaxiques) est néanmoins débattue dans la littérature (voir Caplan, 2001; Embick et al., 2000; Friederici, 2004; Hagoort, 2005, 2013; Novick et al., 2005, 2010; Tettamanti et al., 2002; Tettamanti & Weniger, 2006; Thompson-Schill et al., 1997).

La troisième phase de traitement des phrases proposée par Friederici, correspond à l'intégration de l'ensemble des informations et à l'interprétation de la phrase au regard de ces informations. Durant cette phase, une ré-analyse syntaxique et une révision si nécessaire aurait lieu. Ces processus se reflètent à travers la composante P600 connue pour apparaître tardivement après une anomalie ou violation syntaxique (Hagoort et al., 1993; Osterhout & Holcomb, 1992). Les premières études portant sur la P600 suggèrent que cette composante serait le reflet d'un traitement uniquement syntaxique. Cependant, des études telles que celle de Kuperberg et al. (2007) et celle de Kolk, Chwilla, van Herten et Oor (2003) ont montré la présence d'une onde P600 lors d'anomalie sémantiques. De plus, certaines études ont observé la présence d'une P600 à la fois lors de violations syntaxiques et lors de violations sémantiques et thématiques (Gunter et al., 2000; Kuperberg et al., 2006) suggérant ainsi que la P600 reflèterait l'intégration des informations syntaxiques, sémantiques et thématiques plutôt qu'un traitement syntaxique uniquement. Au niveau cérébral, il semblerait que la P600 se localise au niveau du GTM et de la portion postérieure du cortex temporal (Service et al., 2007). De plus, des études sur des patients comportant une lésion des ganglions de la base montrent une réduction de l'amplitude de la P600 induite suite à la présentation de phrases syntaxiquement incorrectes (Friederici et al., 1999; Kotz et al., 2003). Ces résultats suggèrent une implication des ganglions de la base dans les processus d'intégration et d'interprétation de l'ensemble des informations.

Aparté : Rôle de la prosodie dans la compréhension du langage

Dans son modèle, Friederici intègre une autre composante jouant un rôle dans la compréhension du langage oral : la prosodie. En effet, la prosodie fait référence aux informations (phonologiques) suprasegmentales. On retrouve dans la parole des informations prosodiques d'ordre émotionnel (indices informant sur l'état émotionnel de la personne locutrice ou sur l'aspect émotionnel du contenu communiqué) et d'ordre linguistique (indices sur le traitement même de la phrase). En ce qui concerne la prosodie linguistique, elle permettrait de faciliter le traitement syntaxique en ce qu'elle apporte une information à propos de la délimitation des syntagmes d'une phrase via notamment les frontières prosodiques et permettrait également de pallier à certaines ambiguïtés syntaxiques (Perrone-Bertolotti et al., 2013; Price et al., 1991 voir Cutler et al., 1997 pour une revue). Des études en électrophysiologies ont montré l'apparition d'une onde positive centro-pariétale (appelée « clousure positive shift », CPS) synchronisée temporellement à chaque frontière prosodique d'une phrase (Bögels et al., 2010; Itzhak et al., 2010; Steinhauer et al., 1999). Au niveau cérébral, des études de neuro-imagerie ont montré une augmentation de l'activité cérébrale dans l'hémisphère droit et plus particulièrement dans le cortex supérieur temporal et dans le cortex fronto-operculaire droit lors du traitement des hauteurs dans des phrases (M. Meyer et al., 2002, 2004). Cependant, cette implication de l'hémisphère droit lors du traitement de la prosodie serait variable selon le type de tâche demandé (Plante et al., 2002). De plus, dans une étude comportementale, Marslen-Wilson et collaborateurs (1992) ont montré que la prosodie permettait de faciliter la résolution d'une ambiguïté, au même titre qu'une conjonction de coordination délimitant les différents syntagmes d'une phrase. Il semblerait donc que la prosodie et le traitement syntaxique interagissent. La question qui émerge est donc la suivante : Quand est-ce que la prosodie interagit avec le traitement syntaxique ? En manipulant des phrases auditivement afin de créer des violations syntaxiques, des violations prosodiques ainsi que des violations syntaxiques et prosodiques à la fois, Eckstein et Friederici (2006) ont montré qu'une violation à la fois syntaxique et prosodique induisent une onde ELAN allant dans le sens d'une influence précoce de la prosodie dans les processus de compréhension du langage et donc ici durant le traitement de la catégorie lexicale. De plus, une violation prosodique uniquement induit une onde tardive P600 suggérant que la prosodie influence également plus tardivement les processus de compréhension du langage et plus particulièrement lors de l'intégration des informations syntaxiques et sémantiques (voir également Steinhauer et al., 1999 pour un effet de la prosodie sur les processus tardifs de compréhension du langage).

Le modèle de Friederici, qui s'inscrit dans la lignée des modèles dit syntax-first, est un modèle très complet décrivant précisément les différentes étapes par lesquelles le matériel langagier est traité lors de la compréhension du langage. Dans ce modèle, le traitement structurel et des informations syntaxiques des phrases est à la base de la compréhension. Ce postulat est une hypothèse forte qui n'est pas partagée par l'ensemble de la communauté scientifique s'intéressant à la compréhension du langage.

2.2 Informations sémantiques linguistique et non-linguistiques : vers des modèles interactifs

2.2.1 Traitement précoce des informations sémantiques linguistiques

Les études portant sur le marqueur ELAN apparaissant 125-200ms après une violation syntaxique suggèrent un traitement syntaxique précoce (Friederici et al., 1993; Neville et al., 1991). Ce marqueur a ainsi été considéré comme un argument en faveur d'une primauté de traitement de l'information syntaxique lors de la compréhension de phrases. Cependant, certaines études ont également montré un traitement sémantique précoce (Hinojosa et al., 2004; Martin-Loeches et al., 2001). Dans ces études les auteurs s'intéressent au potentiel de reconnaissance (*recognition potential*, RP, en anglais) qui reflète le traitement sémantique d'images ou de mots. En effet, en demandant à des participants de catégoriser un mot présenté à l'écran, les auteurs ont pu observer un RP environ 225ms après l'apparition du mot lorsque la tâche nécessitait un traitement sémantique mais également lorsqu'elle nécessitait uniquement un traitement physique du stimulus (Hinojosa et al., 2004). Ceci suggérerait un traitement du sens des mots dès les premiers instants.

Un point important de la compréhension du langage est que nous ne comprenons que rarement des mots isolément. Les mots que nous comprenons sont inclus dans des phrases portant un sens général et une information. Ainsi, lorsque nous comprenons une phrase nous construisons au fur et à mesure son sens de par l'aspect incrémentiel du langage. De cette manière les informations déjà traitées durant le début d'une phrase vont avoir une influence sur le traitement du reste de la phrase. Ce postulat suppose un traitement en parallèle des informations sémantiques et syntaxiques. Dans une étude récente, Broderick, Anderson, et Lalor (2019) se sont ainsi intéressés à l'influence du contexte sur le traitement et l'encodage du signal de parole. Pour cela ils ont demandé à des participants d'écouter des extraits d'audio-books tout en enregistrant leur activité cérébrale à l'aide d'un EEG. En évaluant la similarité des mots à leur contexte sémantique, les chercheurs ont montré que plus le mot était relié au contexte meilleur était la reconstruction de son enveloppe à partir du signal EEG. Cette inclusion du contexte dans le traitement et la compréhension du langage est au cœur de certains modèles dont notamment le modèle *Good-Enough* proposé par Fernanda Ferreira.

2.2.2 Modèle *Good-Enough* de Fernanda Ferreira

Le modèle *Good-Enough* proposé par Ferreira et collaborateurs (Ferreira, 2003; Ferreira et al., 2002; Ferreira & Patson, 2007) s'inscrit dans une approche parallèle en ce qu'il suggère une influence des informations provenant du contexte et des connaissances lors de l'interprétation de phrases et donc une intégration précoce de ces informations. Plus spécifiquement, Ferreira et collaborateurs postulent que l'objectif de la compréhension du langage est d'élaborer une représentation adaptée à la demande de la tâche en cours et non d'obtenir une représentation précise et détaillée de ce que dit le locuteur. Par exemple, dans le cadre d'une conversation, l'objectif serait alors d'élaborer des représentations de ce que le locuteur dit afin de dialoguer et interagir. Selon les auteurs le système syntaxique permettrait d'établir les relations "*qui fait quoi à qui*" mais lorsque les phrases traitées sont complexes, ce système ne serait pas suffisant et aurait besoin d'être renforcé. Pour arriver à une représentation suffisamment stable, les auteurs proposent que nous traitions et interprétons les phrases en fonction de nos connaissances et du contexte actuel. Ainsi, dans des situations où la phrase est syntaxiquement complexe et que le résultat du traitement syntaxique (qui fait quoi à qui) n'est pas renforcé par les connaissances ou le contexte, une interprétation du type « good-enough » (i.e., suffisante) serait effectuée permettant une interprétation globale (heuristique). Pour appuyer ces propos, les auteurs ont notamment montré que lors du traitement de phrases non-canoniques telles que "*Le chien a été mordu par l'homme*", des participants avaient tendance à interpréter cette phrase comme si l'homme avait été mordu par le chien, en se contentant d'une interprétation suffisante et cohérente avec leurs connaissances à propos des chiens qui mordent (Ferreira, 2003; Ferreira & Stacey, 2000). De plus, Ferreira et collaborateurs postulent que l'ambiguïté qui peut apparaître lors de la compréhension ne serait pas nécessairement résolue car il ne s'agit pas du but de la compréhension en situation écologique.

Cet accent mis sur l'objectif de la compréhension est particulièrement intéressant car c'est en fonction de cet objectif que les mécanismes de traitement du langage seraient adaptés. De plus, dans son modèle Ferreira propose une intégration et une prise en compte d'informations non-linguistiques pour la compréhension du langage dont nous allons maintenant discuter.

2.2.3 Traitement des informations non-linguistiques

Lorsque nous traitons un matériel langagier, ce dernier est quasiment toujours inclus dans un contexte et très souvent accompagné d'informations environnantes non-linguistiques (e.g., visuelles, auditives, connaissances du monde). Ces informations non-linguistiques vont venir influencer le traitement et la compréhension du langage. Par exemple, Hagoort, Hald, Bastiaansen, et Petersson (2004) ont observé une N400 lorsque des participants écoutaient des phrases correctes, mais dont le contenu déviait des connaissances du monde. Dans leur étude, les auteurs présentaient des phrases correctes (e.g., « Les trains allemands sont jaunes et bondés »), des phrases correctes comportant une violation des connaissances du monde (e.g., « Les trains allemands sont blancs et bondés ») et des phrases comportant une violation sémantique (e.g., « Les trains allemands sont aigres et bondés »). Les auteurs ont observé une N400 à la suite d'une violation sémantique mais également lorsque les phrases correctes comportaient une violation des connaissances du monde suggérant une intégration dès les premiers instants d'informations sémantiques non-linguistiques dans la compréhension du langage. De manière similaire, Van Berkum et collaborateurs (2008) ont observé une N400 lorsque le sens d'une phrase n'était pas cohérent avec la voix prononçant la phrase (e.g., "*je vais arrêter de fumer*" prononcé par un enfant). Ainsi, il semblerait que les informations concernant le locuteur extraites à partir des caractéristiques acoustiques de la voix du locuteur aient conduit à une incongruence sémantique concernant le message transmis et le locuteur. Cette influence des informations non-linguistiques sur le traitement langagier s'observe également à travers l'émotion et le ton de voix du locuteur. En effet, Kitayama et Howard (1994) ont notamment observé que lorsque des participants écoutaient des phrases comportant une information négative prononcées par une voix ayant un ton émotionnel négatif (i.e., valence congruente entre le message et le ton de voix) le traitement était facilité comparativement à lorsque la valence du message et du ton de voix était incongruente (voir également Nygaard & Lunders, 2002). Ainsi, les caractéristiques acoustiques de la voix et l'état émotionnel du locuteur ont une influence sur le traitement du langage de même que les connaissances que nous avons du monde.

Un autre élément entrant en compte lors de la compréhension du langage est la présence d'un contexte visuel. En effet, il a été montré que le contexte visuel

influençait le traitement du langage et notamment le traitement syntaxique (Tanenhaus et al., 1995). Dans leur étude, les auteurs présentaient à des participants des phrases syntaxiquement ambiguës ou non en même temps qu'un contexte visuel composé de quelques dessins illustrant des éléments décrits dans les phrases. Ils ont ainsi pu montrer que les participants prenaient en compte le contexte visuel dès les premiers instants du traitement de la phrase puisque lorsque le contexte comportait deux référents cela venait impacter le traitement syntaxique de la phrase. Plus récemment, Ferreira, Foucart et Engelhardt (2013) ont répliqué ce résultat et ont également montré que les participants avaient plus de difficultés à utiliser le contexte visuel lorsque ce dernier était plus complexe (i.e., comportait davantage d'images) (voir également Alaçam et al., 2019).

L'ensemble de ces études montrant une influence des informations sémantiques, du contexte, des connaissances du monde suggèrent un traitement en parallèle de ces informations avec les informations syntaxiques et remettent ainsi en question les modèles postulant une primauté de traitement de l'information syntaxique afin de pouvoir traiter l'information sémantique. Un modèle influent de la compréhension du langage postulant un traitement parallèle des différentes informations linguistiques est le modèle Mémoire, Unification, Contrôle (MUC) de Peter Hagoort.

2.3 Modèle MUC de Peter Hagoort

La différence la plus importante entre le modèle proposé par Hagoort (Hagoort, 2005, 2013) et celui proposé par Friederici, précédemment décrit, est que MUC propose une implication en parallèle et interactive des différentes informations linguistiques (et non linguistiques) lors de la compréhension. Le MUC donne également un poids important aux informations contextuelles non linguistiques telles que nos connaissances du monde et met en jeu des processus de contrôle tels que les processus attentionnels. De plus, MUC semble être un modèle large et qui pourrait être également appliqué à des processus de production de langage.

Dans MUC, on retrouve trois systèmes ou composantes principales, à savoir, la Mémoire, l'Unification et le Contrôle (MUC). La composante mémoire fait référence à l'ensemble des connaissances linguistiques (informations phonologiques, morphologiques, de structure syntaxiques) ainsi qu'à la manière dont ces informations sont récupérées. La composante d'unification fait référence aux processus permettant d'assembler les éléments stockés en mémoire dans de plus grandes structures. Cette unification des informations aurait lieu au niveau syntaxique mais également au niveau sémantique et phonologique. Enfin, la composante Contrôle quant à elle fait référence aux processus contrôlant le type de langage, de registre utilisé en fonction du contexte social, de l'action ainsi que l'attention allouée aux différentes informations langagières. L'auteur décrit les réseaux cérébraux impliqués lors des trois composantes décrites dans son modèle (Figure 2).

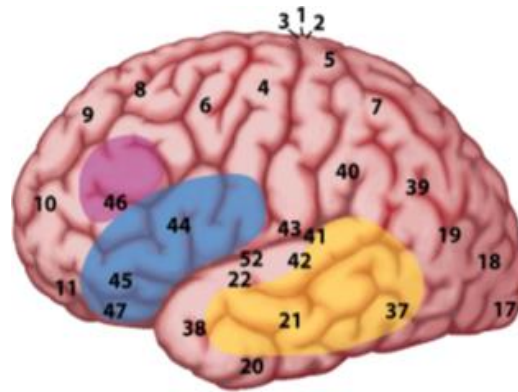


Figure 1.2 : Trois composantes du modèle MUC : Mémoire (en jaune), Unification (en bleu) et Control (en rose). Tiré de Hagoort (2013)

Note : le modèle implique également des régions du contrôle cognitif (cortex cingulaire antérieur) et attentionnel (cortex pariétal) qui ne sont pas représentées ici.

La composante de Mémoire serait soutenue par le cortex temporal et par le gyrus angulaire du cortex pariétal, ces régions permettraient de stocker les informations linguistiques. Le GFI (aire de Broca) et certaines régions adjacentes soutiendraient l'unification des informations récupérées en mémoire. Plus particulièrement, il propose une subdivision fonctionnelle du gyrus frontal inférieur dans lequel : les aires de Brodmann (BA) 45 et 47 seraient impliquées dans l'unification sémantique, les aires BA 45 et 44 dans l'unification syntaxique et les aires BA 44 et 6 dans le traitement phonologique. Enfin, le contrôle exécutif permettant notamment de sélectionner l'information linguistique à traiter et serait soutenu par le cortex préfrontal dorsolatéral, certaines structures moyennes telles que le cortex cingulaire antérieur

ainsi que quelques régions pariétales (impliquées dans l'attention). Ainsi, dans MUC le GFI assure la fonction d'unification et de mise en lien entre différents types d'informations (linguistiques) stockées en mémoire via la connectivité avec les régions temporales et pariétales (voir Figure 3). Ces dernières vont dans le sens d'une implication non purement linguistique du GFI (incluant la sélection) et de l'importance du pattern de connectivité dans le traitement d'une information linguistique spécifique (voir Figure 3 pour un schéma de la connectivité fonctionnelle et anatomique du modèle MUC). Dans ce modèle, l'unification correspond à l'intégration des différents types d'informations (linguistiques et non-linguistiques) en une représentation cohérente. Elle est à distinguer de l'interprétation du matériel langagier qui correspond à l'accès au sens de la représentation construite.

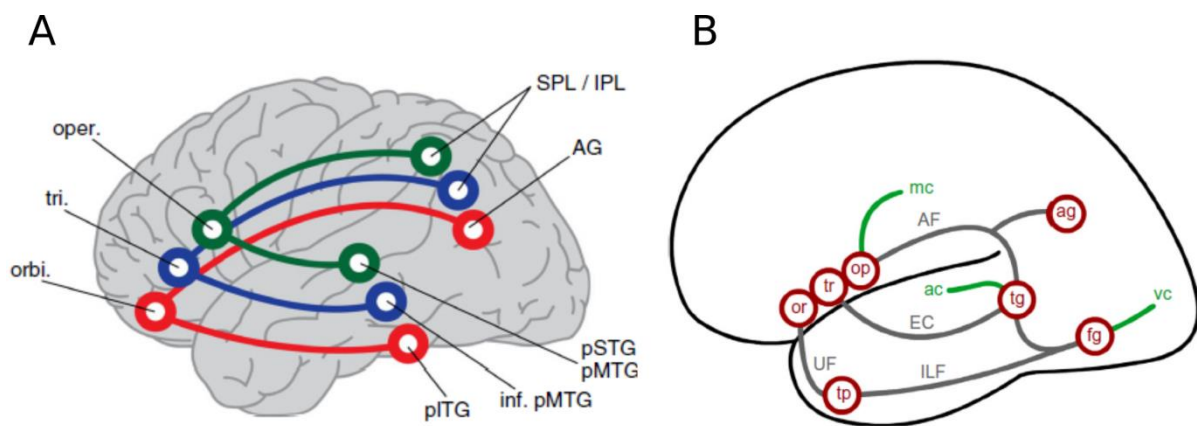


Figure 1.3 : Schéma des patterns de la connectivité fonctionnelle (A) et anatomique (B) dans le réseau perisylvien gauche du langage

Ces patterns sont détaillés pour les régions frontales gauches (constituant l'espace d'unification) et les régions temporales et pariétales (constituant la composante mémoire). A) Patterns de connectivité dans le réseau perisylvien du langage issus d'une évaluation utilisant l'IRMf de repos par Xiang et al., (2010). Il montre la connectivité privilégiée (plus forte corrélation fonctionnelle) entre les différentes régions fonctionnelles du GFI en fonction du type de traitement impliqué par les trois types d'informations linguistiques (phonologique, en vert, syntaxique en bleu et sémantique en rouge). Tiré de Hagoort, (2014). B) Montre les fuseaux de fibres impliqués dans la connectivité anatomique du réseau perisylvien du langage et les interfaces avec le système sensorimoteur -le cortex visuel, auditif et moteur-. Tiré de Hagoort (2013). Abréviations : Oper/op : pars opercularis ; tri/tr : pars triangularis ; orbi/or : pars orbitalis ; SPL/IPL: supérieur et inférieur pariétal lobe; AG : gyrus angulaire ; pSTG/ pMTG : gyrus temporal postérieur supérieur et moyen ; inf pMTG : gyrus temporal inférieur moyen ; pITG : gyrus temporal inférieur postérieur ; AF : Faisceau arqué; EC : capsule externe, ILF : Faisceau longitudinal inférieur ; UF : Faisceau unciné.

La composante Unification (ou espace d'unification) est le point central de MUC, et elle permettrait l'unification des différentes connaissances stockées en mémoire (linguistiques et non linguistiques). Cette composante fait référence à la possibilité de

créer/ de comprendre on-line des assemblages d'éléments lexicaux dans des structures plus larges avec la contribution du contexte et des connaissances du monde.

Différents types d'évènements peuvent venir mettre en péril l'unification lors du traitement du langage. En effet, une violation syntaxique viendrait rompre l'unification en cours en induisant une incohérence structurelle et se reflèterait au travers des marqueurs LAN (Left Anterior Negativity) (Hagoort et al., 1993; Münte et al., 1993; Osterhout et al., 1996; Osterhout & Holcomb, 1992; Rösler et al., 1998). Une violation sémantique quant à elle perturberait l'unification en introduisant une incohérence sémantique essentielle à la construction d'une interprétation cohérente. Elle a principalement été étudiée à l'aide de mesures électrophysiologiques via l'évaluation du marqueur N400. Selon le modèle de Hagoort, l'unification sémantique aurait lieu dès les premiers instants du traitement du langage. En effet, Hagoort et Brown (1994) ont notamment montré que l'augmentation de la cohérence entre un mot ambigu et le contexte réduisait l'amplitude de la N400 induite par l'ambiguïté. Il est important de noter que l'unification sémantique fait aussi référence à l'intégration des informations traitées avec les connaissances que l'on a du monde (informations pragmatiques stockées en mémoire). Dans une étude en ERP, Hagoort, Hald, Bastiaansen, et Petersson (2004) ont présenté à des participants des phrases correctes sémantiquement et respectant les connaissances du monde³, des phrases correctes sémantiquement mais ne respectant pas les connaissances du monde⁴ et des phrases non sémantiquement correctes⁵. Les auteurs ont alors observé une N400 lors du traitement des phrases sémantiquement incorrectes mais également lors des phrases correctes ne respectant pas les connaissances du monde (e.g., en France les boîtes aux lettres de la poste sont jaunes). Ces résultats suggèrent que l'interprétation sémantique d'une phrase et les informations relatives aux connaissances que l'on a de notre monde sont intégrées en même temps pendant la compréhension du langage.

De plus, il semblerait que les informations contextuelles liées à la situation ou les informations liées à la personne qui nous parle, par exemple, soient également intégrées lors du traitement du langage. C'est ce qu'ont montré Van Berkum et collaborateurs (2008) en présentant à des participants des phrases auditives

³ e.g., "Les boîtes aux lettres de la poste sont jaunes"

⁴ e.g., "Les boîtes aux lettres de la poste sont rouges"

⁵ e.g., "Les boîtes aux lettres de la poste sont acides"

prononcées par différents types de locuteurs (homme, femme, enfant, adulte ...) dont le contenu était cohérent ou non avec les inférences faites à propos du locuteur (e.g. "Je pense que je suis enceinte" prononcé par un homme ou une femme). Les auteurs ont alors observé le même type d'onde négative N400 que lors d'une violation sémantique. Ces résultats supportent l'hypothèse d'une intégration précoce des informations pragmatiques puisqu'une incohérence entre les informations pragmatiques et la représentation construite à partir du contenu langagier apparaît tôt dans le traitement. Ainsi, le modèle de Hagoort s'inscrit dans une approche parallèle du traitement du langage étant donné que l'unification des informations syntaxiques, sémantiques, pragmatiques et contextuelles aurait lieu dès les premiers instants de traitement.

La composante d'unification implique ainsi l'intégration des informations lexicales à la représentation en cours de construction mais également par la prédiction des informations à venir par le contexte (Hagoort & Indefrey, 2014). En effet, lors de la compréhension du langage notre système serait en permanence en train de prédire ce qui vient ensuite. L'étude de Lau, Stroud, Plesch, et Philips (2006) en EEG supporte cette hypothèse et met en évidence le rôle de la prédiction dans le traitement syntaxique et plus largement dans la compréhension du langage. En effet, dans leur étude, les auteurs ont manipulé le contexte précédant des phrases contenant une violation syntaxique afin d'évaluer l'impact des prédictions faites à partir du contexte sur l'amplitude de l'onde ELAN (apparaissant classiquement environ 200ms après une violation syntaxique). Ils ont ainsi montré que lorsque le contexte amenait à une faible prédiction, la composante ELAN était atténuée par rapport à lorsque le contexte amenait à une plus forte prédiction. Cette observation montre que l'onde ELAN peut être modifiée par des informations contextuelles et non pas uniquement syntaxiques. Ainsi, la prédiction ferait partie intégrante des mécanismes de compréhension du langage permettant une intégration des informations plus rapide.

La composante de contrôle du MUC fait référence à un système qui permettrait de diriger l'attention sur certaines informations qui se révéleraient être pertinentes à l'interprétation du matériel langagier. Pour tester cela, Kristensen, Wang, Petersson, et Hagoort (2013) ont proposé de manipuler l'attention et la pertinence des informations (congruence et incongruence sémantique) lors d'une tâche langagière (écoute de phrases dont un mot était ou non accentué suivie d'une décision sémantique) et une tâche non-langagière (tâche d'attention spatiale auditive). Les

auteurs ont observé l'implication d'un même réseau attentionnel pour les deux tâches. Plus spécifiquement, ils ont observé une activation bilatérale du cortex pariétal supérieur et inférieur, du cortex temporal supérieur ainsi que du cortex précentral gauche à la fois lors de la tâche attentionnelle non langagière et lors de la compréhension de phrases. Les auteurs proposent que ces résultats reflètent l'implication du système attentionnel lors de la compréhension des phrases, et notamment que ceci serait soutenue par des indices prosodiques étant donné que l'effet d'incongruence est absent lorsque la prosodie n'est pas présente (absence d'accentuation dans le mot cible).

En utilisant un paradigme similaire en EEG, Wang, Bastiaansen, Yang, et Hagoort (2011) ont observé une modification de l'amplitude de la N400, avec une amplitude plus importante en condition d'incongruence sémantique avec une forte accentuation de la prosodie sur le mot d'intérêt que dans les autres conditions. Ainsi, l'accentuation semble activer le système attentionnel menant à un traitement plus en profondeur du matériel langagier accentué. L'ensemble de ces résultats suggèrent une interaction entre les processus de traitement du langage et les processus de CC (plus particulièrement les processus attentionnels ici). Dans ce modèle, la composante de contrôle fait donc principalement référence aux processus de contrôle attentionnel qui vont entrer en jeu lors du traitement du langage oral afin de diriger l'attention vers l'information qui semble pertinente.

Le modèle MUC s'articule autour de l'unification qui est la composante centrale de ce modèle. L'unification des différents types d'informations permettrait la génération de représentations cohérentes et structurées. À la différence du modèle de Friederici, l'intégration des informations sémantiques et syntaxiques se font en parallèle dans MUC, avec également une influence du contexte dès les premiers instants du traitement. De plus, la composante de contrôle met en avant le fait que des mécanismes non-langagiers entrent également en jeu lors de la compréhension du langage. Cette implication du CC lors de la compréhension du langage fait l'objet de plus amples études dans la littérature et sera le sujet du chapitre 3.

En résumé

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à différents modèles de la compréhension du langage. Nous avons ainsi passé en revue des modèles postulant une primauté du traitement de l'information syntaxique et qui placent ce type d'information au centre des mécanismes de compréhension. En effet, nous avons notamment décrit le modèle d'Angela Friederici qui s'inscrit dans une approche *syntax-first* (bien que modérée). Nous nous sommes par la suite intéressés à la place de l'information sémantique portée par l'information verbale et non verbale lors de la compréhension du langage. Enfin, nous avons abordé le modèle MUC de Peter Hagoort qui s'inscrit dans une approche parallèle et incrémentielle qui intègre non seulement des mécanismes spécifiques au langage mais également des mécanismes non-langagiers (en lien avec la mémoire et le contrôle cognitif) lors de la compréhension. La diversité de ces modèles met en évidence la complexité des mécanismes mis en jeu lors de la compréhension du langage. De plus, les divergences en lien avec les spécificités du traitement des informations sémantiques et syntaxiques lors de la compréhension montrent que les différents effets observés dans la littérature nécessitent d'être davantage étudiés afin de mieux comprendre comment nous comprenons le langage. Dans le prochain chapitre, nous aborderons différentes caractéristiques du traitement du langage qui permettent de rendre compte du traitement extrêmement rapide et sans effort de la compréhension du langage oral. Nous aborderons également certaines situations durant lesquelles ce traitement rapide et « automatique » ne semble pas être suffisant et rendent compte d'une compréhension moins efficace. Ces situations sont très importantes non seulement d'un point de vue théorique mais également d'un point de vue expérimental notamment car elles permettent d'approfondir et de caractériser les mécanismes impliqués lors de la compréhension.

2

Chapitre 2 : Traitement du langage oral : automaticité, prédiction et ambiguïté

Dans ce chapitre nous nous focaliserons tout d'abord sur l'exploration de l'automaticité et la rapidité des processus de compréhension du langage oral. En effet, la rapidité avec laquelle le langage oral est compris chez l'adulte a amené à proposer dans la littérature une automaticité du traitement. Cette rapidité du traitement rend difficile l'étude de différents mécanismes impliqués dans la compréhension. Ainsi, pour pouvoir mieux saisir le phénomène de compréhension il est nécessaire de se focaliser sur les différents traitements et mécanismes qui semblent intervenir durant la compréhension et qui pourraient rendre compte de sa rapidité. Ceci est important car comprendre quels sont les différents facteurs permettant le traitement très rapide du langage oral permettrait par la suite de les manipuler afin d'évaluer les mécanismes sous-jacents à la compréhension et leur dynamique. Nous allons d'une part présenter les différents types d'informations linguistiques qui semblent être traités automatiquement et d'autre part les mécanismes de prédiction qui pourraient intervenir lors de la compréhension et renforcer la vitesse de la compréhension. Dans ce sens, nous passerons en revue les différents types d'informations linguistiques qui semblent bénéficier des prédictions lors de la compréhension. Par la suite, nous nous intéresserons aux situations dans lesquelles le traitement ne se fait pas rapidement ni

de manière automatique, qui prennent plus du temps et semblent donc être plus difficiles. Nous aborderons ainsi les différentes situations en lien avec l'information linguistique ou non-linguistique qui rendent la compréhension difficile. En premier lieu nous présenterons la difficulté induite par le matériel langagier en lui-même et plus spécifiquement les situations d'ambiguïtés linguistiques. Nous décrirons différents types d'ambiguïtés apparaissant lors du traitement du langage et ce qu'elles nous renseignaient sur les processus en jeu lors de la compréhension. En second lieu, nous aborderons d'autres types de situations durant lesquelles des éléments non-linguistiques rendent la compréhension difficile ou dégradée, à savoir, la compréhension dans le bruit ou la compréhension de la parole dans la parole (speech-in-speech situation). Nous concluons cette section par une discussion sur la possible implication de mécanismes non-langagiers et notamment de mécanismes plus généraux de contrôle cognitif qui pourraient intervenir dans la compréhension lors de situations dites difficiles ou aversives.

1. Processus automatiques de traitement du langage

Le langage est omniprésent dans notre vie. Nous comprenons et produisons du langage tous les jours sans effort apparent. Cette utilisation quotidienne du langage a mené certains chercheurs à se poser la question de l'automaticité des mécanismes sous-tendant le traitement du langage chez l'adulte. Dans les années 80, Fodor proposait notamment que l'analyse syntaxique était « réflexe » et se faisait de manière automatique dans un organe dédié à ce traitement. L'automaticité peut être définie comme le traitement sans effort conscient ou volontaire de l'information. L'automaticité dans le langage apparaît à différents niveaux de traitement, du plus bas niveau de perception à des traitements dits de plus haut niveau de compréhension (i.e., sémantique, syntaxique). Nous verrons ci-après dans quelles mesures une certaine automaticité de traitement apparaît à ces différents niveaux lors de la compréhension.

1.1. Automaticité dans le traitement phonologique

Le traitement phonologique est le traitement des sons ou des phonèmes d'une langue. Le caractère automatique du traitement a été observé à l'aide de plusieurs méthodes dans la littérature. Une des méthodes les plus utilisées est celle de l'amorçage (i.e., présentation d'un premier stimulus afin d'influencer le traitement d'un

second stimulus). Dans une étude utilisant un amorçage, McQueen et Sereno (2005) ont notamment montré une automaticité du traitement phonologique en modalité auditive. En effet, les auteurs ont observé un effet de facilitation d'une amorce dans une tâche de décision lexicale lorsque l'amorce rimait ou comportait trois phonèmes en commun avec le mot cible. Le fait que la présence d'une rime entre l'amorce et la cible modifie la vitesse de traitement de la cible suggère un traitement rapide de l'information phonologique et laisse ainsi supposer un traitement automatique de cette dernière. Les arguments forts de l'automaticité du traitement phonologique proviennent notamment d'études utilisant un amorçage masqué (e.g., Grainger et al., 2003). Par exemple, Ferrand, Humphreys, et Segui (1998) ont demandé à des participants de réaliser une tâche de dénomination d'images. Dans cette tâche, les participants avaient pour consigne de dénommer des images qui leur étaient présentées. Avant chaque image, les auteurs présentaient pendant 29ms le nom de l'image écrit ou un nom d'objet non-relié (i.e., l'amorce). Cette amorce était immédiatement suivie d'un masque ne permettant pas aux participants d'identifier consciemment le mot présenté. Ainsi, les auteurs ont observé que les participants répondaient plus rapidement à la tâche de dénomination d'images lorsque l'image était amorcée par le nom de cette image que par un nom non-relié alors même que l'amorce n'était pas traitée consciemment. Cependant, le fait que l'amorce soit le même nom ne permettait pas de déterminer si l'effet de facilitation observé provenait d'un amorçage sémantique ou phonologique. La même équipe de chercheurs a réalisé une étude similaire dans laquelle ils ont amorcé l'image par des pseudo-homophones (orthographiquement différents) du nom de l'objet décrit par l'image ou par des noms non-reliés (Ferrand et al., 1994). Cette manipulation a permis aux auteurs d'observer un effet de facilitation des amorces pseudo-homophones sur la dénomination d'images. En effet, le fait d'observer un effet de facilitation démontre que les caractéristiques phonologiques de l'amorce ont été traitées. Ce résultat montre donc que le traitement phonologique de l'amorce est effectué de manière extrêmement rapide et automatique puisque l'amorce n'était présentée que 29ms et n'était même pas perçue consciemment (voir également Carreiras et al., 2005).

1.2. Automaticité dans l'accès lexico-sémantique

Alors qu'un traitement phonologique automatique peut paraître évident en ce que les phonèmes constituent les éléments de bases des mots, la question de

l'automaticité du traitement lexico-sémantique l'est moins. Une des tâches les plus connues en psychologie cognitive démontre cependant relativement simplement une certaine automaticité du traitement lexico-sémantique : la tâche de Stroop (1935). Cette tâche consiste en la présentation de mots de couleur successivement (e.g., bleu, rouge, vert) écrits avec une encre d'une couleur soit congruente soit incongruente avec la couleur nommée par le mot (e.g., bleu écrit en bleu : congruent, rouge écrit en vert : incongruent, vert écrit en vert : congruent) (voir Figure 4) ; la consigne étant de nommer la couleur dans laquelle est écrit chaque mot le plus rapidement et le plus exactement possible. Les résultats de cette tâche montrent que tout lecteur expert est plus long pour nommer la couleur dans laquelle est écrit chaque mot lorsque celle-ci est incongruente avec la couleur décrite par le mot. Ce résultat s'explique par le fait que la lecture et l'accès lexical se fassent de manière automatique chez l'adulte normo-lecteur. En effet, lorsque le mot est présenté, la reconnaissance du mot se fait de manière automatique et ce traitement vient interférer avec la consigne donnée pour la tâche, ici dénommer la couleur. L'observation d'une telle interférence montre une automaticité de la reconnaissance des mots écrits et du traitement lexico-sémantique.

	Congruent	Incongruent
Stimulus	ROUGE	ROUGE
Réponse	Rouge	Jaune
Temps de réponse	Courts	Longs

Figure 2.1 : Tableau décrivant les conditions expérimentales d'une tâche classique de Stroop

L'automaticité de l'accès et du traitement sémantique a été évaluée à l'aide de plusieurs méthodes. Par exemple, Shaffer et LaBerge Shaffer (1979) ont utilisé un paradigme de type Flanker pour une tâche de décision sémantique (i.e., cliquer sur la catégorie à laquelle appartient un mot cible) en présentant un mot cible avec des mots distracteurs placés au-dessus et en dessous du mot cible. La manipulation des mots distracteurs (identiques au mot cible, de la même catégorie que le mot cible, ou non-reliés au mot cible) a permis aux auteurs de mettre en évidence un effet d'interférence des mots distracteurs lorsque ces derniers n'appartiennent pas à la même catégorie que le mot cible. Le fait que la consigne ne demande pas aux participants de prêter attention aux distracteurs et qu'un effet des propriétés sémantiques des distracteurs soit tout de même observé semble indiquer que l'accès sémantique est automatique

(voir également Bentin et al., 1995). Naccache et Dehaenne (2001) ont observé un effet d'amorçage sémantique d'un chiffre alors même que l'amorce n'était pas traitée consciemment. Dans leur étude, les participants devaient cliquer sur deux boutons selon si un chiffre présenté à l'écran était plus grand ou plus petit que le chiffre 5. Avant chaque chiffre une amorce masquée était présentée et pouvait être un chiffre écrit en lettre soit plus grand, soit plus petit que 5. Les auteurs ont ainsi observé que les participants étaient plus rapides lorsque l'amorce était congruente (en termes de réponse « plus grand » ou « plus petit ») avec le chiffre cible que lorsqu'elle était incongruente. L'aspect automatique du traitement lexical a été étudié en EEG (Shtyrov et al., 2010) à l'aide du marqueur appelé *Mismatch Negativity* (MMN) caractérisé par une onde négative précoce à la suite de stimuli rares (dits déviants) présentés dans un ensemble de stimuli fréquents (dits standards, Näätänen et al., 1978). Ce marqueur apparaît entre 100 et 400ms après la détection des stimuli non fréquents. Dans leur étude, Shtyrov et collaborateurs ont présenté auditivement aux participants des mots ou pseudo-mots ainsi qu'un film sans son. Dans une condition, les participants devaient porter leur attention sur le film et dans une autre sur les stimuli auditifs. Les auteurs ont ainsi observé une MMN plus intense en condition d'attention sur le film lorsque les stimuli déviants étaient des mots que lorsque les stimuli déviants étaient des pseudo-mots. En revanche, en condition d'attention sur les stimuli auditifs aucune différence n'était observée. Ce résultat supporte l'hypothèse d'un traitement lexical automatique en ce que même si l'attention n'est pas dirigée vers les stimuli auditifs langagiers, les mots semblent être traités (voir également Garagnani et al., 2009; Hinojosa et al., 2004)

1.3. Automaticité dans le traitement syntaxique

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous avons discuté du modèle de Friederici selon lequel le traitement syntaxique apparaîtrait comme étant une des premières étapes de la compréhension de phrases. Un des arguments avancés en faveur de cette hypothèse est l'observation du marqueur ELAN apparaissant 125-200ms après une violation syntaxique (Friederici et al., 1993; Hahne & Friederici, 2002; Neville et al., 1991). Ce marqueur ELAN constitue un argument partiel d'un traitement syntaxique automatique puisqu'il survient très rapidement après l'apparition de la violation syntaxique. De manière similaire, Pulvermüller et Shtyrov (2003) ont observé une MMN à la suite de la présentation de paires pronom-verbe grammaticalement

inconsistantes au sein d'un ensemble de paires grammaticalement consistantes. Le fait que Pulvermüller et Shtyrov observent une MMN (à la suite de paires grammaticalement inconsistantes) dans ce type de paradigme *oddball* suggère que le traitement syntaxique associé à la concordance de conjugaison du verbe avec le pronom est très rapide voire automatique. En revanche, dans ses études observant une onde ELAN ou une MMN syntaxique, l'attention des participants était dirigée vers le traitement langagier laissant la possibilité que ce traitement soit en partie contrôlé. Dans une étude en EEG, Pulvermüller, Shtyrov, Hasting, et Carlyon (2008) ont évalué cet aspect automatique du traitement syntaxique en manipulant l'attention allouée au signal de parole. Pour cela, les auteurs ont utilisé le même paradigme *oddball* que Pulvermüller et Shtyrov (2003) dans une présentation d'écoute dichotique. Les auteurs présentaient dans une oreille des sons d'une certaine hauteur et quelques sons d'une hauteur différente et dans l'autre oreille des paires pronom-verbe grammaticalement consistantes et quelques paires grammaticalement inconsistantes. En plus de cela, les participants voyaient un film sans son. La tâche des participants étaient soit de regarder le film sans faire attention au reste, soit de détecter les sons de hauteur différente. De cette manière, l'attention des participants n'étaient pas dirigée vers les paires pronom-verbe. Les auteurs ont ainsi observé une MMN suite à une inconsistance syntaxique à la fois lorsque l'attention était dirigée vers le film et lorsqu'elle était dirigée vers les sons. Ce résultat suggère que même en l'absence d'attention sur le traitement langagier un traitement syntaxique était réalisé, supportant ainsi l'hypothèse d'une automaticité du traitement syntaxique (voir également Hasting et al., 2007).

La compréhension du langage semble donc être un mécanisme dont un certain nombre de processus sont effectués (en général) de manière automatique (Shtyrov, 2010). Cette automaticité de traitement pourrait expliquer en partie la rapidité de compréhension et la facilité avec laquelle nous communiquons tous les jours. Des mécanismes qui pourraient également participer à la rapidité du traitement du langage oral sont les mécanismes prédiction. En effet, ces mécanismes, en lien entre autres avec l'expérience et les connaissances, permettent de prédire les éléments à venir dans une phrase ou un discours. Ce type de mécanisme pourrait ainsi expliquer la facilité et la rapidité du traitement.

2. Prédiction dans le langage

Plusieurs définitions ont été proposées dans la littérature concernant les prédictions lors des processus langagiers (voir Kuperberg & Jaeger, 2016 pour une revue). Récemment Pickering et Gambi (2018) proposent que la prédiction corresponde à la pré-activation d'informations linguistiques avant le traitement du matériel langagier portant cette information. Cette pré-activation de représentations permettrait ensuite de faciliter le traitement et la compréhension puisque certaines représentations auront déjà été activées au préalable. Un des premiers arguments en faveur des mécanismes prédictifs lors de la compréhension du langage est la vitesse à laquelle la compréhension s'effectue. Comme nous l'avons vu précédemment, la compréhension du langage comporte un grand nombre de mécanismes automatiques. Les études utilisant des paradigmes de suivi oculaire montrent à quel point la compréhension du langage est rapide. En effet, ceux-ci montrent notamment que lors de l'écoute de phrases, la position du regard sur les objets évoqués dans les phrases est synchronisée avec l'apparition des mots correspondant aux objets (Allopenna et al., 1998; Tanenhaus et al., 1995). Notre système ne pourrait probablement pas traiter l'ensemble des informations si rapidement si des prédictions et l'anticipation des informations à venir (information entrante) n'était pas possible. Une autre hypothèse concernant la fonction de la prédiction dans le langage a été proposée par Pickering et Garrod (2007) qui postulent que la prédiction serait nécessaire à la coordination des dialogues.

2.1. Prédiction d'informations phonologiques

Au niveau des indices phonologiques, Ito et collaborateurs (2020) ont observé une onde négative plus tardive apparaissant entre 450 et 800ms suite à une incongruence phonologique entre le pronom et le phonème du nom qui suivait (e.g., *uno scontro*). Cependant, plusieurs études n'ont pas réussi à observer une telle prédiction phonologique, suggérant que celle-ci serait faible (e.g., Ito et al., 2017; Nieuwland et al., 2018). Toutefois, dans une étude récente, Ito, Pickering, et Corley (2018) ont montré que des participants regardaient davantage l'image correspondant à un mot prédictible (e.g., un nuage à la fin de la phrase "Les touristes s'attendaient à de la pluie lorsque le soleil est passé derrière le ...") que les images distrayantes mais regardaient davantage l'image distrayante dont le mot auquel elle fait référence comporte la même structure phonologique (e.g., "clown" proche de "cloud") que les images distrayantes

faisant référence à des mots ayant une forme phonologique différente (e.g., “bear”). Ces résultats bien qu’encore quelque peu incertains semblent montrer une prédiction (faible) de la forme phonologique des mots à venir lors de la compréhension du langage.

2.2. Prédications d’informations sémantiques

Un certain nombre d’études ont permis de mettre en évidence des mécanismes prédictifs au niveau des informations sémantiques. C’est le cas de l’étude d’Altmann et Kamide (1999) dans laquelle les participants devaient dire si une phrase qui été présentée auditivement pouvait s’appliquer à la scène qu’ils voyaient de manière concomitante ou non. Les auteurs manipulaient les verbes des phrases ainsi que les objets présents sur les scènes visuelles afin de créer des conditions dans lesquelles l’action décrite par la phrase pouvait s’appliquer à l’ensemble des objets ou à un seul objet (e.g., “L’enfant va déplacer le gâteau” ou “L’enfant va manger le gâteau” et une scène incluant un enfant, un gâteau, une balle, une voiture et un petit train, voir Figure 5). De cette manière, Altmann et Kamide ont montré que lorsque le verbe contraignait le sens de l’action (e.g., le verbe *manger* dans “L’enfant va manger le gâteau” présenté avec une scène incluant un seul objet comestible : un gâteau) les participants regardaient l’objet éligible à l’action décrite par la phrase (e.g., le gâteau) avant même que le nom de cet objet soit prononcé. De manière intéressante, les auteurs ont également observé cet effet lorsqu’il n’était pas précisé aux participants de prêter attention à la phrase présentée, suggérant que cette anticipation se mettrait en place de manière automatique. Ainsi, la prédiction observée chez les participants dépendrait à la fois du sens des mots mais également du contexte visuel dans lequel la compréhension a lieu. En effet, les auteurs postulent que, dans l’exemple présenté ci-dessus, ce n’est pas le mot “gâteau” qui est prédit en soi mais l’aspect comestible, qui est en cohérence avec le verbe manger. En d’autres termes, ce serait les caractéristiques sémantiques qui seraient prédites ici.

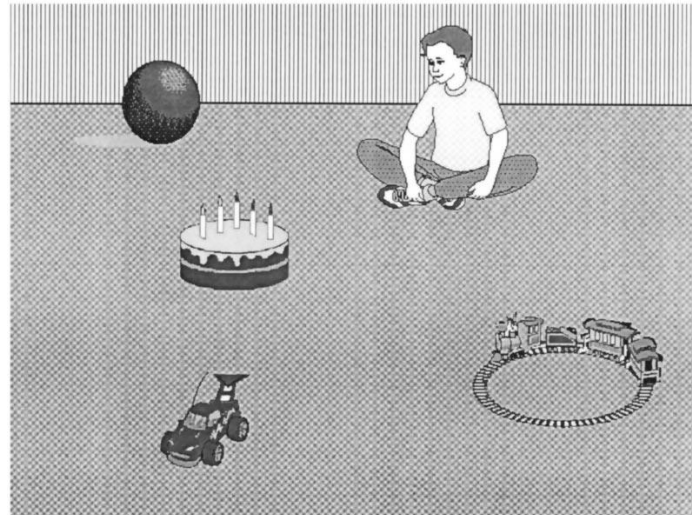


Figure 2.2 : Exemple de scène visuelle utilisée dans l'étude d'Altmann et Kamide (1999) permettant d'étudier la prédiction dans la compréhension du langage

Dans celle-ci on voit un enfant, un gâteau et des jouets. Lorsque cette scène était présentée avec la phrase « L'enfant va manger le gâteau », les auteurs ont montré que les participants avaient tendance à regarder le gâteau avant même que le mot soit présenté auditivement, suggérant une prédiction de l'information lexicale à venir pendant la compréhension de phrases.

Dans une étude en EEG, Grisoni, Miller, et Pulvermüller (2017) ont montré que des phrases restreignant les possibilités d'apparition de certains verbes d'action (e.g., “*Je prends le stylo et ... j'écris*”, restreint à des actions de la main; “*Je prends ma cigarette et ... je fume*”, restreint à des actions du visage) menaient à une pré-activation des aires cérébrales liées à des mouvement en lien avec ces actions (ici de la main ou du visage, respectivement), ce qui n'était pas le cas pour des phrases ne restreignant pas les possibilités d'apparition des verbes d'action (e.g., “*Je ne prends pas le stylo et ...*”). D'après les auteurs, cette pré-activation des aires motrices irait dans le sens d'une prédiction sémantique lors de la compréhension du langage. Ces études proposent donc une facilitation de la compréhension par une pré-activation des informations à venir. Le système prendrait ici en compte des indices sémantiques qui permettraient de prédire le type d'information entrante. Il est intéressant de noter que les indices sémantiques ne sont pas les seuls à être pris en compte lors de prédictions, en effet, des études montrent que les indices syntaxiques et phonologiques sont également utilisés pour permettre la prédiction de l'information à venir.

2.3. Prédiction d'informations syntaxiques

Dans une étude réalisée par Van Berkum et collaborateurs (2005), les auteurs ont observé une onde positive précoce lorsque des participants rencontraient un article qui ne correspondait pas grammaticalement avec le nom attendu (prédit) alors qu'aucune perturbation n'était observée lorsque l'article précédant le nom correspondait grammaticalement à ce nom (e.g., « Le voleur n'a pas eu de problème pour trouver le coffre-fort de la famille. Bien sûr, il était placé derrière un ... *tableau* »). Cette observation suggère une prédiction de la catégorie grammaticale du nom à venir, et donc une prédiction fondée sur les indices syntaxiques. Dans une étude similaire, Wicha, Moreno, et Kutas (2004) ont observé une onde positive tardive P600 (caractéristique du traitement syntaxique) après l'apparition d'un article déviant en termes de genre par rapport au nom qui suivait (e.g., *le maison*). Cette onde positive n'apparaissait pas lorsque l'article correspondait en termes de genre au nom qu'il précédait (voir également Foucart et al., 2014; Otten et al., 2007; Otten & Van Berkum, 2008 pour des études similaires). Récemment, Ito et al. (2020), ont également observé une onde négative dès 250ms après l'apparition d'une incongruence de genre entre un pronom et le nom qui le suivait (e.g., *un inondation*). Ainsi, le système prendrait en compte des indices grammaticaux et syntaxiques pour prédire l'information entrante et améliorer l'efficacité de la compréhension mais des informations phonologiques seraient également prédites.

Ainsi, les indices utilisés pour permettre une prédiction de l'information entrante seraient traités à différents niveaux linguistiques et la conjugaison de ces indices permettrait un traitement plus rapide et efficace. De plus, il est observé que le contexte linguistique de la phrase (Federmeier & Kutas, 1999), le contexte visuel (Altmann & Kamide, 1999; Huettig et al., 2011), constitueraient des indices utiles à la prédiction. L'utilisation de ces indices s'établirait progressivement par des mécanismes de cooccurrence (McDonald & Shillcock, 2003) ou de probabilités de transition, entre autres. Il est important de noter que les prédictions ne seraient pas utilisées dans toutes les situations et comme suggéré par Huettig (2015) il permettrait une sorte de « coup de main » lorsque la compréhension est difficile ou dégradée (voir également Huang et al., 2012; Mani & Huettig, 2012).

2.4. Différentes approches des mécanismes prédictifs

Les mécanismes soutenant les prédictions sont cependant moins bien établis dans la littérature et plusieurs hypothèses et approches sont proposées. Ces différentes approches varient en termes de nombre de systèmes soutenant la prédiction ainsi qu'en termes d'aspect général ou spécifique des processus impliqués dans la prédiction.

Une de ces approches propose qu'un seul système supporterait les prédictions de l'ensemble des processus cognitifs dont le langage (Altmann & Mirković, 2009). Selon cette approche, un réseau récurrent simple apprenant les régularités et probabilités des événements permettrait les prédictions. Les représentations prédites à partir de ce système ne seraient pas spécifiques au langage mais domaine-général. Une description d'un point de vue neural est proposée par Lupyan et Clark (2015, voir également Friston, 2010) selon lequel les informations ascendantes sont traitées dans le contexte des antécédents *priors* (e.g., croyances, connaissances, hypothèses) des niveaux supérieurs de la hiérarchie. Les parties non prédites de l'information entrantes (les erreurs) remontent ainsi dans la hiérarchie corticale et ceci conduirait à la mise à jour des prédictions ultérieures, de manière cyclique. Ainsi, la contribution de l'information ascendante serait déterminée par la variation des estimations de précision. L'organisation hiérarchique du système implique que les niveaux supérieurs prédisent l'activité des niveaux inférieurs. Une telle organisation permet que toutes les sources de connaissances disponibles, à différents niveaux d'abstraction, puissent contribuer afin de réduire l'erreur de prédiction globale. De plus, les représentations ainsi construites dans les niveaux supérieurs dans le but de réduire l'erreur vont permettre également de meilleures prédictions futures.

Une autre approche propose quant à elle l'existence de deux systèmes distincts sous-jacents à la prédiction dans le traitement du langage et plus généralement à l'ensemble des processus cognitifs (Bar, 2007). Selon cette approche, un premier système, le Système 1, supporterait l'ensemble des traitements automatiques comme lire un message sur un panneau, générer une impression, comprendre un dialogue, reconnaître un objet, orienter notre attention, entre autres. En ce qui concerne le langage, ce système permettrait de prédire la fin de phrases simples comme par exemple « Ce matin je suis allé à la boulangerie acheter du ... ». Le système traiterait l'information sans effort particulier et de manière non volontaire. En revanche, le

second système, le Système 2, supporterait les processus mentaux demandant une certaine charge mentale, cognitive et attentionnelle comme par exemple prendre une décision, la résolution d'une équation complexe, chercher une personne dans une foule, essayer de comprendre une conversation dans une salle bruyante). Ainsi, Huettig (2015) suggère que la prédiction pourrait également être régie par ses deux systèmes, avec le Système 1 correspondant aux prédictions basées sur les associations sémantiques simples et automatiques et le Système 2 correspondant à une prédiction davantage volontaire, réfléchi et coûteuse en termes d'effort (s'assimilant aux mécanismes de contrôle cognitif). L'auteur fait également le rapprochement avec le modèle en deux voies neurales proposé par Kuperberg (2007). Dans ce modèle, la première voie serait un mécanisme basé sur la mémoire sémantique qui permettrait l'association de différentes représentations et qui s'apparenterait au Système 1 ; tandis que la seconde voie correspondrait à des mécanismes combinatoires permettant la mise en place de la structure des phrases au regard des informations syntaxiques mais également des contraintes sémantiques, qui s'apparenterait au Système 2. Ce second système est semblable au système multiple-demande (MD) proposé par Duncan (2010).

Duncan (2010) propose le système MD comme un système supportant les processus exécutifs tels que le contrôle d'inhibition, l'attention sélective, la mémoire de travail, la planification, la résolution de conflits. Au niveau neuronal, ce système serait soutenu par un réseau fronto-pariétal (Cole & Schneider, 2007; Dehaene et al., 2015; Seeley et al., 2007). Certaines études semblent suggérer que ce système supporterait également les processus de prédiction dans le langage (Huettig & Mani, 2016; Pickering & Gambi, 2018). En effet, certains auteurs (Federmeier et al., 2002; Federmeier & Kutas, 2005) ont notamment observé dans des études en ERP une absence ou une diminution de l'effet de la prédiction lors de la compréhension du langage chez les personnes âgées pour qui un déclin des capacités de contrôle exécutif a été observé (Braver et al., 2001; Manard et al., 2014). Dans ces études, les auteurs ont observé une diminution voire une absence de la N400 suite à une violation des attentes au cours de la compréhension du langage chez les personnes âgées comparativement à chez les jeunes adultes (voir également Payne & Federmeier, 2018). De manière similaire, Martin et collaborateurs (2013) ont observé le même pattern chez des personnes bilingues lorsque celles-ci lisaient dans leur seconde

langue. Ces études soutiennent la vision selon laquelle les processus de contrôle cognitif supportent les mécanismes de prédiction dans le langage en ce que les populations chez qui une diminution de l'effet de prédiction est observée sont des populations ayant des performances de contrôle cognitif réduit (par le déclin cognitif ou la demande de la tâche).

Un des arguments soutenant ce postulat provient des études en neuroimagerie. En effet, certains auteurs ont notamment observé une activation des aires préfrontales, frontales et pariétales (régions faisant partie du système MD) lors du traitement de matériels langagiers complexes. Par exemple, Davis et Johnsruide (2003) ont observé une augmentation de l'activité dans les régions frontales inférieures lors de la compréhension de stimuli langagiers auditifs dégradés. Dans une étude en IRMf, Wild et collaborateurs (2012) ont également montré que les régions frontales (dont le gyrus frontal inférieur gauche) étaient activées lors de la compréhension de phrases dégradées (bruit de fond) uniquement lorsque les participants portaient leur attention sur les stimuli. Cette étude supporte le postulat d'une implication du système MD lors de la compréhension du langage et plus particulièrement lorsque la compréhension est difficile (voir également Adank, 2012; Scott & McGettigan, 2013; Vaden et al., 2013). Cependant, à notre connaissance, aucune étude jusqu'à présent ne met en lien directement les deux mécanismes et la simple activation des régions préfrontales lors de la compréhension du langage ne peut pas à elle seule soutenir l'hypothèse d'un lien entre les mécanismes exécutifs et prédictifs.

Afin de pouvoir évaluer cette hypothèse, outre un chevauchement anatomique, une connectivité entre les régions préfrontales et langagières devrait être observée permettant la mise en évidence de l'implication des mécanismes top-down des régions préfrontales vers les régions canoniques du langage (telles que les régions postérieures, voir par exemple (Yvert et al., 2012)). De plus, si des mécanismes prédictifs lors de la compréhension du langage sont *domain-general* ces mécanismes devraient être similaires lors des tâches langagières et non-langagières (voir Shain et al., 2019 pour une discussion de ce point). Un grand nombre d'études ont montré que les indices linguistiques, à différents niveaux, ainsi que non-linguistiques permettraient la prédiction des informations entrantes. L'utilisation de ces différents indices faciliterait la compréhension et donc la rendrait plus efficace (en termes de rapidité et d'exactitude). Les prédictions seraient impliquées principalement dans des situations

difficiles ou dégradées. Les mécanismes sous-jacents et les corrélats neuronaux des prédictions restent encore débattus.

3. Ambiguïté et situations complexes

Nous nous sommes centrés jusqu'à ici sur plusieurs mécanismes permettant d'expliquer la rapidité et l'efficacité avec laquelle la compréhension du langage oral est réalisée. C'est à cause de cette rapidité et efficacité de la compréhension que la mise en évidence et l'évaluation des différents mécanismes sous-jacents à la compréhension demeure complexe. En effet, peu de paradigmes expérimentaux permettent d'appréhender les processus cognitifs sous-jacents à la compréhension online du langage. C'est pour ces raisons que les chercheurs se sont beaucoup intéressés à des méthodes d'évaluation indirecte des processus permettant de traiter le langage à travers notamment l'ambiguïté. En effet, l'ambiguïté est omniprésente dans le traitement du langage et permet de réaliser des inférences sur les mécanismes de traitement du langage dans des situations non-ambiguës. Dans cette section, nous nous intéresserons aux différents types d'ambiguïté et plus particulièrement aux processus cognitifs qu'ils permettent d'appréhender et d'étudier.

3.1. Ambiguïté lexicale et sémantique

L'ambiguïté lexicale est un type d'ambiguïté omniprésent dans le langage et fait référence à lorsque qu'un mot peut être interprété de plusieurs manières différentes. L'ambiguïté lexicale, parfois appelée ambiguïté sémantique a largement été étudiée puisqu'elle permet de renseigner sur les processus d'accès lexical (i.e., l'accès au sens du mot). La plupart des mots d'une langue ont plusieurs sens. Par exemple, en anglais, environ 80% des noms communs ont plusieurs définitions dans le dictionnaires (Rodd et al., 2002). Pourtant, la majorité du temps nous n'avons aucune difficulté à comprendre ce qu'on nous dit ou ce que nous lisons. Différentes formes d'ambiguïté lexicale apparaissent dans le langage. On retrouve l'ambiguïté lexicale provenant de mots ayant plusieurs sens (on dit qu'ils sont polysémiques) mais également les homographes qui sont des mots ayant des sens différents mais qui s'écrivent de la même manière (e.g., « fils ») et les homophones qui sont des mots ayant des sens différents qui se prononcent de la même manière (e.g., « chant » et « champ »). Une des questions essentielles à l'étude de la compréhension du langage est donc la suivante : comment arrive-t-on à sélectionner le sens contextuellement

approprié de chaque mot lorsque nous comprenons du langage ? Un certain consensus semble apparaître dans la littérature selon lequel lorsque nous rencontrons un mot ayant plusieurs sens, nous accèderions, au moins en partie, à l'ensemble des sens de ce mot. Ainsi, lorsque nous entendons la phrase « Au tournoi de badminton, la poule C était complète », il semblerait que les différents sens du mot « poule » soient activés bien que le contexte dirige l'interprétation de ce mot vers un sens précis plutôt que l'autre. Un paradigme expérimental a permis de mettre en évidence ce phénomène : l'amorçage sémantique cross-modal. Dans ce paradigme, des participants écoutent une phrase contenant un mot ambigu. Ensuite, ils doivent effectuer une tâche de décision lexicale (i.e., dire si une suite de lettres présentée à l'écran est un mot ou non) sur un mot relié ou non à un des sens de ce mot ambigu ou un pseudo-mots présenté visuellement. Dans notre exemple, à la suite de la phrase un participant verrait par exemple le mot « ferme » ou le mot « stylo » et devrait dire s'il s'agit d'un mot ou non. De cette manière, si tous les sens du mot ambigu sont activés, les participants devraient être plus rapides pour dire que le mot « œuf » est un mot que le mot « stylo » car l'écoute du mot « poule » dans la phrase aurait servi d'amorçage et l'activation de ses différents sens aurait amorcé le mot « œuf ». C'est ce que Onifer et Swinney (1981) ont observé dans leur étude. Il semblerait que cet effet n'apparaisse que si le mot visuel était présenté immédiatement après la phrase. En effet, si un délai était introduit entre la phrase et le mot, l'activation du sens non approprié semble disparaître (i.e., plus d'effet d'amorçage pour les mots sémantiquement reliés au sens non approprié du mot ambigu) suggérant une sélection très rapide du sens approprié à la phrase (Love & Swinney, 1996; Seidenberg et al., 1982).

Un des points très important à prendre en compte en situation d'ambiguïté lexicale est le contexte de la phrase et si celui-ci permet de renseigner sur le sens approprié du mot ambigu ou non. En effet, le contexte précédant le mot ambigu peut permettre la prédiction du sens approprié de ce mot. Dans le cas où le contexte ne permettrait pas de prédire l'un au ou l'autre des sens (i.e., contexte neutre), une sélection du sens dominant (i.e., le plus fréquent) du mot est réalisée. En effet, dans un paradigme d'amorçage sémantique cross-modal, Simpson (1981) a montré que dans des phrases avec un contexte neutre les participants avaient tendance à répondre plus rapidement aux mots reliés au sens dominant du mot ambigu contenu dans la phrase qu'aux mots

reliés au sens subordonné du mot ambigu contenu dans la phrase. En revanche, lorsque le contexte de la phrase était fortement prédictif (vers le sens dominant ou le sens subordonné), seul le sens vers lequel le contexte était « biaisé » semblait être sélectionné. Cette étude montre un fort effet de la fréquence du mot ambigu ainsi que du contexte de la phrase dans laquelle le mot ambigu est contenu. Dans une étude en eye-tracking, Chen et Boland (2008) ont également montré un tel effet de fréquence et du contexte. Dans leur étude, les auteurs ont présenté aux participants des phrases contenant un homophone. A la suite de cette phrase, les participants voyaient une scène visuelle contenant quatre images : une correspondant au sens subordonné de l'homophone (e.g., un nœud papillon, *bow tie* en anglais), un distracteur dont la forme correspondait à l'image du sens dominant de l'homophone (e.g., un cintre, dont la forme ressemble à un arc qui se dit *bow* en anglais) et deux distracteurs non reliés (e.g., une casserole et un ballon). La tâche des participants était d'écouter les phrases et de cliquer sur l'image qui correspond le mieux au dernier mot de la phrase (qui était un homophone). Les auteurs mesuraient les mouvements oculaires des participants et ont ainsi observé que dans les premiers instants (entre 500ms et 650ms après le début de l'homophone) les participants regardaient davantage le distracteur dont la forme correspondait à l'image du sens dominant que l'image correspondant au sens correct mais subordonné de l'homophone. De manière intéressante, les auteurs ont également observé un tel effet lorsque le contexte précédant l'homophone était biaisé vers le sens subordonné de l'homophone suggérant que cet effet de fréquence (ou de dominance) est relativement fort. En revanche, le contexte biaisant vers le sens subordonné réduisait tout de même l'activation du sens dominant soulignant un effet du contexte sur l'activation et la sélection du sens de l'homophone. Ces études montrent que le processus de sélection du sens des mots ambigus lexicalement est influencé par la fréquence des différents sens de ce mot ainsi que par le contexte dans lequel il se trouve.

Concernant les processus sous-jacents à la sélection du sens approprié de mots ambigus, il a été proposé que cette sélection se base sur un mécanisme de suppression et d'inhibition des sens non-appropriés (Gernsbacher & Faust, 1991). Selon les auteurs, à la suite de l'activation des différents sens d'un mot ambigu, il y aurait un mécanisme de suppression du sens non-pertinent. Pour appuyer leur propos, les auteurs ont réalisé une étude en formant deux groupes en fonction du niveau de

compréhension. Les auteurs ont alors comparé un groupe de participants avec un fort niveau de compréhension à un groupe avec un faible niveau de compréhension. Les auteurs ont montré dans un paradigme d'amorçage sémantique cross-modal qu'après un délai, le groupe avec un bon niveau de compréhension n'avait plus d'activation du sens non-pertinent d'un mot ambigu tandis que le groupe de faible niveau continuait d'avoir une activation des deux sens du mot ambigu. Les auteurs ont interprété ce résultat comme reflétant le fait que le groupe ayant un faible niveau de compréhension était moins performant pour supprimer l'activation du sens non-pertinent du mot ambigu. Les auteurs ont également testé ces groupes sur une tâche de suppression d'informations sémantiques visuelles en leur présentant un mot puis un mot sur une image distractive (condition mot) ou une image puis une image sur un mot distracteur (condition image). La tâche des participants était de dire si le mot présenté en premier était sémantiquement relié au second mot présenté (pour la condition image la même tâche était demandée sur les images). Les auteurs ont alors observé que le groupe de faible niveau de compréhension avait plus de difficulté à supprimer l'information non pertinente (i.e., l'image dans la condition mot et le mot dans la condition image) que le groupe avec un bon niveau de compréhension. Ce résultat suggère que la sélection du sens d'un mot ambigu pourrait se reposer sur des processus de suppression et d'inhibition non langage-spécifiques. Dans une étude de neuropsychologie, Frattali et collaborateurs (2007) ont montré que des patients avec une lésion au niveau du cortex préfrontal témoignaient d'une plus grande difficulté à supprimer le sens non approprié d'homographes comparativement à des participants contrôles. Les auteurs interprètent ce résultat comme le reflet d'un déficit des processus de contrôle d'inhibition des patients. Ainsi, il est possible que le mécanisme de sélection du sens des mots ambigus soit en partie supporté par des processus de contrôle d'inhibition généraux.

3.2. Ambiguïté syntaxique

Une ambiguïté syntaxique apparaît lorsque la structure ou l'information syntaxique d'une phrase donne lieu à plusieurs interprétations possibles. Par exemple, la phrase (1) « Le militaire a vu l'espion avec ses jumelles. » est ambiguë car le complément d'objet indirect « avec ses jumelles » peut se référer à la fois au militaire et à l'espion. Dans cet exemple, il s'agit bien d'une ambiguïté syntaxique car c'est la structure de la phrase qui induit les différentes interprétations possibles. Si l'on avait comme phrase

(2) « Avec ses jumelles, le militaire a vu l'espion », une seule interprétation de la phrase est possible n'induisant aucune ambiguïté. Cet effet d'ambiguïté obtenu est appelé dans la littérature le *Garden Path effect* qui provient de l'expression *lead down the garden path* qui signifie littéralement « mener sur le chemin du jardin » mais qui en réalité signifie « berner » ou « donner des signaux/informations contradictoires ». Cette expression reflète parfaitement l'ambiguïté découlant de ce type de phrase puisqu'en lisant ou entendant une telle phrase sans informations complémentaires on peut l'interpréter de différentes manières. Dans certaines situations, l'ambiguïté syntaxique n'est que temporaire et ce sont les informations contenues dans le reste de la phrase ou les connaissances, la situation qui vont permettre de la désambiguïser. Par exemple, dans la phrase (3) « Un journaliste questionna l'avocat de la chanteuse qui était consternée et furieuse. », lorsque l'on traite le mot « était » on ne sait pas s'il fait référence à l'avocat ou à la chanteuse. En lecture, c'est lorsque l'on rencontre le mot « consternée » que nous avons l'information nécessaire pour désambiguïser la phrase tandis qu'à l'oral c'est seulement lorsque l'on rencontre le mot « furieuse ». En effet, les indices de genre nous renseignent sur qu'est-ce que caractérise la proposition subordonnée relative. Ainsi dans ce type de situation une ambiguïté temporaire apparaît au début de la proposition subordonnée relative qui va ensuite induire une ré-analyse de la phrase si le lecteur ou auditeur a interprété dans un premier temps la proposition subordonnée relative comme se référant à « l'avocat ». Une des approches expliquant ce type de situation d'ambiguïté syntaxique est l'approche en deux étapes.

Selon les modèles en deux étapes, le traitement des phrases se ferait en deux étapes, une étape de traitement syntaxique pur puis une seconde étape d'intégration d'autres informations et de ré-analyse si nécessaire. On retrouve dans cette approche la théorie du *garden path* proposée par Frazier (1979) selon laquelle le traitement syntaxique s'effectuerait à partir des informations relatives aux catégories grammaticales des mots, permettant ainsi de former une structure syntaxique, ce sans accès aux sens des mots. Lorsque l'intégration d'un nouveau mot ou groupe de mot ne correspondrait pas avec la structure formée, cela créerait une ambiguïté syntaxique et une ré-analyse (ou révision) se mettrait en place. Selon cette approche, la première étape ne prendrait pas en compte les informations lexicales, sémantiques et pragmatiques. C'est seulement lors de la seconde étape que ces informations seraient

intégrées. Dans une étude de lecture de phrases temporairement ambiguës (de par leur structure), Frazier et Rayner (1982) ont observé que les participants avaient tendance à réviser leur première interprétation des phrases ambiguës. Ceci s'observait à travers de plus longs temps de fixation sur la partie désambiguïsante de la phrase ainsi qu'à travers des mouvements oculaires de retour sur le début de la partie désambiguïsante (voir également Frazier & Rayner, 1987). Les auteurs interprètent ces résultats comme un argument en faveur d'un traitement en deux étapes avec un premier traitement syntaxique suivi d'une révision lorsqu'une l'information désambiguïsante est rencontrée et ne correspond pas à la structure initialement construite. Ces modèles en deux étapes postulent qu'une seule structure syntaxique est construite en même temps, ce qui n'est pas le cas d'autres types de modèles.

En effet, selon les modèles dits « parallèles », « compétitifs parallèles » ou encore « constraint-based », les différentes structures syntaxiques possibles des phrases seraient activées et entreraient en compétition (M. C. MacDonald et al., 1994). De plus, selon cette approche, toutes les sources d'informations disponibles (linguistiques et non-linguistiques) sont utilisées en parallèle lors de la compréhension du langage. Ainsi, lors du traitement d'une phrase, les différentes interprétations sont activées et traitées en même temps et entrent en compétition. Une fois qu'une interprétation dépasse un certain seuil d'activation elle est sélectionnée et les autres sont désactivées. De cette manière, lorsqu'une interprétation reçoit beaucoup de support de la part des différentes informations traitées par rapport aux autres interprétations, peu de compétition apparaît menant à un traitement rapide et sans difficulté. En revanche, lorsque les différentes interprétations reçoivent un support équivalent, une forte compétition apparaît menant à des difficultés de traitement. Également, le début d'une phrase peut induire l'activation privilégiée d'une interprétation qui s'avèrera non pertinente à l'apparition d'une nouvelle information (e.g., un mot, une proposition subordonnée) traitée plus tardivement dans la phrase.

Dans la littérature, plusieurs arguments ont été avancés remettant en cause les modèles à deux-étapes mais également les modèles parallèles. En effet, un certain nombre d'études ont montré que des informations non-syntaxiques étaient traitées et utilisées très rapidement lors de la compréhension de phrases (Trueswell et al., 1993, 1994). Par exemple, MacDonald (1993) a montré dans une étude de lecture de phrases que l'information lexicale influençait le traitement de phrases syntaxiquement

ambiguës, montrant un traitement précoce des informations lexicales (voir également Trueswell, 1996). Ces études remettent en question les modèles en deux étapes puisqu'elles montrent que l'information lexicale est traitée dès les premiers instants et influence la compréhension lors de la lecture. De manière similaire, Spivey et Tanenhaus (1998) ont montré que l'information sémantique et pragmatique contenue dans le contexte de phrases influençait le traitement syntaxique de ces dernières. Dans une étude avec des mesures en eye-tracking utilisant un contexte visuel réel, Chambers, Tanenhaus, et Magnuson (2004) ont montré que le contexte visuel ainsi que les contraintes d'action modifiaient le traitement syntaxique de phrases ambiguës. En effet, dans leur étude, les auteurs présentaient aux participants des consignes auditives temporairement ambiguës telles que « Pour the egg in the bowl over the flour. » (« Versez l'œuf dans le bol sur la farine »). Ce type de phrase est temporairement ambiguë car « dans le bol » peut être considéré comme l'endroit où verser l'œuf (interprétation en termes d'objectif) alors que lorsque l'on entend « sur la farine » on comprend que la proposition « dans le bol » caractérisait l'endroit où se trouve l'œuf à verser (interprétation en termes de localisation). En même temps que les participants écoutaient les consignes, ils étaient face à un ensemble d'objets avec lesquels ils devaient réaliser l'action décrite par la consigne (voir figure 6). Les auteurs ont manipulé les objets présentés de manière à obtenir 2 conditions : une condition avec 2 référents possibles pour l'action (e.g., Panel A de la figure 5 avec deux œufs pouvant être mélangés, un dans un verre et un dans un bol) et une condition avec un seul référent possible pour l'action (e.g., Panel B de la figure 5 avec un seul œuf pouvant être mélangé). Les auteurs ont alors mesuré les mouvements oculaires des participants sur les différents objets afin d'évaluer dans quelle mesure ils considéraient l'interprétation en termes d'objectif lorsqu'ils entendaient « dans le bol » en fonction des informations présentes visuellement. Ainsi, Chambers et collaborateurs ont observé que lorsque la scène comportait un seul référent possible pour l'action, les participants regardaient davantage l'objet incorrect (i.e., le bol vide dans notre exemple) par rapport à lorsque 2 référents possibles étaient présents. Ce résultat qui suggère que les participants interprétaient différemment la proposition subordonnée ambiguë selon le contexte visuel et donc selon les contraintes d'action qui leur étaient présentées. Ce résultat démontre que les informations contextuelles et sémantiques sont prises en compte lors de la compréhension du langage, remettant en question

l'approche des modèles en deux étapes qui supposent un traitement purement syntaxique dans un premier temps.

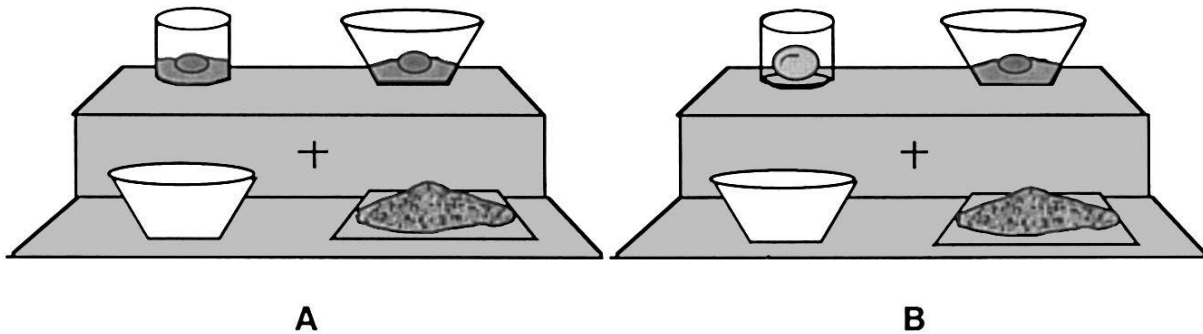


Figure 2.3 : Design expérimental de l'étude de Chambers, Tanenhaus, et Magnuson (2004)

L'approche *constraint-based* a également été remise en question par une étude de Traxler, Pickering et Clifton (1998). En effet, dans leur étude, les participants avaient pour consigne de lire des phrases totalement ou temporairement ambiguës et devaient dire à quel élément de la phrase se référait la proposition subordonnée relative induisant l'ambiguïté. Les phrases temporairement ambiguës étaient construites de manière à ce que certains éléments de la phrase favorisent une interprétation plutôt qu'une autre (en termes de plausibilité) tandis que les informations des phrases totalement ambiguës ne permettaient pas de favoriser une interprétation plutôt que l'autre. Ainsi, selon l'approche *constraint-based* les phrases totalement ambiguës devraient être plus difficiles à traiter puisque les deux interprétations possibles de ces phrases entreraient en compétition sans information pour supporter plus une interprétation que l'autre. En revanche, les phrases temporairement ambiguës ayant des éléments favorisant une interprétation plutôt que l'autre, ces dernières devraient être traitées plus rapidement. Les auteurs ont alors observé que les participants n'étaient pas plus lents pour lire les phrases totalement ambiguës que les phrases temporairement ambiguës, remettant ainsi en question les prédictions faites par les modèles *constraint-based* (voir également van Gompel et al., 2001). C'est pour ces raisons que van Gompel, Pickering, et Traxler ont proposé un modèle intermédiaire appelé le *unrestricted race model* se situant à mi-chemin entre les modèles en deux étapes et les modèles *constraint-based*. Selon ce modèle, toutes les informations peuvent être intégrées et prise en compte dans le traitement syntaxique (tout comme dans les modèles *constraint-based*) avec cependant la structure syntaxique construite

le plus rapidement qui est prise en compte (tout comme dans les modèles en deux étapes).

4. Compréhension de la parole dans le bruit

La majorité des études portant sur la compréhension du langage sont réalisées en laboratoire dans le silence et dans des conditions optimales de compréhension. Cependant, de telles situations sont davantage l'exception plutôt que la norme. En effet, dans la vie de tous les jours, nous ne comprenons que très peu le langage oral sans bruits environnants. Ainsi, les situations fréquentes de compréhension du langage sont des situations aversives. L'étude de la compréhension du langage dans le bruit est donc importante pour mieux appréhender les mécanismes de traitement du langage dans un cadre « écologique ». Jusqu'ici, nous avons employé le terme bruit de manière générique afin d'englober tout type de son pouvant s'ajouter au son de parole. A partir de maintenant, nous ferons la distinction entre la compréhension du langage dans le bruit et la compréhension du langage dans des situations de parole dans la parole. En effet, il est important de faire cette distinction car différents mécanismes vont entrer en jeu selon si le flux de parole que nous essayons de comprendre est masqué par des sons autres que des sons de parole ou s'il est masqué par un autre flux de parole.

4.1. Masquage énergétique

Traiter la parole dans le bruit donne lieu à ce que l'on appelle un masquage énergétique. Le masquage énergétique apparaît lorsqu'il y a un recouvrement dans le temps et en termes de fréquence du signal de parole par le bruit (Brungart, 2001). Un tel masquage va recouvrir entièrement ou partiellement certaines portions du flux de parole empêchant complètement ou partiellement d'entendre ces portions. Traiter la parole dans le bruit va donc mener à un recouvrement de certains sons qui va venir perturber les processus de traitement du langage. Traiter la parole dans la parole (ce qui est le cas dans les situations dites « cocktail party ») va mener à un masquage énergétique puisque certains sons de parole vont se recouvrir dans le temps et sur une même fréquence mais va également mener à un masquage dit informationnel. Le masquage informationnel correspond à un recouvrement entre l'information contenue

dans le flux de parole distracteur et le flux de parole d'intérêt (Brungart, 2001; Brungart et al., 2001). Dans une situation de parole dans la parole, Brungart, Chang, Simpson, et Wang (2006) ont montré que le masquage énergétique jouait un rôle mineur dans le traitement du langage.

4.2. Masquage Informationnel et parole dans la parole

En ce qui concerne le masquage informationnel, il semble apparaître à différents niveaux linguistiques. Au niveau phonologique, Varnet, Meyer, Hoen, et Meunier (2012) ont notamment montré que des flux de parole avec 4, 6 et 8 voix en parole normale ou en parole inversée perturbaient davantage l'identification de phonèmes qu'un bruit de fond. De plus, les auteurs ont observé qu'un masquage avec 4 voix impactait plus le traitement phonologique que lorsque plus de voix étaient présentes. Au niveau lexical, à l'aide d'une tâche de décision lexicale, Boulenger et collaborateurs (2010) ont observé une interférence entre le contenu lexical d'un masque de parole à 2 voix et le signal de parole d'intérêt. De plus, cet effet d'interférence était plus fort lorsque les mots contenus dans le masque de parole étaient de haute fréquence comparativement à des mots de faible fréquence. Ces résultats suggèrent que le masquage informationnel agit également au niveau lexical, ce d'autant plus lorsque les informations contenues dans le masque sont identifiables et donc avec peu de voix distractrices (voir également Hoen et al., 2007; Van Engen & Bradlow, 2007). Cependant, dans cette étude les auteurs ont également montré que l'augmentation du nombre de voix dans le masque de parole réduisait l'intelligibilité et interprètent ce résultat comme la conséquence de l'augmentation du recouvrement spectral entre le signal du masque et le signal d'intérêt (voir également, Simpson & Cooke, 2005). Dekerle, Boulenger, Hoen, et Meunier (2014) ont montré que le masquage informationnel agissait également au niveau sémantique. En effet, dans leur étude, les auteurs ont observé un effet d'amorçage d'un masque de parole avec plusieurs voix sur une tâche de décision lexicale. Ainsi, il semblerait que l'information sémantique contenue dans les flux de parole du masque soit traitée et influence le traitement linguistique d'intérêt. La question qui se pose est donc : quels sont les processus cognitifs permettant de sélectionner l'information pertinente lorsque nous comprenons du langage dans du bruit ou dans de la parole ?

Tout d'abord, certaines caractéristiques du ou des flux de paroles interférant vont parfois faciliter la discrimination entre le flux d'intérêt et les flux distracteurs. Par exemple, il a été montré que l'interférence des flux de parole prononcés dans une langue différente était réduite comparativement à des flux distracteurs prononcés dans la même langue (Van Engen & Bradlow, 2007). De manière similaire, il semblerait que l'information spatiale concernant chaque voix permette également de faciliter le traitement de la parole dans la parole (Misurelli & Litovsky, 2015; Yost, 2017). Les informations de genre (Brungart, 2001) et de nationalité des locuteurs (Freyman et al., 2001) permettrait également de mieux discriminer les différents flux de parole et donc d'être moins impacté par le masquage. Cette meilleure discrimination des informations permettrait ainsi de mieux sélectionner l'information pertinente et inhiber les informations non-pertinentes pour la compréhension du langage.

Dans la littérature, on retrouve quelques arguments suggérant un soutien des processus exécutifs pour une telle inhibition des informations non pertinentes en situation de parole dans la parole. En effet, Perrone-Bertolotti, Tassin et Meunier (2017) ont notamment observé une corrélation entre les performances de contrôle cognitif de participants et leurs performances dans une tâche d'amorçage sémantique cross-modal dans une situation de parole dans la parole. Leurs performances de contrôle cognitif étaient évaluées à l'aide de trois tâches et mesuraient les capacités de suppression d'informations non pertinentes, de flexibilité et d'inhibition. Pour ce qui est de la tâche de décision lexicale, les participants voyaient une suite de lettres en même temps qu'ils devaient écouter un flux de parole sur deux flux présentés (i.e., situation de parole dans la parole) et devaient dire si cette suite de lettres était un mot ou un pseudo-mot. Une amorce était présentée soit dans le flux de parole sur lequel les participants étaient attentifs soit sur le flux de parole inhibé par les participants. Ainsi, les auteurs ont observé un effet d'amorçage uniquement dans la condition où l'amorce était présentée dans le flux de parole sur lequel les participants étaient attentifs. En revanche, les auteurs ont observé une corrélation négative entre les performances de contrôle cognitif et l'amorçage sémantique en condition d'amorce présente dans le flux inhibé. Les auteurs interprètent ce résultat comme reflétant l'implication des processus exécutifs lors que l'écoute de parole dans la parole. En effet, plus les performances de contrôle cognitif des participants étaient élevées moins l'effet d'amorçage était présent. Cela indique que de bonnes performances en contrôle

cognitif permettent une attention plus importante sur le flux de parole pertinent et ce grâce à la capacité d'inhiber les informations non pertinentes. Récemment, Tierney, Rosen, et Dick (2020) ont également montré dans une étude corrélacionnelle que les participants ayant de meilleures performances d'attention sélective et d'inhibition étaient meilleurs pour percevoir un flux de parole parmi d'autres flux de parole. Ces études suggèrent une implication de processus de contrôle exécutif lors de la compréhension du langage dans des situations de parole dans la parole pour inhiber les informations non pertinentes.

En résumé

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à différents mécanismes qui permettent d'expliquer le traitement très rapide du langage oral. Ces mécanismes semblent faire partie intégrante des processus de compréhension du langage, reflétant probablement le résultat de l'omniprésence du langage dans la vie de tous les jours. Ensuite, nous nous sommes penchés sur les situations lors desquelles la compréhension est plus difficile, soit par des ambiguïtés linguistiques, soit par des difficultés contextuelles. Nous nous sommes ainsi centrés sur les situations d'ambiguïtés linguistiques (lexicales et syntaxiques) et les situations de traitement du langage dans le bruit ou dans la parole. Il semblerait donc que dans de telles situations les mécanismes de prédiction ainsi que les traitements habituellement automatiques ne permettent pas une compréhension optimale. Il est proposé dans la littérature que dans des situations aversives ou complexes de compréhension certains processus non-langagiers participent au traitement de l'information. Par exemple, nous pourrions supposer qu'un recrutement plus important au niveau attentionnel, ainsi qu'au niveau du contrôle inhibiteur, puisse être nécessaire lors de la compréhension du langage dans le bruit, et ceci afin de permettre une focalisation sur les éléments importants du signal et faire abstraction des éléments non pertinents. De la même manière, une phrase linguistiquement complexe pourrait nécessiter davantage de ressources en mémoire de travail et de flexibilité mentale afin de parvenir à saisir et unifier le sens. Dans le prochain chapitre, nous approfondirons ce postulat concernant le contrôle cognitif, ses composantes ainsi que les différents arguments supportant l'hypothèse de son implication dans la compréhension du langage oral.

3

Chapitre 3 : Contrôle cognitif et compréhension du langage

Le contrôle cognitif, également appelé par certains auteurs fonctions exécutives, fait référence à l'ensemble des processus de haut niveau guidant notre attention, nos pensées et nos actions conformément à nos buts (Friedman et al., 2006; Miyake & Friedman, 2012). En d'autres termes, le contrôle cognitif est le système qui permet d'organiser notre comportement au regard de nos objectifs. Une des caractéristiques du contrôle cognitif est son aspect contrôlé (Schneider & Chein, 2003). En effet, la capacité à effectuer et sélectionner une action au regard d'un but précis plutôt que de réagir de manière automatique à un stimulus est ce qui définit le contrôle cognitif (Schneider & Chein, 2003). En d'autres termes, le contrôle cognitif sera engagé dès lors qu'un but apparaît et qu'un traitement non-automatique est réalisé. Ce contrôle se distingue des processus automatiques qui vont avoir lieu en réponse à un stimulus et qui vont parfois être réalisés sans que la personne en ait la volonté. En revanche, les processus de contrôle cognitif ont lieu de manière consciente et contrôlée (K. B. MacDonald, 2008).

Au niveau cérébral, un certain consensus émerge dans littérature concernant le rôle du cortex préfrontal dans les processus de contrôle cognitif. En effet, ce consensus est le reflet d'études en neuroimagerie montrant une activation des régions

préfrontales lors de tâches nécessitant du contrôle cognitif (e.g., Collette et al., 2006; Smith & Jonides, 1999) et d'études de neuropsychologie chez des patients ayant une lésion au niveau du cortex frontal et montrant de faibles performances à des tâches de contrôle exécutif (Owen et al., 1990; Shallice, 1982). Plus récemment, il a été montré que les fonctions exécutives sont soutenues non seulement par les régions préfrontales mais également par un large réseau fronto-pariétal (Collette et al., 2006; Koechlin & Summerfield, 2007). Par exemple, dans une étude en IRMf chez des participants âgés, Newman, Carpenter, Varma, et Just (2003) ont montré une certaine spécificité des régions frontales et pariétales avec les régions préfrontales droites impliquées dans la planification, les régions préfrontales gauches davantage recrutées lors de l'exécution et les régions pariétales supérieures droites impliquées dans les processus d'attention. Cette distinction reflète la diversité des processus compris sous le nom de contrôle cognitif.

En effet, une des principales raisons pour lesquelles le contrôle cognitif est souvent appelé de différentes manières est qu'il fait références à plusieurs processus de contrôle, plusieurs fonctions. Différentes propositions de décomposition du contrôle cognitif ont été proposées. Par exemple, Lezak (1982) a notamment proposé que le contrôle cognitif était composé de 4 fonctions distinctes : la formulation de l'objectif, la planification de l'action au regard de cet objectif, l'implémentation pratique des actions, et la réalisation. Dans une étude comportementale, Miyake et collaborateurs (2000) identifient quant à eux trois principales composantes du contrôle cognitif : l'inhibition, la mise à jour en mémoire de travail, et la flexibilité. Dans leur étude, Miyake et collaborateurs se sont intéressés à ces trois composantes et ont évalué dans quelle mesure ces composantes étaient dissociables les unes des autres mais également si un mécanisme commun apparaissait. Pour cela, les auteurs ont demandé à des participants de réaliser un ensemble de tâches mesurant chacune des composantes présentées précédemment et ont mis en relation les performances obtenues entre chaque tâche. Les résultats de cette étude ont montré que les trois composantes testées étaient distinctes et séparables mais comportaient une certaine unicité. Diverses autres fonctions sont proposées dans la littérature comme l'attention soutenues et l'attention sélective (Robertson et al., 1997) ou encore la fluence verbale, la résolution de problèmes (V. Anderson, 2008). La séparabilité de certaines fonctions exécutives a également été observées chez des patients cérébro-lésés. En effet,

Shallice et Burgess (1996) ont notamment observé une double dissociation chez certains patients avec un déficit en termes d'inhibition mais aucun déficit de détection de règles et inversement. L'ensemble de ces observations et postulats concernant les différentes fonctions du contrôle cognitif laisse en suspens la question de l'unicité du contrôle cognitif. Bien que Miyake et collaborateurs (2000) aient observé une certaine unicité au sein des composantes de contrôle cognitif qu'ils ont étudiées, la multitude d'études et de modèles observant diverses fonctions du contrôle cognitif ainsi que les différentes activations cérébrales tendent à pencher vers une séparabilité des processus de contrôle cognitif. Cependant, le fait qu'autant de processus exécutifs différents soient observés questionne sur leur validité de construit. En effet, ces fonctions sont en réalité très arbitraires bien que parfois consensuelles. Par exemple, MacLeod et collaborateurs (2003) ont montré que le processus d'inhibition, qui est un des processus de contrôle cognitif ayant un fort consensus dans la littérature, pouvait être intégralement interprété en termes d'activation supprimant ainsi le besoin d'une telle fonction exécutive.

Un autre problème relevé dans la littérature est celui de la « pureté » des tâches de contrôle exécutif. En effet, les tâches évaluant le contrôle cognitif impliquent nécessairement d'autres processus cognitifs non exécutifs. Ainsi, certaines tâches évaluant une fonction spécifique selon des chercheurs sont parfois considérées comme évaluant une autre fonction selon d'autres chercheurs. C'est le cas par exemple de la tâche des Tours de Hanoï. Dans cette tâche, une tour d'un certain nombre de disques de différents diamètres (le nombre de disques varie en fonction de la difficulté souhaitée) est constituée à un premier emplacement, la consigne étant de déplacer la tour à un deuxième emplacement en déplaçant les disques un par un et avec comme seule restriction de ne pas pouvoir déplacer un disque sur un disque plus petit. Selon Zelazo et Müller (2002) cette tâche mesure de manière « pure » la planification tandis que selon Miyake et collaborateurs (2000) elle mesure l'inhibition. Ainsi, l'évaluation de fonctions exécutives « pures » est impossible et on peut également se demander dans quelles mesures l'évaluation d'une fonction par deux tâches différentes serait comparable quand pour une même tâche les interprétations et fonctions supposées être mesurées ne sont pas les mêmes entre chercheurs.

Dans le chapitre précédent, nous avons discuté de l'aspect automatique et prédictif de la compréhension du langage, ce qui, selon la définition du contrôle cognitif donnée, ne laisserait pas de place pour une quelconque implication directe du contrôle cognitif lors de la compréhension du langage. Cependant, nous avons également passé en revue différents types de situations lors desquelles la compréhension n'était plus automatique laissant supposer que des processus de contrôle cognitif pourraient entrer en jeu dans de telles situations. Le reste de ce chapitre présentera des arguments montrant dans quelle mesure les processus de contrôle cognitif sont impliqués lors de la compréhension du langage au cours du développement, de l'âge adulte et du vieillissement.

Ce chapitre théorique fait l'objet d'un article de revue soumis reformaté pour les besoins de ce manuscrit. Source : El Bouzaïdi Tiali, S., & Perrone-Bertolotti, M. (2021). A lifespan perspective of cognitive control involvement during language comprehension. <https://doi.org/10.31234/osf.io/r8y3d>

A lifespan perspective of cognitive control involvement during language comprehension

Abstract

A fundamental question is whether language comprehension involves specific cognitive mechanisms to decode linguistic information, or whether language comprehension occurs through the interaction with other specialized cognitive systems. Accumulated behavioral and neuroimaging evidence suggests that, in several situations, the language system interacts with the executive control system. In the same time as brain maturation and learning, language comprehension and cognitive control abilities are changing through the different periods of life. In this article, we review behavioral, neuroimaging and neuropsychological evidences of a close relationship between language comprehension and cognitive control with a lifespan approach. Most evidence proposed in this article are in monolingual populations but a consideration of the specific case of bilingualism is made. We propose that a better specification and comprehension of the interaction between language and cognitive control abilities could improve understanding of language mechanisms and its deficits and also open new avenues to develop better rehabilitation programs.

1. Introduction

Language comprehension corresponds to the process that goes from an auditory or visual input to a complex representation that carries a specific meaning. Information processing during language comprehension is not just linguistic. Indeed, comprehension processing implies the integration of linguistic and non-linguistic information as well. For instance, when we are listening to someone, we are taking into account his/her identity (Van Berkum et al., 2008), state of mind, emotional expressions (Nygaard & Lunders, 2002), the visual context in which the conversation takes place (Tanenhaus et al., 1995) and so on, in order to correctly interpret what this person is telling us. The complexity of language comprehension is related with the requirement of the integration of such different sources of information in a very short time window in case of oral language. The integration of that information allows successful interpretation and subsequently the possible response execution (endogenous or exogenous), which is the ultimate goal of comprehension. Most of the time, all of this information converges to allow the rapid understanding of a sentence/discourse meaning. The weight given to each of this information depends not only on task and situation demands but also on other factors such as context (linguistic and non-linguistic) and individual constraints (cognitive development, brain maturation, and knowledge/experience). Nevertheless, the ponderation of each of these information remains to be specified and currently no theoretical model includes all of these features. Furthermore, the manner in which all of this information is integrated remains a subject of debate in terms of cognitive mechanisms and brain substrates (Fedorenko, 2014; Friederici, 2011; Hagoort, 2005, 2013).

Cognitive processes at work during processing of all this linguistic and non-linguistic information is debated. For a long time, it has been proposed that we have a language module, independent from other cognitive processes, that takes care of all aspects of language processing (Chomsky, 1980; Fodor, 1983). This proposal suggested that every linguistic material is processed by the language module and that this module resolves all types of ambiguities and difficulties during language processing by itself. However, more recent views have grounded language in interaction with other cognitive processes. In fact, there is extensive literature with behavioral and neuroimaging evidence showing that language mechanisms are

working hand in hand with the motor system (Glenberg & Gallese, 2012; Hickok & Poeppel, 2004; Pulvermüller et al., 2014). Similarly, it has also been shown that cognitive control processes are involved during language comprehension (Fedorenko & Thompson-Schill, 2014; Hagoort, 2013; Musz & Thompson-Schill, 2017), questioning the modular view of language. For example, Mirman and Britt (2014) proposed a strong relationship between language and cognitive control. Specifically, they suggested that hearing a word will activate multiple lexical candidates that compete with each other. In order to select the correct candidate, the authors propose that an inhibitory process would take place to inhibit non-pertinent ones. Language and cognitive control are processes that are known to develop over a long period of time. Moreover, these processes evolve throughout lifespan suggesting that their interaction is also changing from early age to aging (Isel & Kail, 2019). Understanding this development and evolution is of particular interest in order to better understand language comprehension mechanisms but also to be able to better adapt possible rehabilitation methods according to age and other cognitive processes. In this review, we focus our attention on the close relationship between language processing and cognitive control mechanisms. We adopted a lifespan point of view in which we describe evidence of the involvement of cognitive control during language development, adulthood, and aging.

2. What do we mean by cognitive control?

Cognitive control (also known as executive control or executive functions by several authors) refers to high level processes that guide our attention, thoughts, and actions in line with our goals (Friedman et al., 2006; Miyake et al., 2000; Miyake & Friedman, 2012). In this article, we will consider the terms cognitive control, executive control, and executive function interchangeably. Cognitive control encompasses different processes such as inhibitory control, selective attention, flexibility, updating in working memory, planning, conflict resolution (see also Diamond, 2013; Lehto et al., 2003; Miyake et al., 2000; Smith & Jonides, 1999). Most authors have proposed that cognitive control processes are required in novel and difficult situations (Diamond, 2013), nevertheless others authors suggested that cognitive control is required in all tasks whenever specific instructions are asked (P. Anderson, 2002). Anderson (2002) proposed a model of cognitive control including four distinct domains: attentional

control, information processing, cognitive flexibility, and goal setting (see Diamond, 2013; Miyake et al., 2000 for other propositions). According to the author, these domains encompass distinct functions but operate together to respond to task demands. On a cerebral level, cognitive control is supported by a fronto-parietal network (Cole & Schneider, 2007; Collette & Salmon, 2014; Dehaene et al., 2015; Miller & Cohen, 2001; Seeley et al., 2007 see Alvarez & Emory, 2006 for a review of brain regions involved in executive processes) also called multiple-demand system (Duncan, 2010 see also Camilleri et al., 2018). Other authors suggested that cognitive control is supported by two different top-down neural systems, the fronto-parietal system and the cingulo-opercular systems (Dosenbach et al., 2007). In this model, both systems maintain task relevant information but each one with different purposes and using different mechanisms. The fronto-parietal component seems to initiate and adjust control, related with adaptive control, while the cingulo-opercular system provides stable set-maintenance over entire task epochs. These two systems were shown to communicate with the fronto-parietal network sending rapid control initiation and adjustment to the cingulo-opercular system. On the other hand, the cingulo-opercular network seemed to maintain goal-directed behavior over longer periods of time.

Cognitive control is subject to many changes during the lifespan with improvement of executive control abilities in childhood until adulthood and then a decline in such abilities with aging (Fournernet & des Portes, 2016; Zelazo et al., 2004). These changes are related with brain maturation, cognitive development and also with the acquisition of experiences and knowledge. For example, performances of children between 3 and 5 years old on the well-known Wisconsin Card Sorting Test reflect such development of executive processes, in particular on cognitive flexibility. In fact, the Wisconsin Card Sorting Test requires participants to sort cards in regards to a specific criterion (or dimension, e.g., color) for several trials and are then asked to switch to another criterion. It has been shown that children around the age of 3 and 4 years old tend to perseverate in the way they sort cards even when the sorting criteria has changed while children around 5 succeed in switching between sorting criteria (Doebel & Zelazo, 2015). The development of executive control has been closely linked to the maturation of the prefrontal cortex (V. Anderson et al., 2008) which start early, and slowly becomes mature only in early adulthood (Casey et al., 2000; Gogtay et al.,

2004). If we take a look into executive processes at stake during development, we observe that attentional control processes might start developing early with some premise of inhibitory control around the age of 12 months while information processing emerges at around two years old, cognitive flexibility around three years old and goal setting around four (P. Anderson, 2002; V. Anderson et al., 2008). Cognitive control has been shown to develop throughout childhood (Davidson et al., 2006) and continue until early adulthood (Casey et al., 2008).

It is observed that cognitive control performances decline during aging, with several studies showing lower cognitive control abilities among older adults than among young adults (e.g., Brockmole & Logie, 2013; Rhodes, 2004). Recently, Ferguson, Brundson, & Bradford (2021) showed such evolution and modification of executive control abilities throughout lifespan by testing 350 participants from 10 to 86 years old on tasks evaluating working memory, inhibitory control, flexibility and planning. Participants also underwent an IQ evaluation. Taking IQ score into consideration, authors observed an increase in inhibitory control performances from adolescence to adulthood followed by a decline in such performances after the age of 35 approximately. A similar pattern was observed for working memory assessment with a decline starting at the age of 30. Finally, in terms of planning, their experiment revealed an increase in planning abilities from adolescence to adulthood with a decline during adulthood and a small increase with aging. Thus, age seems to be an important factor when studying cognitive control. Indeed, cognitive control abilities increase during childhood until early adulthood, stay stable during adulthood and then decline in aging. Another factor that has been shown to play a role in cognitive control abilities is experience and especially experience with language. Indeed, extensive literature exists on the relationship between bilingualism and executive control processes as bilingualism seems to influence and modify executive control development and its relationship with language processes (see bilingualism section).

3. Cognitive control and language comprehension during cognitive development

As previously suggested, how language develops and whether its development is based on domain specific processes only or in relation with domain-general abilities is a matter of debate for several decades (Barrett, 1999). In fact, to what extent domain-

general cognitive control processes are involved in language development is discussed in the literature and a link between language development and executive control processes has been proposed for preschool children (Carlson et al., 2005; Carlson, Mandell, et al., 2004; Diamond, 2016; Gooch et al., 2014, 2016; Mazuka et al., 2009; Müller et al., 2001; Yang & Gray, 2017). Interestingly, Weiland, Barata, & Yoshikawa (2014) showed that executive control performances such as working memory, attentional control, and inhibitory control in early preschool predicted performances in language receptive abilities in late preschool. Working memory seems to be an important executive control component for language acquisition. For example, Vugs and collaborators (2016) proposed that low working memory abilities would constrain lexicon acquisition due to low capacity to simultaneously process and stock verbal information. Moreover, working memory performances of children have been shown to be a good predictor of language ambiguity processing (Just & Carpenter, 1992; Just & Varma, 2002; M. C. MacDonald et al., 1992). It is important to note that language impairments are usually associated with low verbal short term memory abilities as suggested by tasks requiring repetition of words or sentences (Bishop, 2006).

The relationship between language development and cognitive control has mostly been studied in light of language impairment (Bishop et al., 2014; Bishop & Norbury, 2005). Bishop, Nation and Patterson (2014) proposed three theoretical patterns of causal relationship between language impairment and executive control: (i) executive control influences language processing, (ii) language processing influences executive control or (iii) a third process influences both language and executive control. Gooch et al. (2016) propose an alternative view according to which interaction between language and executive processes can change over time. This view is more probable as development is not a linear and regular mechanism. In fact, both language and executive processes development occurs in parallel from birth to adulthood and at some point language processing might rely on executive processes while at another point the reverse influence might be at stake. For example, “inner-speech” might help executive processing as suggested by Barkley (1997, see also (Perrone-Bertolotti et al., 2014). However, most of the studies on the relationship between language and executive control process are correlational studies (e.g., Carlson, Moses, et al., 2004; León et al., 2018) that cannot bring evidence for any directional relationship.

Understanding this relationship is of particular interest in that it could help predict language and/or executive control difficulties (by training programs for instance) but also help understand processes at play during language comprehension. The involvement of cognitive control in language can be conceptualized at different levels. In fact, on a general level, executive control processes are likely to help language processing by directing attention to pertinent information, inhibiting surrounding noises and non-pertinent information, and sustaining a goal. At a more detailed level, cognitive control is likely to be involved in the core processing of language. Mirman and Britt (2014) support this latter view and postulate that cognitive control is part of the comprehension process and more specifically during semantic control. According to the authors, the selection of the correct meaning and the control over semantically related meanings could be supported by executive processes and more specifically in part by inhibition processes. Thus a deficit in executive processes could explain a deficit in language processing. Even in typical development, it is possible at a particular time point that executive processes are not developed enough to allow an optimal semantic control, leading to comprehension difficulties.

During language processing, difficulties also come from ambiguity. In fact, ambiguities are ubiquitous in oral language comprehension and seem to require additional processing. The nature of this processing is still under debate but some authors have suggested that executive functions are helping deal with ambiguity. Woodard, Pozzan, and Trueswell (2016) were interested in this hypothesis and assessed executive control performances and the ability to resolve ambiguity of children (from four to 10). They observed that children between four and six had difficulties revising a first misinterpretation of an ambiguous sentence. More importantly, the authors observed a correlation between performances on ambiguous sentences and on executive function nonlinguistic separate tasks (Flanker and Card Sort tasks). Thus, inhibition and flexibility seem to be relevant processes during ambiguity resolution as it requires to inhibit automatic processing of language and adaptation to the situation (see also Trueswell et al., 1999; Weighall, 2008).

Several studies have been able to predict language processing performances among children from executive performances. In fact, Ibbotson and Kearvell-White (2015) tested children on a nonverbal Stroop task (Sun-Moon task,

known to assess inhibitory processes), a vocabulary task and a Past Tense task (assessing grammatical abilities). The authors showed that performances to the Stroop task was a better predictor of grammatical abilities than vocabulary performances. They interpreted this result as evidence of a common inhibitory process involved in both grammar processing and Stroop like processing. In a large-scale study involving 18000 kindergartners, Chang (2020) showed that executive control performances predicted reading comprehension with a mediation of language comprehension and fluency. Children's cognitive flexibility, inhibitory control and working memory were assessed in order to test which executive control components most accounted for reading comprehension performance predictions. The author observed that working memory was the cognitive control component that contributed most to reading comprehension predictions (see Kaushanskaya et al., 2017; Weiland et al., 2014). These studies suggest a close relationship between language and executive control development. It is important to better understand this relation as it might be of huge help in establishing a diagnostic of developmental language impairments and allow developmental rehabilitation programs. Developmental language impairments are defined as language comprehension and/or production difficulties in the absence of sensorial, neurological, intellectual deficits or other known developmental disorders (Bishop et al., 2016). Many studies report domain-general deficit as well as lower executive function abilities among children with language difficulties during language acquisition and development (Bishop & Norbury, 2005; Gooch et al., 2014; Wittke et al., 2013) highlighting the relevance of the evaluation of this relationship.

It is possible that during development, at the beginning, language comprehension requires executive control processes in order to process inputs in an efficient way as knowledge about language and prediction are poor, and language processing is not automatic yet. Then, the more language is processed and developed the less the need for executive control support as experience and knowledge about language grows, predictions are getting more accurate and language processing becomes automatic. This evolution of the relation between language processes and executive processes might be at stake until we become experts in language processing. Thus in adulthood, executive control might appear to play a role in language processing only when language inputs are ambiguous, complex, degraded or when different information are incongruent or incomplete.

4. Cognitive control and language comprehension in adulthood

In adulthood, cognitive control has been hypothesized to be involved in language comprehension when language comprehension is difficult, complex or with degraded inputs. This hypothesis emerged with the neuroimaging study of Thompson-Schill, D'Esposito, Aguirre, and Farah (1997) in which the authors proposed a new interpretation of left inferior frontal gyrus' (LIFG) activation during language processing thus far interpreted as supporting semantic retrieval. Indeed, Thompson-Schill and collaborators proposed that the LIFG supports selection of information rather than semantic retrieval. In their study, the authors manipulated the degree of selection and semantic retrieval in three tasks (a generation task, a classification task, and a comparison task). They showed that LIFG activity increased with selection demands but not with semantic retrieval demands supporting their hypothesis regarding the role of the LIFG (see also Novick et al., 2005, 2010; Thompson-Schill et al., 2005). This hypothesis is in line with the developmental view of Mirman and Britt (2014) described above suggesting that semantic control is supported by domain-general inhibitory processes. In other words, when listening to a sentence, we are continuously selecting correct meanings of words by inhibiting non pertinent ones. Thus, these authors postulated that when selection demand increases, that is to say when multiple meanings are activated and there is a need to select one, domain-general inhibitory processes participate in such a selection by inhibiting non pertinent meanings (see Musz & Thompson-Schill, 2017). However, when selection demands are low, inhibitory processes would not be recruited as our language system can process inputs in an automatic way without the need of a supplementary executive process.

The role of the LIFG has been extensively studied in the domain of language and cognitive control as it has been shown to be recruited during both language (Grodzinsky & Santi, 2008; Hagoort, 2005) and executive control processing (Swick et al., 2008; Thompson-Schill et al., 2002). The function of the LIFG has also been part of the debate on the "domain-specificity" or "domain-generality" of the language system. Indeed, some authors postulate that the language system is specific (Fedorenko, 2014; Friederici, 2020; Shain et al., 2021; Wehbe et al., 2020) and that distinct subregions of the LIFG are supporting language and the multiple demand

system (Fedorenko & Blank, 2020). On the other hand, other authors proposed that the involvement of the LIFG during language processing relies on domain-general processes and appears in difficult or conflicting language situations (Musz & Thompson-Schill, 2017; Novick et al., 2005, 2010; Thompson-Schill et al., 2005; Ye & Zhou, 2008 see Key-DeLyria & Altmann, 2016; Ye & Zhou, 2009 for a review).

Vuong and Martin (2011) carried out a neuropsychological experiment supporting this latter view (see also Novick et al., 2009). The authors measured performances of two patients exhibiting executive function deficit following a LIFG lesion in a denomination task. During this task, patients had to denominate a word that followed a sentence inducing or not an ambiguity between different meanings of the subsequent word. Patients had difficulties to denominate a word when the previously presented sentence induced a lexical ambiguity. This result suggests that a deficit in executive control can lead to an impairment in language processing and more specifically in selection of a correct meaning among different possibilities (i.e., semantic control). Such semantic control usually recruits automatic inhibitory processes in the sense that most of the time it does not reach a conscious state of selection between different activated meanings. Hence, this cognitive control involvement is so embedded in fast and ubiquitous processing that it is very hard to observe on a behavioral level among healthy adults.

The study of homophones and homonyms gives insight into processes at work during semantic control. Indeed, homophones and homonyms both carry several meanings, thus their processing leads to a need for pertinent meaning selection and for non-pertinent meaning inhibition. When encountering such a word, if not neutral, previous context of the sentence is known to guide processing toward one meaning (Altmann & Kamide, 1999; Millotte et al., 2008; Van Berkum et al., 2005). In the case of a context biasing toward the correct meaning of the homophone or homonym, selection of the correct meaning is facilitated as context primes on a semantic level. However, inhibition of the incorrect meaning might still be needed because homophones and homonyms are known to activate both meanings regardless of the context (Seidenberg et al., 1982; Tanenhaus et al., 1979). When the context is neutral it has been argued that the dominant meaning of the homophone or homonym is activated longer and more quickly than the subordinate one (G. B. Simpson & Krueger,

1991). This type of situation can create temporary ambiguities when the context is neutral with the correct meaning being the subordinate one or when the context is biased toward the non-pertinent meaning (Chen & Boland, 2008). In fact, if the previous context bias toward the wrong meaning of the homophone or homonym it might lead to an incorrect first interpretation (i.e., incorrect syntactic parsing, or semantic processing) that need to be revised when encountering the end of the sentence. Rodd, Johnsrude and Davis (2010) showed that in this type of situation revision of the first interpretation of a sentence relied on executive control processes. Authors presented ambiguous (containing a homophone) and unambiguous sentences to participants who conjointly performed a case-judgment task (i.e., decide whether a presented letter is in upper or lower case). Three experimental types of disambiguation were manipulated with a priori disambiguation from previous context, immediate disambiguation from the word following the homophone, and a delayed disambiguation from the end of the sentence. Evaluation of the interference effect between the case-judgment task and the disambiguation condition allowed researchers to evaluate whether sentence processing relied on the same cognitive processes as the case-judgment task. Participants exhibited an interference effect on the case-judgment task for the delayed disambiguation condition only. This result suggests that revising temporary ambiguity from homophone processing requires executive control resources. Studies including patients with aphasia also reveal an involvement of executive control during language comprehension and in relation with difficulties inhibiting semantic associations (Noonan et al., 2010). Knowing that, Hoffman, Rogers and Lambon Ralph (2011) asked patients with aphasia to perform a synonym judgment test and observed a frequency effect only when semantic diversity of words was taken into account. This result suggests that inhibitory processes are involved during language comprehension as diverse words have more related meanings as well as more semantic associations that need to be inhibited in the synonym judgment task.

Semantic control is not the only process of language comprehension in which executive control has been hypothesized to play a role. Many studies interested in the comprehension process focused on ambiguity resolution and more generally on non-canonical sentence processing. In fact, non-canonical sentences are known to be more difficult to process and usually need additional processing. To what extent this additional processing relates to domain-general or domain-specific processes is still

under debate (Ryskin et al., 2020). This debate has mostly been studied from a neuroimaging perspective with a particular interest in the left inferior frontal gyrus as this region is known to support domain-general (Alvarez & Emory, 2006; Dehaene et al., 2015; Duncan, 2010) as well as language specific processes (Caplan et al., 1998; Christensen, 2010; Fiebach et al., 2004; Just et al., 1996; Mason et al., 2003; A. J. Newman et al., 2001; Ni et al., 2000; Zhu et al., 2009). For example, January, Trueswell, and Thompson-Schill (2009) observed an overlap in the posterior LIFG during syntactic (e.g., ambiguous sentences) and non-syntactic conflicts (e.g., Stroop conflict). Similarly, Ye and Zhou (2009a) observed activations of similar brain regions during executive control tasks (Flanker and Stroop tasks) and a language comprehension task inducing incompatibility between several interpretations (see also Musz & Thompson-Schill, 2017; van de Meerendonk et al., 2013; Ye & Zhou, 2008). These studies suggest an involvement of cognitive control processes when comprehension is difficult and requires additional processing in order to manage ambiguity (see also Engelhardt et al., 2017; Mendoza et al., 2021). However, some researchers did not observe such domain-general involvement and postulate that executive processes involved during language comprehension are specific to language (Ben-Shachar et al., 2003; Blank et al., 2014; Diachek et al., 2020; Fedorenko, 2014; Fedorenko et al., 2011).

On a behavioral level, Hsu and Novick (Hsu & Novick, 2016), observed a causal link between executive function and language processing. In fact, they used temporary ambiguous sentences in a dual task paradigm with a language comprehension task and a Stroop task to evaluate the effect of executive control activation on syntactic ambiguity resolution. The authors observed better syntactic resolution after an increase in cognitive control load from the Stroop task than after no such increase. This result supports the view of an involvement of executive control processes during syntactic resolution and more generally during non-canonical sentence processing. Thothathiri, Asaro, Hsu and Novick (2018) used a similar experimental design with passive and active sentences instead of syntactically ambiguous and unambiguous sentences. They observed the same facilitatory effect for passive sentence processing when they were preceded by a demanding executive control condition (see also Kan et al., 2013). However, whether this involvement of executive functions during language processing is domain-general or domain-specific remains unclear and these

studies do not allow to clearly state for one or another view. Indeed, because the executive task used in these studies is a verbal Stroop task, it can be argued that conflict arising from incongruent conditions is language specific and so executive control involvement would not be considered as domain-general. To test this claim, the same team of researchers (Hsu et al., 2020) recently replaced the Stroop task by a non-verbal Flanker task in their interleaved task paradigm. Results of their first experiment with classic Flanker trials showed a similar facilitatory effect as observed in Hsu and Novick (2016). Hsu and collaborators hypothesized that this facilitatory effect arises from conflict detection. To test this hypothesis, they manipulated the type of Flanker trials preceding the language comprehension trials. They observed a facilitatory effect only when Flanker trials involved conflict detection (i.e., a classic Flanker conflict or a representational conflict provoked by a visual input degradation) compared to when there was an increase in attentional demands (i.e., with prolonged attention trials) or a perceptual degradation alone. Thus, their study supports the view of an involvement of cognitive control during language comprehension and specifically during syntactic revision. Moreover, authors also propose to distinguish involvement of cognitive control and attentional control in language processing. In a dual-task involving Flanker trials and oral language comprehension trials, El Bouzaïdi Tiali et al. (2021) showed a similar facilitatory effect from previous incongruent Flanker trials on lexical ambiguity processing. Together, these behavioral studies bring evidence for a causal and direct involvement of executive control processes during challenging language comprehension.

Working memory, often considered as a domain-general executive mechanism, has a special place in processes involved in language mechanisms. In fact, working memory is inherent to language comprehension in that in order to parse and understand a sentence we need to maintain the information from the beginning of the sentence available until the end. Carpenter and Just (1988) proposed the principle of *immediacy of interpretation* according to which successive words of a sentence are processed and interpreted as soon as they are encountered in order to minimize storage to the interpreted information rather than all information carried by each word. This immediacy of interpretation mechanism would rely in part on working memory as interpreted information has to be maintained and used through the sentence. In their chapter, Carpenter and Just also demonstrate that complex syntactic structures

processing was linked to storage and processing in working memory. They showed that difficult syntactic structures increase working memory load and that people with low working memory abilities had poorer performances when processing such structures. Using a training paradigm, Hussey and collaborators (Hussey et al., 2017) were able to improve language and memory processing following a working memory training. In their study, participants underwent pre- and post-tests on language and several working memory and executive control tasks with training on an N-Back task (known to evaluate updating in working memory) for the training group. Post-test results showed improvement in executive and language performances for the training group only suggesting a causal link between working memory performances and language processing (see also Carretti et al., 2013; Novick et al., 2014). On a cerebral level, Hussey, Ward, Christianson, and Kramer (2015) simulated training by applying a non-invasive neurostimulation (active and sham tDCS) on the left lateral prefrontal cortex (a region known to support executive processes and working memory, D'Esposito & Postle, 2002) while the participants performed language and executive control tasks. Thus, authors observed better performances for participants during the active tDSC condition compared to the sham tDCS condition in the language task supporting the view of an involvement of cognitive control processes during language comprehension.

So far, we discussed the interaction between cognitive control during development and during adulthood. We presented evidence for the involvement of executive control during adulthood under challenging situations. Indeed, in adulthood executive control performances are at their best and language abilities allow fast and automatic processing under optimal and normal conditions. However, when the situation is more demanding (e.g., ambiguity, speech-in-speech), it seems that cognitive control comes to the rescue and helps processing language. However, aging is associated with many cognitive changes including executive control and language mechanisms.

5. Cognitive control and language comprehension in aging

As previously noted, aging is accompanied by a decline in cognitive control abilities (Salthouse, 2009; Schaie, 1996). Such decline has also been observed in

some linguistic processing (Burke & Shafto, 2008; Peelle, 2019). For example, older adults who are known to exhibit a decrease in cognitive functions, especially working memory (Borella et al., 2008; Eich et al., 2016; Van der Linden et al., 1994) also exhibit poorer performances in ambiguity resolution (Christianson et al., 2006; Kemper et al., 2004; Kemtes & Kemper, 1997) or word retrieval and generation (Baciu et al., 2016). However, some aspects of language processing are stable in aging such as vocabulary (Salthouse et al., 2003). Several theories have been proposed to explain the decline in language processing during aging. According to the working memory theory (Just & Carpenter, 1992), the decline in working memory capacities directly impacts language comprehension and production abilities. In a study of Kemtes and Kemper (1999), older adults with reduced working memory were shown to use different processing strategies to interpret syntactically complex sentences compared to young adults. Indeed, older adults with reduced working memory abilities used more pragmatic based strategies to interpret syntactically complex sentences compared to young adults who used more syntactic strategies. These results suggest that working memory capacity decline in older adults constrained them to use pragmatic information. For instance, the reduction of the amount of information that can be stored and used during sentence processing might prevent older adults from keeping all necessary information to revise and reinterpret a syntactically complex or ambiguous sentence. In a EEG study, Alatorre-Cruz and collaborators (2018) asked older and young adults to read sentences containing or not a morphosyntactic disagreement between an adjective and a verb. Moreover, authors manipulated working memory load by increasing or reducing the number of words separating the adjective and the verb. Thus, they showed a distinct pattern of Left Anterior Negativity (LAN, a component that reflects syntactic processing) between older and young adults with a reduced LAN for older adults only when working memory load was high. Using a sentence-picture matching paradigm, Sung, Yoo, Lee, and Eom (2017) showed a similar pattern on a behavioral level. Indeed, in their study, older adults who exhibited poorer working memory performances had more difficulties processing non-canonical sentences (i.e., sentences in which the word order is uncommon) (see also, Liu, 2018). In an eye-tracking study, Huettig and Janse (2016) showed that prediction in language processing was influenced by working memory and processing speed. In their study, authors asked participants to follow instructions (i.e., to watch a specific image on a four image display). The instructions were constructed so that the target images were

predictable from the pronoun used in the instructions. Participants were also tested on several working memory and processing speed tasks in order to evaluate the amount of variance these processes explain in language predictive processing. Thus, authors showed that working memory was a first mediating factor of prediction in language comprehension. They also showed that processing speed is a secondary factor that influences predictive behavior in language comprehension. The observation of an involvement of processing speed as a mediating factor of language processing is in line with another view of language ability decline in aging: the general slowing theory.

According to the general slowing theory (Salthouse, 2000), the general slowing in cognitive processing also impacts language processing (e.g., Dagerman et al., 2006). It has been shown that aging is accompanied by a decrease in processing speed abilities (Albinet et al., 2012; Kail & Salthouse, 1994). This decrease in processing speed is also associated with poorer performances in speeded spoken language comprehension (Wingfield et al., 2003). In an experiment using lexical ambiguity, Dagerman, MacDonald, and Harm (2006) showed that older adults were slower to use context in order to resolve the lexical ambiguity. The authors interpret their results as a consequence of the slowing in processing speed among older adults compared to young adults. In a behavioral study, Wingfield and collaborators (2006) manipulated speech rate and syntactic complexity and showed that older adults had more comprehension difficulties processing speeded speech than younger adults (see also, Poulisse et al., 2019). Thus, during language comprehension, and especially auditory language comprehension, processing of language is constrained by time as the information carried by the signal is no longer available once it has been pronounced. This characteristic of language processing is important in that a decline in processing speed can therefore directly impact the amount of information processed. In the case of a high speech rate or speech in noise, decline in processing speed can lead to poor language comprehension (e.g., Pichora-Fuller, 2003; Pichora-Fuller et al., 1995).

An inhibitory control deficit theory has also been proposed as an explanation of the decline in cognitive abilities among older adults and its impact on language comprehension. For example, in a study with distracting speech, Tun, O’Kane, and Wingfield (2002) showed that older adults had more difficulties inhibiting distracting

speech than younger adults. Similarly, Janse (2012) observed that inhibitory control performances predicted comprehension performances of older adults in a distracting talkers' situation. In a reading task with or without distracting information, Connelly, Hasher, and Zacks (1991) showed that older adults were more impacted by distracting information than younger adults. In their study, authors asked participants to read a text that contained or not distracting information written in a different font than the target text. By measuring reading times, the authors showed that older participants had more difficulties inhibiting the non-pertinent distracting information than younger participants.

Interestingly, whether it be working memory, processing speed, or inhibition, deficits in language processing among older adults are mostly explained by the decline in non-linguistic cognitive abilities (see also Cohen & Gordon-Salant, 2017). This observation suggests a close relationship between cognitive control and language processing and that language comprehension relies at least in part on such executive control processes. However, aging also goes hand in hand with more experience in language and some aspects of language processing such as vocabulary, semantic processing, and knowledge have been shown to be stable and sometimes to even improve in old age (e.g., Baltaretu & Chambers, 2018; Laver & Burke, 1993; Salthouse, 2009; Schaie, 2005; Thornton & Light, 2006). These stable language performances during old age can be explained by linguistic experience that compensate for the decline of processing speed, working memory and cognitive control in general. Thus, language processing abilities in aging seem to stay stable but tend to be affected by decline in cognitive control processing.

6. Bilingualism: A particular case on the cognitive control and language interaction

Bilingualism has been of particular interest in the study of the relationship between executive control and language. Regarding developmental studies, it has been shown that bilingual children exhibited better executive performances than monolingual children (Barac & Bialystok, 2012; Bialystok, 2015; Poulin-Dubois et al., 2011; White & Greenfield, 2016) and that bilingual experience had an impact on executive function development (Bialystok, 2007; Bialystok & Majumder, 1998; Luo et al., 2010). This advantage in terms of executive processing has been attributed to the need of bilinguals to deal with activation of both languages. This advantage has also

been observed among adults (e.g., (Kousaie & Phillips, 2017; Teubner-Rhodes et al., 2016, 2017; Verreyt et al., 2016). This observed advantage would be due to the activation of the two languages (Marian & Spivey, 2003) and switching between them (Costa & Santesteban, 2004) that requires an increase in attentional control, inhibitory processes and cognitive flexibility. Interestingly, Blumenfeld and Marian (2011) tested the relationship between language and inhibitory processing among monolinguals and bilinguals. They hypothesized that because bilinguals are confronted with ubiquitous selection between languages, switching and inhibition, it would change their executive function performances. To do so, authors designed an eye-tracking task evaluating the inhibition of word competitors and correlated performances of participants to this task with performances to a non-linguistic Stroop task. Results revealed differences in inhibitory processing during the language task between monolinguals and bilinguals and a correlation between linguistic and non-linguistic inhibitory measures only for bilinguals. These results support the hypothesis of the researcher according to which experience with language, and in this case bilingualism, influences executive processes. On a cerebral level, brain regions involved during language switch and cognitive control have been shown to overlap (Köpke et al., 2021; see Calabria et al., 2018 for a review) The constant use and monitoring of several languages can be viewed as lifelong cognitive control training. This hypothesis of a cognitive benefit from life experience is known as the “cognitive reserve” and bilingualism can be considered as such. Indeed, studies comparing older bilinguals to older monolinguals have shown that using several languages throughout lifespan better protected against mild cognitive impairments (Perquin et al., 2013, see also, Alladi et al., 2013, 2016). Other studies showed greater or a better maintain in cognitive control performances among older bilinguals than among older monolinguals (e.g., Abutalebi et al., 2015; Bak et al., 2014; Bialystok et al., 2006; Chan et al., 2020; see Zhang et al., 2020 for a review). Thus, bilingualism takes a special place in the study of the relationship between language and cognitive control processes in that it has an impact on both processes from childhood to aging.

The advantage of bilinguals in terms of cognitive control abilities is not consensual. Indeed, several studies did not find such an advantage (Hilchey & Klein, 2011; Lehtonen et al., 2018; Paap et al., 2015; see also (Duñabeitia & Carreiras, 2015). For example, Antón, Carreiras, and Duñabeitia (2019) did not find any significant

performance differences between mono- and bilinguals in tasks such as Stroop tasks, the Flanker task, and the Simon task known to evaluate cognitive control. Similarly, in a large-scale study, Nichols et al. (2020) observed no difference in cognitive control abilities between bilinguals and monolinguals. Moreover, taking age and socio-economic factors into account, authors did not observe a protective effect of bilingualism in aging. Thus, bilingualism seems to be a special case in terms of language and cognitive control development and evolution but some findings need to be interpreted with caution.

7. Conclusion and perspectives

The relationship between language and cognitive control processes is subject to many changes throughout lifespan. Different accounts have been proposed in developmental literature regarding the direction of this relationship during childhood. That language influences cognitive control abilities, cognitive control influences language abilities or that there is a reciprocal influence is still under debate. However, there is a general consensus to state that there is a relationship between these processes. If we take a lifespan point of view, beginnings of language might rely on control processes while language is not automatic and while not enough language knowledge is acquired. Then, the more experience with language and the more automatic language processing becomes the less the need for executive control processes. In adulthood, language processing is automatic with already a lot of knowledge, which could explain the involvement of executive control processes only when language processing is challenging (e.g., ambiguity, noise). Finally, aging comes with a decline in executive control processes but with still more language knowledge and automaticity. This could also explain why literature reveals little alteration of language processing in older adults in that language knowledge compensates for reduced cognitive control abilities during language processing. Whether this perspective is close to how language and cognitive control processes evolve and interact or not, this relationship is to be studied in order to better tackle language or cognitive control impairments from childhood to older age.

Indeed, better understanding this relationship between cognitive control and language processing could also open the path to new rehabilitation methods for patients with language impairments. As we have seen in this review evidence

accumulates to show an involvement of executive control processes during language comprehension. Thus, training executive functions in order to improve language processing could be an interesting method for patients with language deficits. This is what Zakariása, Keresztes, Marton, and Wartenburger (2018) tested on patients with aphasia. In their study, authors trained three patients on a working memory task and tested the transfer effect of this training on spoken language comprehension with a control group of five patients with aphasia without training. They observed an improvement in language comprehension among patients with the working memory training compared to the control group. This study brings promising results for a cognitive control training method to improve language processing. Moreover, improvement of language processing has also been observed following working memory training among healthy adults (Hussey et al., 2017; Novick et al., 2014) and among older adults (Carretti et al., 2013). Thus, rehabilitation of language through executive control training can be an interesting complement to current rehabilitation methods in that it requires patients to work and perform tasks that do not necessarily confront themselves directly to their deficit.

En résumé

Dans ce chapitre, nous avons discuté de la relation étroite entre les mécanismes de compréhension du langage et les processus de contrôle cognitif. Cette relation semble évoluer au cours de la vie, en lien avec le développement et la maturation cérébrale. Dans les premières années de vie, il semblerait que la compréhension du langage se repose en partie sur des processus de contrôle de par le manque de connaissances langagières, de prédiction et du fait que la compréhension ne soit pas encore totalement automatique. Ensuite, avec le gain d'expériences, d'automatisme et de prédiction, la compréhension du langage chez l'adulte engagerait des mécanismes de contrôle cognitif seulement dans des situations complexes de compréhension ou lorsqu'un traitement profond de l'information est nécessaire. Enfin, au cours du vieillissement, le déclin des capacités de contrôle cognitif serait en partie compensé par les fortes connaissances langagières permettant un maintien des capacités de compréhension du langage. Comprendre cette relation entre les processus de contrôle cognitif et les mécanismes de compréhension du langage permettrait de mieux appréhender les déficits langagiers mais également les troubles développementaux du langage. Cela permettrait une meilleure caractérisation des processus cognitifs en jeu qui pourrait aider à l'élaboration de méthodes de réhabilitation plus adaptées et plus efficaces.

Problématique

Dans les chapitres précédents, nous avons fait un état de l'art de certains modèles et certaines approches de la compréhension du langage au niveau comportemental et cérébral. Nous avons notamment pu voir que la compréhension du langage est un mécanisme qui peut apparaître comme étant très rapide et automatique. Nous proposons que ce type de traitement a lieu lorsque le langage est traité de manière passive, c'est à dire sans but particulier. Ce type de compréhension s'apparente alors davantage à une perception de la parole qu'à une compréhension concrète du message traité. Il est important de faire cette distinction car la plupart du temps nous utilisons le langage dans un certain but (faire passer un message, informer quelqu'un, expliquer, demander ou apprendre quelque chose). Nous avons également pu voir que le contrôle cognitif est un mécanisme impliqué dès lors que nous suivons un but. En cela, il est donc pertinent de se demander quelle relation entretiennent les mécanismes de compréhension du langage et ceux de contrôle cognitif. Cette question théorique générale est l'objet de ce travail.

Avant de présenter les différentes études menées, il est important de considérer certaines positions théoriques et certains points méthodologiques. Au niveau théorique, nous distinguons la compréhension de la perception. De plus, nous considérons que la compréhension n'est pas automatique et que le contrôle cognitif va être impliqué dans la compréhension du langage dès lors qu'un objectif est poursuivi et donc qu'une réponse comportementale (interne ou externe) doit être réalisée. Dans l'ensemble des études de ce travail nous nous sommes intéressés à la compréhension auditive de phrases sans violation. Ce choix provient de la volonté de se rapprocher de la compréhension dans des situations de tous les jours. Au niveau méthodologique, évaluer la compréhension est un véritable défi. En effet, comprendre une phrase revient à intégrer le sens des différents éléments de la phrase mais également de la relation entre ces éléments et à dériver un sens général au regard de l'intégration de toutes ces informations. Ainsi, évaluer si une phrase est comprise revient à évaluer un état final de compréhension. Cependant, une telle évaluation ne permet pas d'appréhender les différents processus qui ont permis cette compréhension. C'est pour cette raison que l'évaluation des processus pendant la

compréhension est nécessaire. Toutefois, une telle évaluation n'est possible que par le biais d'inférences via des mesures indirectes de la compréhension (e.g., mouvements oculaires) ou en manipulant les processus à l'œuvre pendant la compréhension via des doubles tâches (mais induisant par conséquent un possible biais lors de la compréhension). Ainsi, dans ce travail, nous avons manipulé les situations de compréhension en induisant différents types de traitement langagiers et non-langagiers afin d'évaluer l'implication des processus de contrôle dans ces différentes situations. Nous avons également utilisé différentes mesures, directes, indirectes, pendant et après la compréhension afin d'appréhender les mécanismes à l'œuvre pendant la compréhension du langage.

SECTION EXPERIMENTALE

4

Chapitre 4 : Evaluation comportementale de l'implication du contrôle cognitif lors de la compréhension du langage

Dans ce chapitre, nous proposons différentes manipulations expérimentales visant à évaluer l'implication des processus de contrôle cognitif lors de la compréhension du langage. Dans une première étude (Etude 1), nous nous intéresserons au traitement de phrases comportant une ambiguïté lexicale dans une situation de parole dans la parole. Cette première étude évaluera la compréhension *online* (i.e., pendant la compréhension) à l'aide de mesure de mouvements oculaires. La relation avec des processus de contrôle cognitif sera effectuée par le biais de mesures indirectes des performances de contrôle exécutif des participants. Dans une deuxième étude (Etude 2), nous continuerons d'étudier la compréhension de phrases comportant une ambiguïté lexicale cette fois dans une situation de double tâche afin d'évaluer l'influence du traitement langagier sur des processus de contrôle exécutif. Ensuite, dans une troisième étude (Etude 3), nous nous intéresserons à l'influence des processus de contrôle cognitif sur les mécanismes de résolution d'ambiguïtés syntaxiques à l'aide d'une double tâche. Enfin, dans une quatrième étude (Etude 4), nous nous focaliserons sur le traitement de phrases complexes syntaxiquement et comportant ou non une négation. L'évaluation des performances de contrôle cognitif

Chapitre 4 : Evaluation comportementale de l'implication du contrôle cognitif lors de la compréhension du langage

des participants nous permettra de mettre en relation ces performances avec celle compréhension de phrases complexes.

1. Etude 1 : Traitement d'ambiguïtés lexicales dans une situation de parole dans la parole et implication du contrôle cognitif

L'objectif de cette étude était d'évaluer la compréhension « *online* » du langage dans des conditions spécifiques de compréhension. Plus particulièrement, cette étude s'intéressait à la compréhension du langage dans une situation de parole dans la parole et d'ambiguïté. Pour cela, nous avons mis au point une tâche de compréhension de phrases avec des mesures d'oculométrie. Ce type de mesure s'est révélé pertinent pour l'étude de la compréhension du langage avec notamment des paradigmes dit « *visual-world paradigms* » dans lesquels des phrases sont présentées auditivement en même temps qu'une scène visuelle comportant différentes images (e.g., Tanenhaus et al., 1995). Ce type de mesure permet en effet d'appréhender différents processus langagiers durant le traitement de phrases. Par exemple, il a été montré que la position du regard sur des scènes pendant la compréhension de phrases était étroitement liée à l'accès lexico-sémantique (Huettig & Altmann, 2005 ; Tanenhaus et al., 2000) ou encore à la prédiction lors de la compréhension (Altmann & Kamide, 1999). Nous avons ainsi utilisé une telle méthode de mesure oculométrique dans cette étude.

Cette étude visait également à évaluer la relation entre les processus de compréhension du langage dans de telles situations et les processus de contrôle cognitif. Pour étudier cela, nous avons demandé aux participants de réaliser 3 tâches de contrôle cognitif évaluant différentes fonctions exécutives. Les performances à ces tâches étaient ensuite mises en relation avec celles lors de la tâche de compréhension du langage afin d'évaluer le lien entre les processus de compréhension dans des situations plus ou moins difficiles et le contrôle cognitif.

Cette étude expérimentale est un article soumis reformaté pour les besoins de ce manuscrit. Source : El Bouzaïdi Tiali, S., Meunier, F., Spinelli, E., Gonthier, C., Palluel-Germain, R., Vidal, J., & Perrone-Bertolotti, M. (2021). Lexical ambiguity processing during speech-in-speech situation and cognitive control implication. <https://doi.org/10.31234/osf.io/nya3e>

L'ensemble du matériel expérimental est disponible sur la plateforme OSF. Source : <https://osf.io/ye8gf/>

Lexical ambiguity processing during speech-in-speech situation and cognitive control implication

Abstract

Lexical ambiguity is ubiquitous in oral language and sometimes induces comprehension difficulties. Moreover, in ecological situations language is rarely processed without any surrounding noise and one of the more frequent situations of language comprehension is speech-in-speech situations. In the present study we evaluated the cognitive process at work during online sentences comprehension in which comprehension difficulties were manipulated by linguistic ambiguity (using French homophones) and the presence or absence of babble noise (multi-talker situations). Eye movements on a visual scene including four different images (correct target, an incorrect target, a semantic distractor and a phonological distractor) were measured to assess online effects of lexical ambiguity and noise processing during language comprehension. We hypothesized that looks to the incorrect target would increase with ambiguity and that this increase would be amplified with babble noise. Also, looks to the phonological and semantic distractors should be higher in the speech-in-speech situation than in silence. Furthermore, we hypothesize that in more difficult linguistic situations comprehension will be related with the better cognitive control of participants. Consequently, we also evaluated cognitive control performances during three cognitive control tasks (evaluating: attentional control, inhibitory control and updating in working memory abilities). Results showed significant effects of lexical ambiguity and multi-talker situations on behavioral performances and eye movement measures, suggesting that additional difficulty in language comprehension increased cognitive effort and processing. Combination of both difficult conditions induced the lowest performances but the interaction effect suggests a smaller impact of ambiguity in a speech-in-speech situation than in silence. Results also showed that the bigger the interference or difficulty cost in cognitive control tasks the bigger the ambiguity effect in the language comprehension task. Results are discussed in light of the literature linking cognitive control and language processing.

1.1 Introduction

We are rarely processing online language in a quiet environment without any surrounding noise. Yet, most oral language comprehension models are based on studies with stimuli presented in silence or in optimal situations for language processing. Of course, studies in optimal situations are very important to understand core processes of language comprehension. However, cognitive processes at work during language comprehension in everyday life might differ from those involved in optimal comprehension situations and difficult linguistic and non-linguistic situations might involve additional processing to language comprehension. For example, let's imagine we are in a noisy restaurant talking with a friend. Everything goes well but the noise masks what our friend is saying, making comprehension a little bit more difficult than usual. In this situation we would probably look more at his lips in order to better understand what he says (to better discriminate the phonemes he pronounces, e.g., Schwartz et al., 2004). Moreover, such a situation would also require us to be more attentive, making comprehension more effortful and increasing attentional resources (Wikman et al., 2021). In addition to the noise in the restaurant, our friend is asking us something but in his question he uses a word that sound like another one (i.e., an homophone) making his question ambiguous (e.g., he asks us: “*Would you like to accompany me to the bank after diner?*”; the restaurant being nearby both a shore and a bank office the term “bank” our friend used is ambiguous and thus require us to additional processing to select its correct meaning). Thus, we have to select quickly which meaning he was referring to in order to answer his question. This type of situation is ubiquitous in everyday life; this is why understanding processes at work during effortful language comprehension is of particular interest. In this study, we manipulated language comprehension situations by increasing difficulty with speech-in-speech and linguistic ambiguity in order to evaluate language comprehension in such difficult situations. We also tested the relationship between language comprehension in difficult situations and executive control processes.

Speech-in-speech situations are a specific speech in noise situation also called multi-talkers situation or “cocktail party” situation. These situations involve energetic and informational masking. The *energetic masking* appears when there is an overlap in time and frequency of the noise signal and the target signal while *informational masking* appears when the information carried by the mask interferes with the attended

information being processed (Brungart, 2001; Brungart et al., 2001). It has been shown on the one hand that energetic masking in such situations plays a minor role in language processing (Brungart et al., 2006), and on the other hand, that informational masking tends to impact language processing at the phonological (Varnet et al., 2012), lexical (Hoen et al., 2007; Van Engen & Bradlow, 2007), and semantic (Dekerle et al., 2014) levels.

Compared to optimal noise-free situations, speech-in-speech situations slow down participants in language processing. In addition to such difficulty, sometimes, the linguistic content of a sentence is ambiguous, also making language processing more difficult. Homophone processing falls into such situations. According to the exhaustive (or reordered) access account (Duffy et al., 2001), all meanings of an ambiguous word are simultaneously activated and context helps selecting the appropriate meaning only after the occurrence of the word. Thus, the processing difficulty is explained by the competition between the different meanings activated. Onifer and Swinney (1981) brought evidence for this account. In their experiment, they presented auditory sentences containing or not a semantically ambiguous word (i.e., with several meanings), and asked participants to perform a visual lexical decision task (i.e. judge whether a visually presented string of characters was a word or not). The string of characters could be a word semantically related to the primary or secondary meaning of the auditory ambiguous word, a control word or a pseudoword. Authors also manipulated the previous context of the ambiguous words in the sentence in order to bias toward the dominant or non-dominant meanings of the ambiguous word. Results showed that reaction times to the visual stimulus were faster when it was related to both dominant and subordinate meanings of the ambiguous word regardless of the context (see also, Duffy et al., 1988; Mishra & Singh, 2014 for similar results). However, other authors did not find such activation of both meanings of ambiguous words and rather observed an influence of context and frequency on meaning activation (Chen & Boland, 2008; C. Martin et al., 1999; G. B. Simpson & Krueger, 1991). In a study using lexical decision tasks, Tabossi, Colombo, and Job (1987) showed that previous context biased toward the dominant meaning leads to a selective activation of only the dominant meaning while previous context biased toward the subordinate meaning activated both dominant and selective meanings. According to the selective access account, if the context preceding an ambiguous word is strongly biased toward one

meaning, only the meaning of the biased context will be activated. However, if the context preceding the ambiguous word is neutral, meaning frequency will influence activation toward one or both meanings (Glucksberg et al., 1986; Kellas & Vu, 1999; Yip & Zhai, 2018).

Both babble noise and semantic ambiguity seem to induce additional processing during language comprehension. According to the *effortfulness hypothesis*, processing language under degraded situations such as with babble noise will come with a cost in terms of attention allocation. More specifically, increasing resources will be allocated to extract information from the target signal, reducing resources for higher level processes (McCoy et al., 2005). This hypothesis has mostly been studied with working memory showing a decrease in working memory performances in noisy situations (Basavanahalli Jagadeesh & Kumar U, 2019; Obleser et al., 2012). Regarding lexical ambiguity, homophone processing has been linked to inhibitory mechanisms. In fact, in a study with skilled and less skilled comprehenders, Gernsbacher and Faust (1991) showed that less skilled comprehenders had more difficulties suppressing non pertinent meanings of ambiguous words. Using spoken homophones in Chinese, Zhang, Shu, Li, and Liu (2001) showed that homophone processing involves inhibitory mechanisms only in specific situations such as when multiple meanings compete without one strong dominant meaning or when context is neutral. These findings are in line with studies showing an involvement of executive control processes during specific difficult language comprehension conditions (Hsu & Novick, 2016; Vuong & Martin, 2014). For example, Perrone-Bertolotti, Tassin, and Meunier (2017) observed a link between executive function processes such as attentional control, inhibition and language comprehension in a speech-in-speech paradigm. Interestingly, they showed that better cognitive inhibition abilities prevent irrelevant information processing during speech-in-speech situations. These studies suggest a close relationship between cognitive control and language processing in difficult situations (e.g., speech-in-speech or ambiguity).

Online oral language comprehension is difficult to assess and one of the most used methods is the eye-tracking. Indeed, eye-movement is proposed as a locus to evaluate speech perception and comprehension (Cooper, 1974). For instance, in the princeps study of Cooper, participants had to listen to short stories while looking at

slides containing nine line drawings of commonplace objects more or less related to the story. Cooper observed a close relationship between language comprehension and eye fixation patterns. In fact, participants tended to even anticipate the word being processed by looking at the drawing depicting a word before the end of its pronunciation. Overall, Cooper showed that eye fixation was closely synchronised with language processing. This close relationship between eye movements and language comprehension has been observed in several similar visual-world paradigms and represents a pertinent method to investigate language comprehension and more specifically, word recognition (Allopenna et al., 1998), lexical access (Tanenhaus et al., 2000), linguistic information processing (Eberhard et al., 1995; Huettig & Altmann, 2005; Tanenhaus et al., 1995), and prediction in language processing (Altmann & Kamide, 1999, 2007, 2009; Kamide et al., 2003).

In the present study, we used visual scenes with eye-tracking measures and manipulated language difficulty through a multi-talkers situation and lexical ambiguity (Session 1). The first aim of the study was to evaluate online oral language comprehension under such difficult situations. The second aim was to assess the link between language processing under difficult situations and executive control performances (Session 2). The combination of a multi-talkers situation with lexical ambiguity was set to increase language processing difficulty and evaluate how this increase in difficulty was related to executive control processing (measured in a second Session). The experimental paradigm was designed to obtain a close to ecological situation of language comprehension.

In light of the effortfulness hypothesis, we hypothesize that the increase in resource demands due to a multi-talkers situation would lead participants to have more difficulties inhibiting the incorrect dominant meaning of the homophone. Thus we expected participants to look longer to the target depicting the incorrect (dominant) meaning of the homophone in a multi-talkers situation. We also expected participants to look more to this incorrect target for sentences containing a homophone compared to control sentences. This would suggest an ambiguity effect due to the dominance of the homophone. Moreover, we also expected a close relationship between language comprehension and executive function performances. More specifically, we

hypothesized that the better the participants in terms of executive control performances the better their language comprehension performances.

1.2 Method

1.2.1 Participants

Fifty-four students (one male and 53 females) from the University Grenoble Alpes from ages 18-36 (mean age = 20.7 years old, SD = 3.7) participated in the study and received course credit for participation. All participants were right-handed and native French speakers with normal or corrected vision. The study was approved by the local ethical committee (CERGA, N°CER Grenoble Alpes-Avis-2020-03-10-02).

1.2.2 Tasks and Stimuli

Participants performed two different sessions, the first ones allowed online language comprehension abilities assessment and the second one's executive abilities assessments. During the online language comprehension session participants were instructed to listen to orally presented sentences and choose the image that best depicts the sentence among four images on the screen. Eye movements were recorded during this task. The second session allowed executive control assessment. Participants performed three different computerized tasks allowing to assess inhibition control, updating in working memory and sustained attention.

1.2.3 Session 1: Online Language Comprehension Task

The language comprehension task consisted of 80 French auditory sentences. Sentences were recorded by a native French male speaker. Half the sentences contained a homophone target word (called homophone condition) and the other half were control sentences without a homophone word (i.e., control condition) (see Figure 4.1.1). For the homophone sentences the meaning of the target homophone word was always the subordinate one (i.e., "Ce matin, il a pris son cor pour aller à l'orchestre le soir"; *This morning, he took his horn to go to the orchestra on the evening*). For the control sentences the target word was a word matched in terms of lexical frequency and number of syllables to the homophone target word using a French database (New et al., 2004). For example, for the homophone condition sentences we had: "Ce matin, il a pris son cor pour aller à l'orchestre le soir" (*This*

morning, he took his horn to go to the orchestra on the evening), and for the control condition sentences: “Ce matin, il a pris son cake pour aller au goûter de son ami.” (*This morning, he took his cake to go to his friend’s afternoon snack*). Sentence context before the homophone was always neutral. The total sentence length was controlled within each sentence pair (homophone and control). Moreover, sentences were created in order that the uniqueness point of the homophone (or of the corresponding control word) appeared at the same time in the sentence. We chose the uniqueness point because it is the moment in word pronunciation when there is enough phonetic information to leave only one lexical candidate. Half the sentences were presented in a multi-talkers situation while the other half were presented in silence.

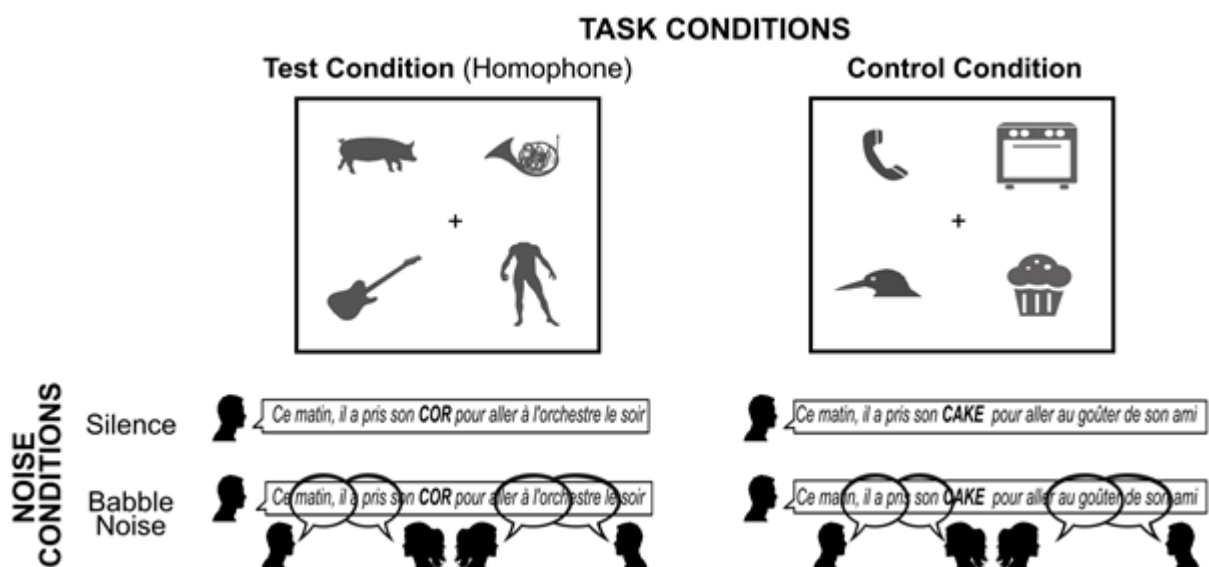


Figure 4.1.1: Task and Noise conditions

Eighty visual scenarios were created to correspond with each of the 80 sentences. Each visual scenario contained four black and white images (see Figure 2): 1) a correct target picture that corresponds to the correct meaning of the homophone (or control word), 2) an incorrect target -i.e., a target picture that corresponds to the incorrect meaning of the homophone (or a random object for the control sentences), 3) a picture that corresponds to a phonological distractor and 4) a picture that corresponds to a semantic distractor (see Figure 2). Luminance and contrasts were controlled in order to obtain a homogeneous scene with the four targets using custom Matlab scripts (version 9.7.0, Matlab ®, R2019b).

The babble noise condition (i.e., multi-talkers situation) included four voices in addition to the main male voice containing the sentence of interest. The four distracting voices corresponded to two male and two female voices. We chose a four talker's babble noise to maximize informational masking and its effect on lexical and semantic processing (Hoen et al., 2007). The signal to noise ratio of the multi-talkers situation was set to +3dB. This signal to noise ratio was selected in order for participants to understand the sentences correctly without presenting too much difficulty to the point that it was not possible to be completed adequately. Difficulty of the task was pre-tested on a few participants. During this task, eye movement data was collected using an EyeLink 1000 Plus at a sampling rate of 1000Hz. All material is available at this link: https://osf.io/ye8gf/?view_only=41dbb57b25654f1c95e9d8d31700c529

1.2.3.1 Procedure

In the online language comprehension task, participants were listening to sentences while looking at a visual scene containing four black line drawing pictures (a correct target, an incorrect target, a phonological distractor and a semantic distractor, see Figure 1). Participants were instructed to judge, as quickly and accurately as possible, which of the four targets best represented the sentences they were listening to. Manual answers were given by clicking with a computer mouse on the selected target. Eye movements were measured while participants were listening to the sentences. One trial consisted in the presentation of a central fixation cross during 1000ms followed by the joint presentation of the visual stimuli and the corresponding auditory sentence, and an inter-stimulus interval (ISI) of 1000ms (see Figure 4.1.2). Participants performed two blocks, one with the 40 sentences with babble noise and one with the 40 sentences in silence. The block order was counterbalanced between participants.

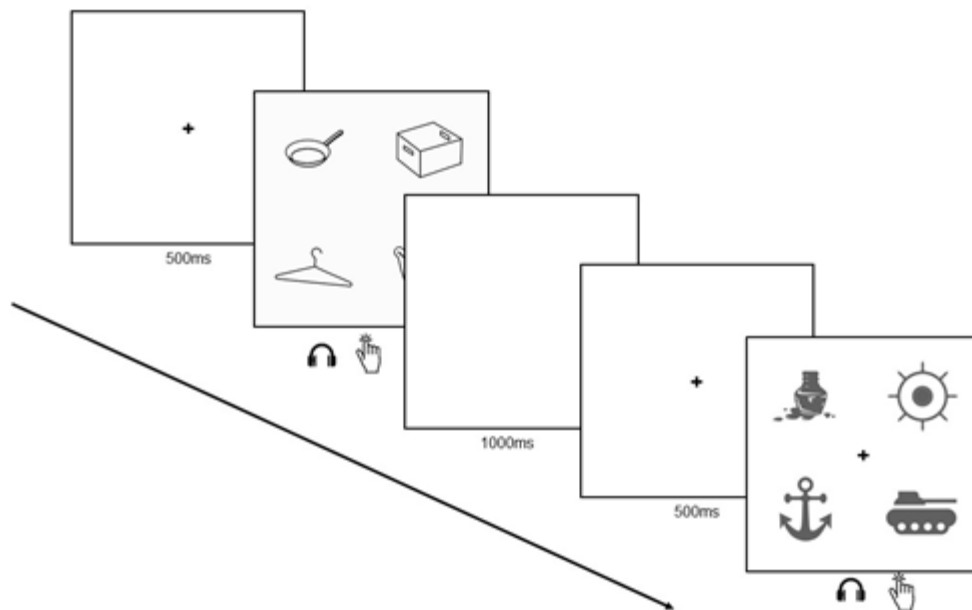


Figure 4.1.2: Example of typical trials and the visual scene displayed

The visual scene included four targets: correct target, incorrect target, phonological distractor, and semantic distractor. Participants were listening to a sentence (“Depuis peu, il utilise une ancre automatique pour son bateau”; Recently, he uses an automatic anchor for his boat) and had to click on the target that best depicted the sentence -the correct goal- (in this example the anchor). In this example the word “ancre” (anchor) is a homophone with “encre” (ink) (the dominant meaning) which is not relevant in the sentence; the tank corresponds to the phonological distractor and the wheel to the semantic distractor.

1.2.4 Session 2: Cognitive Control Tasks

During the second session, three different tasks were presented with each having a duration of approximately 15 minutes each (see Figure 4.1.3). The first task was a Flanker task which was developed by Eriksen and Eriksen (1974). This task was used to measure inhibitory control and interference resistance. The second task was a N-back task which was developed by Kane and collaborators (2007). This task measures working memory updating. The third task was the SART (sustained attention to response task) which was developed by Robertson, et al. (1997). This task evaluates goal maintenance and inhibitory control. We chose to measure these processes because they are considered as the classic components of cognitive control.

1.2.4.1 Procedures

Flanker Task

For this task, participants had to decide if the central arrow of a string of arrows presented at the center of the screen was pointing to the right or to the left by pressing two keyboard buttons (P for right and E for left). The strings of arrows were composed of the target arrow in the center and four distracting arrows (two on each side of the central arrow). Distracting arrows could either point to the same direction as the central arrow (congruent condition) or to the opposite direction (incongruent condition) (see Figure 4.1.3A). For each trial, a rectangular fixation was presented for 300ms and served as a visual mask, followed by the presentation of the string of arrows for 500ms. The fixation functioned as a visual mask. The ISI was set to 1000ms. All arrows were presented on four centimeters with a 3.6-degree visual angle. The task contained a total of 240 trials in which 120 were congruent and 120 were incongruent. The target arrows were also equally pointing left and right. The assortment of trials were pseudo-randomized in which two identical trials (e.g., the target arrow pointing left with incongruent distractors) and more than four trials with the same type (e.g., distractors congruent) were not presented consecutively. A pause of 20 seconds minimum was given every 80 trials. Participants completed 16 trials of training to get familiarized with the task.

NBack Task

For this task, letters were presented one by one on the screen and the participants had to indicate by pressing two buttons whether the letter presented was the same as the letter presented two turns back or not (before last, see Figure 4.1.3B). For example, if participants saw the series of letters of *F-N-L-N*, the response should be: *no, no, no, yes*. The letters used for this task were *B, F, H, L, N, Q, R, X, and Z*. This task contained four blocks of 50 trials with 10 targets and 10 lures. Among the lures, five out of the 10 were n-1-back repetitions which is the same letter presented two times in a row and the other five were n-3-back. The letters were presented for 500ms and the inter-stimuli interval between each letter was set to 2000ms. The participants did 11 trials of training to get familiarized with the task.

SART

For this task, a digit (from one to nine) was presented in the center of the screen. Participants had to press the spacebar every time a digit appeared with the exception of the digit three (Figure 4.1.3C). Each number was presented 50 times with a total of 450 trials. The order of numbers presented was pseudo-randomized. Each number lasted for 250ms on the screen and was followed by a visual mask for 900ms. The participants completed 18 trials of training in order to get familiarized with the task.

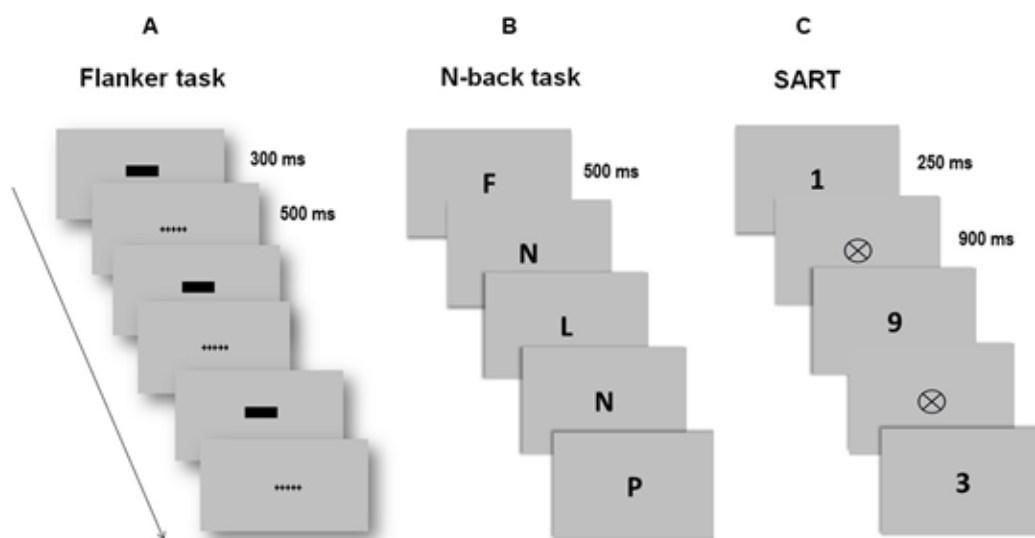


Figure 4.1.3: Cognitive control tasks' designs including the Flanker task (A), the N-Back task (B) and the SART (C)

All the tasks used in session 1 and session 2 were presented using E-Prime software (version 3.0.3.82). Auditory stimuli were presented on headphones with a comfortable sound level set by participants. Participants responded with a mouse and a keyboard for both sections respectively.

1.3 Data Analyses

Statistical analyses were conducted using R version 4.0.3 (R Core Team, 2018) with lme4 (Bates et al., 2015) and lmerTest (Kuznetsova et al., 2017) packages, and Matlab (version 9.7.0, Matlab ©, R2019b). In this study, two participants did not perform the cognitive control session and were therefore not included in cognitive control and correlation analyses.

1.3.1 Online Language comprehension task

1.3.1.1 Behavioral performances analysis

We analyzed participants' accuracy and reaction times. We computed a logistic mixed effect model for accuracy measure and a mixed effect model for reaction times. For these two analysis we included as a fixed effects: Sentence Type (Homophone and Control), Noise condition (Babble Noise and Silence), and their interaction and as a random effects: participants' intercept, participants' random slope for Sentence Type and participants' random slope for Noise condition as well as stimuli's intercept. In order to reduce the weight of extreme data, reaction times were *log* transformed.

1.3.1.2 Eye-tracking Analyses

Preprocessing of eyetracking data was performed in order to remove trials containing more than one third of missing data (from the loss of the pupil or calibration issues). Then, participants who had more than 20% of removed trials were excluded from all statistical analyses. A total of 11 participants were removed from analyses. Therefore, all further analyses were performed on the remaining 44 participants.

Two different dependent variables were computed and analyzed: 1) *probability of look* to a specific image of the visual scene during sentence processing and 2) *proportion of look* (i.e., the proportion of time spent looking at a specific image on a selected time window). Analyses were computed for each type of the four images of the visual scene (i.e., correct target, incorrect target, phonological distractor, and semantic distractor) during each language trial. Regarding the analyses of the probability of look to the different scene images, ANOVAs were computed on each sample (at a 1000Hz sampling rate) measuring the effect of Noise condition (Babble Noise v.s. Silence), Sentence Type (Homophone v.s. Control), and their interaction. We controlled the false discovery rate (FDR) of these ANOVAs using Benjamini and Hochberg (1995) procedure. We also tested the difference between the probability of look to the correct and incorrect target in the silence and in the speech-in-speech conditions separately by computing Wilcoxon tests on each sample followed by a FDR correction. Proportions of look to the different types of images of the visual scene from the beginning of the ambiguity to 1500ms after the ambiguity (critical time window of ambiguity and disambiguation) were analyzed using mixed effect models.

Probability of look to a specific image or proportion of look during a specific time window of 1500ms (from the uniqueness point of the homophone or corresponding word) are measures that allow us to assess online language comprehension and that give insight into what is happening during comprehension. To complement these measures, we proposed to estimate the sample at which participants took a last look at the incorrect image under the different experimental conditions. If participants took a last look at the incorrect target late after the ambiguity, it would reflect a difficulty in processing this ambiguity or a check reflecting processing of its meaning. On the other hand, if participants took a last look at the incorrect target early after the ambiguity, it would reflect an easier process of ambiguity. We computed a mixed effect model with as the dependent variable the time participants took a last look at the incorrect target, as fixed effect factors the Sentence Type (Homophone and Control), Noise condition (Babble Noise and Silence), and their interaction and as a random effects participants' and stimuli's intercepts.

1.3.2 Cognitive control tasks

1.3.2.1 Flanker task

Accuracy and reaction times were measured and analyzed in order to assess interference resistance. We computed two paired t-tests (one for accuracy and one for reaction times) to compare congruent and incongruent Flanker trials. In terms of accuracy, a significant main effect of congruency was observed ($t = 8.5, p < .001$) in which participants responded more accurately during congruent ($M = 0.99; SD = 0.02$) than during incongruent trials ($M = 0.97; SD = 0.03$). The same effect was observed for reaction times ($t = -16.6, p < .001$) with participants being faster for congruent trials ($M = 441\text{ms}; SD = 57\text{ms}$) than for incongruent ones ($M = 506\text{ms}; SD = 68\text{ms}$). In addition, we created two indices of interference resistance for each participant: mean reaction times to incongruent trials minus reaction times to congruent trials, and the same difference for accuracy.

1.3.2.2 N-Back task

For this task, we compared neutral trials to n-1 lure trials, to n-3 lures trials and n-1 lure to n-3 lure trials through paired t-tests for accuracy and reaction times. These analyses assess the effect of lures on working memory performances. Regarding accuracy measures, no significant effect was observed when comparing neutral trials

to n-1 lure trials. However, we observed a significant difference in proportion of correct answers between neutral trials and n-3 lures ($t = 6.8, p < .001$). Indeed, better responses were observed for neutral trials ($M = 0.86; SD = 0.1$) than for n-3 lures trials ($M = 0.73; SD = 0.19$). We also observed a significant difference between n-1 lure and n-3 lure trials ($t = 6.2, p < .001$), with better performances for n-1 lure trials ($M = 0.85; SD = 0.16$) than for n-3 lure trials. In terms of reaction times, similar results were observed. They revealed significant differences between neutral and n-1 lure trials ($t = -4.7, p < .001$) as well as between neutral and n-3 lure trials ($t = -5.1, p < .001$). Participants were faster for neutral trials ($M = 727\text{ms}; SD = 198\text{ms}$) than for n-1 ($M = 783\text{ms}; SD = 206\text{ms}$) and n-3 ($M = 887; SD = 267\text{ms}$) lure trials. No significant difference was observed between n-1 and n-3 lure trials in terms of reaction times. In addition, we created three indices for each participant reflecting performances in updating in working memory: mean reaction time, mean accuracy, and proportion of false alarms.

1.3.2.3 SART

For this task, we compared the proportion of correct answers to Go and NoGo trials with a paired t-test. The comparison of the proportion of correct answers to Go and NoGo trials revealed a significant difference ($t = 16.2, p < .001$), showing that participants responded more correctly to Go trials ($M = 0.99; SD = 0.01$) than to NoGo trials ($M = 0.71; SD = 0.13$). Average false alarm rate of participants on NoGo trials was 0.29 ($SD = 0.13$). In addition, we created two indices for each participant reflecting goal maintenance and inhibition performances: proportion of correct answers and proportion of false alarms.

1.3.3 Online language task and cognitive control performances relationship

In order to be able to evaluate the relationship between online language comprehension and executive function performances we created several indexes. Indeed, these indexes allow to reduce the number of correlation tests while reflecting mechanisms assessed in each task. Moreover, the use of these indexes facilitates correlation interpretations. Regarding online language assessment, we created an index reflecting the cost of processing a homophone for each type of image and for each participant. These indexes included the cost of processing a homophone for each

image type of visual scene (i.e., correct target, incorrect target, phonological distractor, and semantic distractor). These indexes were computed by taking the mean proportion of look on the type of image during sentences with a homophone minus the mean proportion of look on the same type of image during control sentences. We computed the same type of indices for the cost of processing a sentence in babble noise condition by subtracting the mean proportion of look to a type of image during babble noise trials to the mean proportion of look to the same type of image during silence trials. We computed similar indexes for accuracy and reaction time measures. We also created two general factors from executive control performances in order to obtain two general measures of executive functions. To do so, we normalized executive control measures using Z scores and then computed 1) the mean between SART false alarms, NBack correct answer proportion and reaction time difference between incongruent and congruent trials for Flanker task (FactorG1); 2) the mean between SART false alarms, NBack correct answer proportion and correct answer proportion difference between incongruent and congruent trials for Flanker task (FactorG2).

Finally, we computed Pearson correlations between all indices created for both the online language comprehension task and the executive control tasks in order to assess the relationship between language and executive control performances.

1.4 Results

1.4.1 Behavioral

Analysis of accuracy measures during the language task revealed a significant main effect of Sentence Type ($z = -5.1$, $p < .001$). Participants responded more correctly to control sentences ($M = 0.97$; $SD = 0.16$) than to sentences with a homophone ($M = 0.85$; $SD = 0.36$). We also observed a significant main effect of Noise condition ($z = 3.3$, $p < .001$), with better performances during in silence ($M = 0.93$; $SD = 0.22$) than in babble noise condition ($M = 0.88$; $SD = 0.3$) (see Figure 4). No significant interaction effect was observed for accuracy measures.

Regarding reaction times results, a significant main effect of Sentence Type ($t = 3.5$, $p < .001$) was observed. Participants were faster for control sentences ($M = 4479$ ms; $SD = 883$ ms) than for sentences with a homophone ($M = 4824$ ms; $SD = 946$ ms). We also observed a significant main effect of Noise condition ($t = -6.7$, $p <$

.001) with participants being faster in silence ($M = 4531\text{ms}$; $SD = 903\text{ms}$) than in babble noise condition ($M = 4772\text{ms}$; $SD = 925\text{ms}$). A significant interaction effect between Noise condition and Sentence Type was also observed ($t = 2.7$, $p < .01$). This interaction showed that the difference in reaction times between homophone and control sentences (reaction times to homophone sentences minus reaction times to control sentences) was larger in silence (mean difference = 3780ms ; $SD = 287\text{ms}$) than in the babble noise condition (mean difference = 248ms ; $SD = 220\text{ms}$) (see Figure 4.1.4).

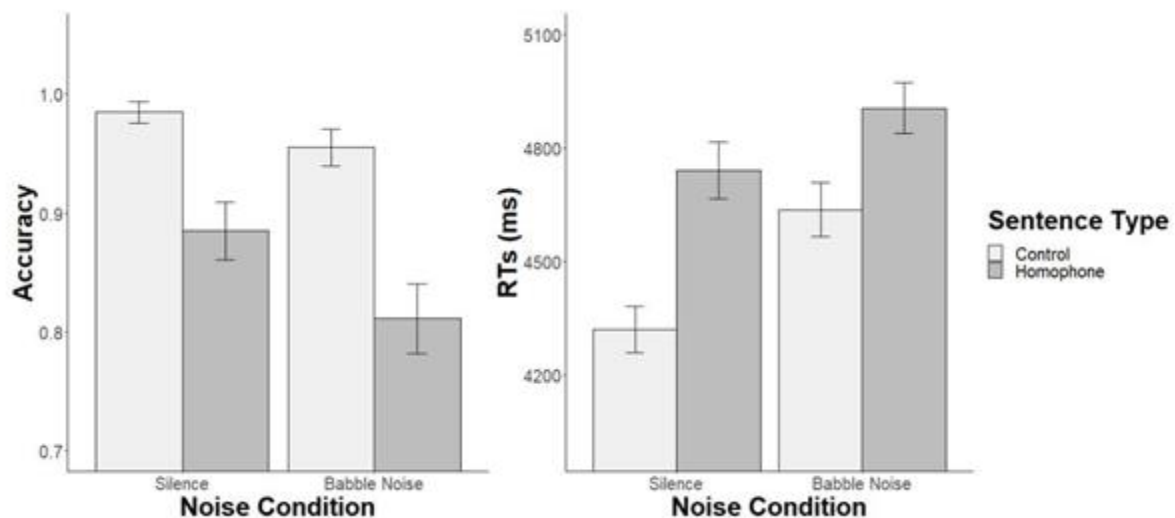


Figure 4.1.4: Behavioral performances in terms of accuracy (left) and reaction times (right)

1.4.2 Eyetracking

1.4.2.1 Probability of look

Correct target: Results showed a significant main effect of Sentence Type from the homophone onset (or the corresponding word in the control condition) until around one second after the homophone onset (see Figure 5). During this time window the probability of look to the correct target was higher for the control sentences than for the homophone sentences and this regardless of the Noise condition. No main effect of Noise condition or of interaction was observed.

Incorrect target: Results showed a significant main effect of Sentence Type with higher probability of look to the incorrect target for sentences containing a homophone compared to control sentences (see Figure 4.1.5). This significant main effect starts

slightly before the homophone (or corresponding word in the control sentences) and lasts for around 1.5 second. Surprisingly, this main effect of Sentence Type was also observed at the very beginning of trial between 100 and 400ms with higher probability of look to the incorrect target for sentences with a homophone than for control sentences. However, this effect remains in a range of probability around chance level (25%). No significant main effect of Noise condition was observed and no interaction as well for the probability of look to the incorrect target.

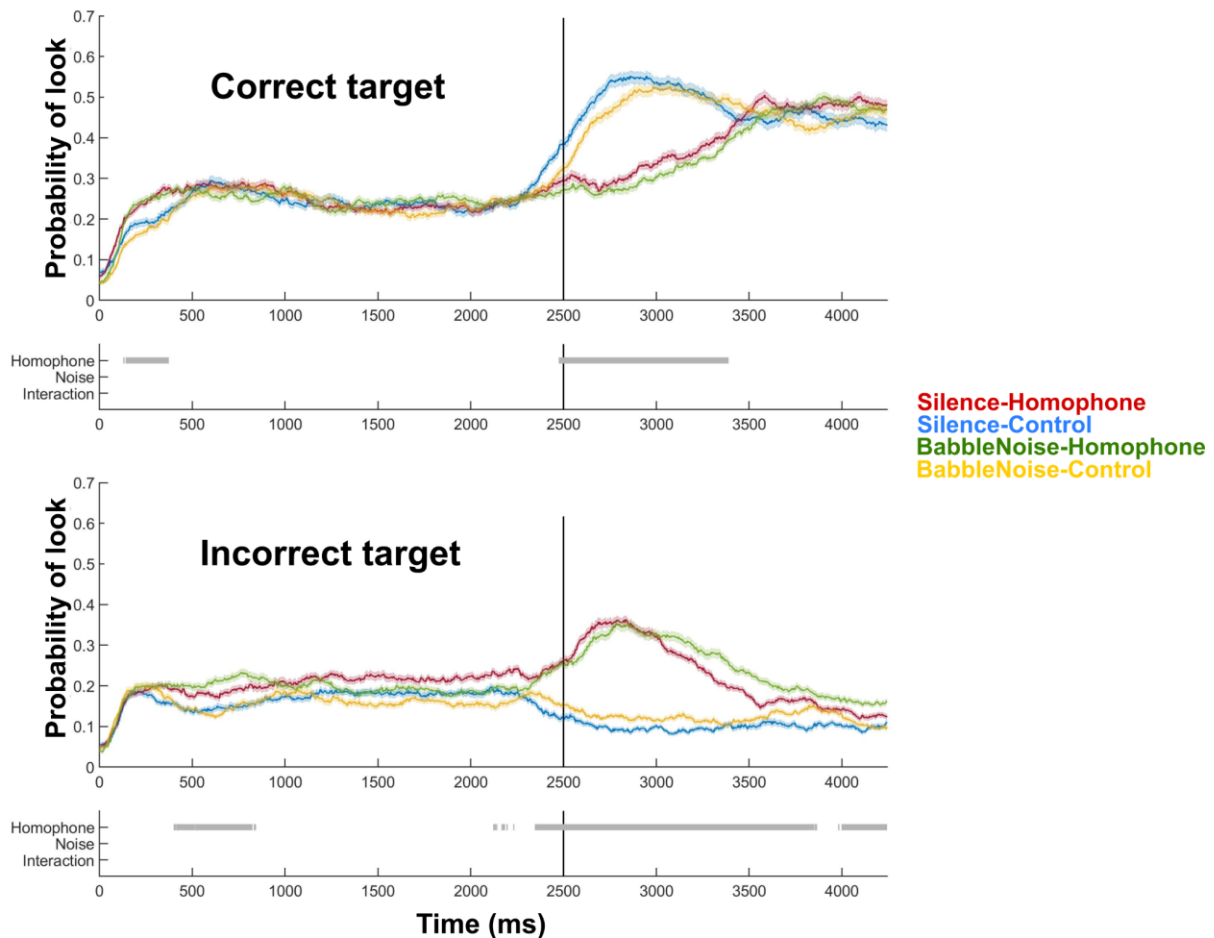


Figure 4.1.5: Probability of look to the correct and to the incorrect target during the total sentence presentation time for each crossing between Noise and Sentence Type experimental conditions

The vertical line at 2500ms indicates the uniqueness point of the target word (i.e., homophone or control). Significant, main and interaction effects are displayed with the grey bars under the graph.

Phonological and Semantic distractor: probability of look to the phonological distractor results showed a significant main effect of Sentence Type between 100 and 450ms after the beginning of the sentence with a higher probability of look to the phonological distractor during control sentences than during sentences containing a

homophone. Nevertheless, this effect is around the chance level of probability of look (25%) (see Figure 6). We also observed a significant main effect of Noise condition between 2750 and 3000ms with a higher probability of look to the phonological distractor during babble noise condition than during silence condition. This effect suggests a higher consideration of the phonological distractor in the babble noise condition than in silence shortly after the target word. In terms of probability of look to the semantic distractor, no significant effect was observed (see Figure 4.1.6).

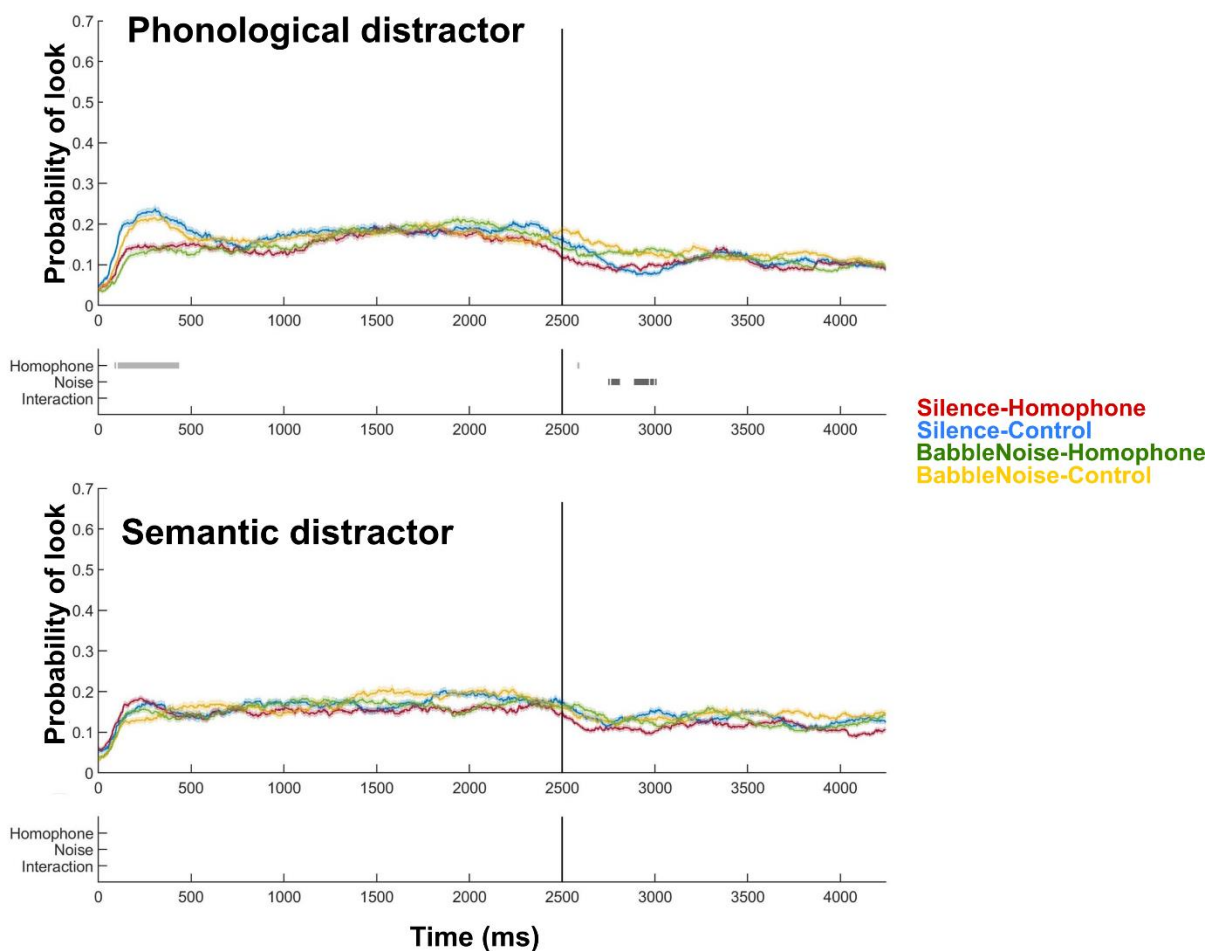


Figure 4.1.6: Probability of looking to the phonological and semantic distractors during the total sentence presentation time for each crossing between Noise and Sentence Type experimental conditions

The vertical line at 2500ms indicates the uniqueness point of the target word (i.e., homophone or control). Significant, main and interaction effects are displayed with the grey bars under the graph.

Wilcoxon analyses testing the difference between probability of look to the correct and incorrect target in silence revealed a small significant effect shortly (between 200 and 300ms) after the homophone appeared with a higher probability of

look to the incorrect target than to the correct target during this time window (see figure 4.1.7). This result suggests that participants first consider the dominant meaning of the homophone. Then around 600ms after the homophone appeared, the probability of look to the correct was significantly higher until the end of the sentence reflecting the good comprehension of participants. Regarding Wilcoxon analyses testing the difference between probability of look to the correct and incorrect target in the speech-in-speech condition no significant effect was observed.

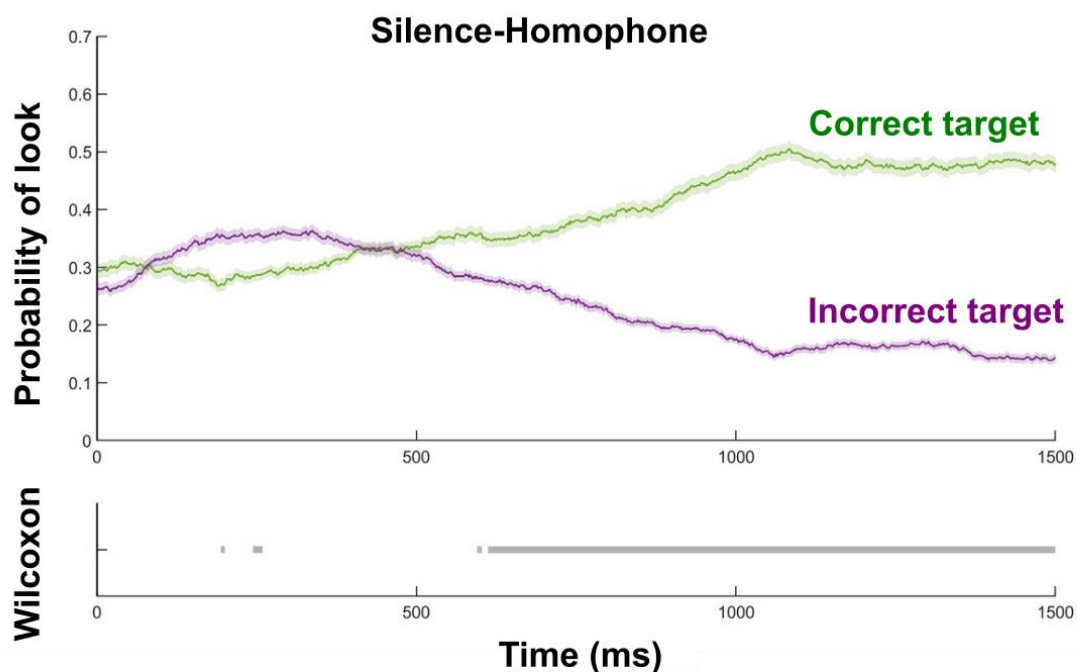


Figure 4.1.7: Probability of looking to the correct and to the incorrect target during homophone sentences in silence

1.4.2.2 Proportion of look

All proportion of look analyses were computed on a time window of 1500ms starting from the uniqueness point of the target word (i.e., the homophone for the homophone condition and the corresponding word in the control condition). This window of interest always started at 2500ms after the audio onset.

Correct target. Results revealed a significant main effect of Sentence Type ($t = -3.8, p < .001$), in which participants looked more to the correct *target* during the time window of interest (i.e., from the unicity point of the homophone to 1500ms after) when listening to control sentences ($M = 0.49; SD = 0.25$) than when listening to sentences

with a homophone ($M = 0.41$; $SD = 0.25$) (see Figure 8). Finally, we did not observe any significant main effect of Noise condition or of interaction.

Incorrect target: Results revealed a significant main effect of Sentence Type ($t = 6.5$, $p < .001$). Participants looked more to the incorrect target when listening to sentences with a homophone ($M = 0.23$; $SD = 0.21$) than when listening to control sentences ($M = 0.11$; $SD = 0.13$) (see Figure 8). We also observed a significant main effect of Noise condition ($t = -2.2$, $p < .001$). Participants looked more to the incorrect goal in babble noise condition ($M = 0.18$; $SD = 0.18$) than in silence ($M = 0.16$; $SD = 0.16$) (see Figure 8). No significant interaction was observed.

Phonological and Semantic distractor: Results revealed a significant main effect of Noise condition ($t = -2.5$, $p < .05$). Participants looked more to the phonological distractor in the babble noise ($M = 0.12$; $SD = 0.15$) than in the silence condition ($M = 0.11$; $SD = 0.14$) (see Figure 4.1.8). No significant main effect of Sentence Type or interaction effect was observed. For the semantic condition an absence of significant effect was observed.

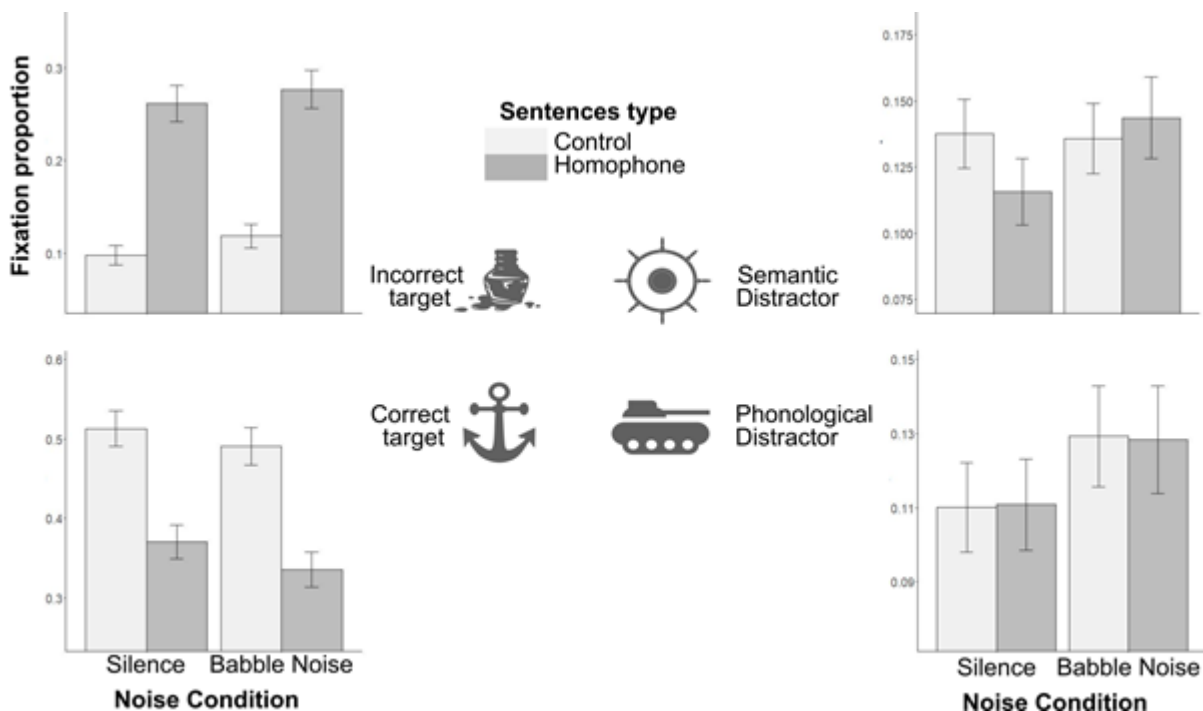


Figure 4.1.8: Fixation proportions on each of the four elements of the scene (correct and incorrect target, and semantic and phonological distractors) for the two sentence types (control and homophone) with and without babble noise during the ambiguity time window (2500ms-4000ms)

Regarding the analysis of the last time participants looked to the incorrect target, the model revealed a significant main effect of Sentence Type, $t = -2.28$, $p < .001$.

Participants took a last look to the incorrect target later during sentences with a homophone ($M = 3350\text{ms}$ after the ambiguity, $SD = 623\text{ms}$) than during control sentences ($M = 3116\text{ms}$ after the ambiguity, $SD = 623\text{ms}$). The model also showed a significant main effect of Noise condition, $t = -5.05$, $p < .05$. Participants seemed to take a last look at the incorrect target later when the sentence was presented with babble noise ($M = 3344\text{ms}$ after the ambiguity, $SD = 616\text{ms}$) than during sentences in silence ($M = 3120\text{ms}$ after the ambiguity, $SD = 593\text{ms}$) (Figure 4.1.9).

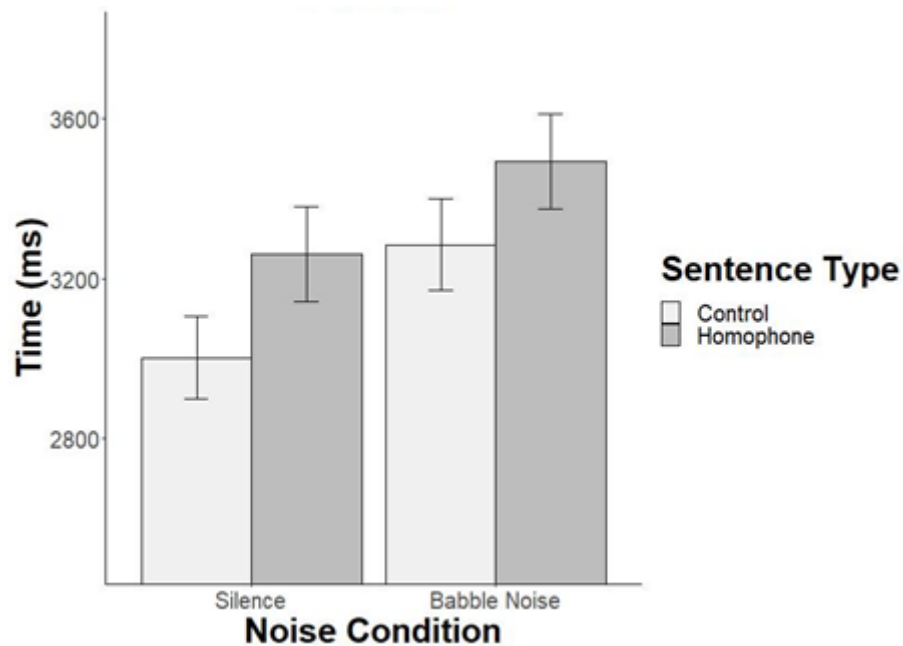


Figure 4.1.9: Time participants last looked at the incorrect target as a function of Noise Condition and Sentence Type

1.4.3 Online language comprehension and executive function relationship

As previously mentioned, for a better interpretation of the correlation results different indexes were computed for each task. Correlation analyses revealed a significant positive correlation between the false alarm index of the SART and the index for the cost of homophone processing on the look to the incorrect goal ($r = 0.363$, $p < .05$). This correlation suggests that the higher the number of false alarms the participants made, the bigger the difference in proportion of fixation on the incorrect target between homophone and control sentences (Figure 4.1.S1A). In other words, participants with lower performances in updating working memory tended to look more at the incorrect target during the language comprehension task. This analysis also

revealed a significant positive correlation between RT Flanker index and the index for the cost of noise processing on the look to the phonological distractor ($r = 0.455$, $p < .05$). In other words, the higher the difference in reaction time between incongruent and congruent trial in the Flanker task (i.e., the bigger the interference), the bigger the difference in proportion of fixation to the phonological distractor between babble noise condition and silence condition (Figure 4.1.S1B). Regarding the general factors computed, we observed a significant correlation ($r = -0.33$, $p < .05$) between FactorG1 and the noise index for the proportion of fixation on the incorrect target (Figure 4.1.S2A) and a significant correlation ($r = -0.31$, $p < .05$) between FactorG2 and the homophone index for the proportion of fixation on the incorrect target (Figure 4.1.S2B). These two correlations suggest that the better participants' executive control performances the fewer their consideration of the incorrect target. In other words, participants with better executive control abilities were less impacted by difficult language situations such as noise or lexical ambiguity.

1.5 Discussion

The present study aimed at evaluating the effect of the speech-in-speech situation (babble noise) on oral language comprehension and more specifically on lexical ambiguity processing (i.e., homophone processing). For this purpose, we used a visual scene with eye-tracking measurement while participants were listening to sentences containing or not a homophone and presented with or without babble noise. Interestingly, the pattern of effect for the probability of look to the different targets and for the behavioral reaction times differed. Indeed, we observed an effect of babble noise on reaction times but not on the probability of look to the correct or incorrect targets. The fact that we do not observe the effect with eye movement measures on correct or incorrect targets suggests that babble noise does not affect automatic language processing as eye movements have been linked to online relevant information processing to establish reference during language comprehension (Eberhard et al., 1995; Tanenhaus et al., 1995). However, we observed an effect of babble noise on the probability of look to the phonological distractor and not on semantic distractor suggesting that babble noise has an effect on phoneme selection but not on semantic selection. In other words, the speech-in-speech situation increased consideration of other phonological candidates (Marxer et al., 2016) probably due to energetic masking. This effect is in line with the positive correlation

observed between the Flanker index and the noise index for the fixation on the phonological distractors. In fact, this correlation suggests that participants who exhibited a large Flanker cost (i.e., low resistance to interference performances) tended to look more to the phonological distractor than participants who exhibited smaller Flanker cost. Thus, it seems that engagement of executive functions such as attention and interference resistance are related to language processing in difficult situations and phoneme selection in particular here. Correlations observed with general factors also reflected a relationship between language comprehension under difficult situations and cognitive control performances. Indeed, it seems that the better our cognitive control abilities the better our language comprehension under challenging situations.

The longer reaction times under babble noise can be interpreted in two ways. This observation either reflects additional language processing such as reinterpretation or resolving competition between activated meanings that could not be detectable with eye-tracking measures, or it reflects task-dependent processes not related to language processing such as a delay in decision making or an interference with executive functions. If the eye-tracking measure evaluates language comprehension, we could say that babble noise does not interfere with language comprehension mechanisms. However, eye-tracking measures seem to reflect lexical activation more than language comprehension in that eye movements are usually locked to the word being heard (Tanenhaus et al., 1995). This points out the fact that lexical ambiguity driven by homophone processing goes beyond lexical activation and that additional processes are at work in the integration of information and in the ambiguity resolution. In fact, the recovery from activation and look to the incorrect goal suggests that selection of a meaning has been made (and probably inhibition of the other) and that this meaning has been integrated in the representation of the sentence being processed. Importantly, the difference in probability of look to the correct and incorrect target shortly after the appearance of the homophone in silence supports previous work showing a frequency effect when encountering a homophone with a neutral sentence context (Chen & Boland, 2008; G. B. Simpson, 1981). In fact, when the previous sentence context does not bias toward one meaning of a homophone, participants first interpret the homophone according to its dominant meaning.

The main effect of babble noise observed for the last look to the incorrect target also supports the view of additional processing taking place when language comprehension is difficult. In fact, participants had a last look at the incorrect target later for the sentences presented with babble noise than for sentences presented in silence. This result can be interpreted as the evidence of a longer time to resolve the lexical ambiguity or as a last check after having correctly understood the sentence. In both cases, the multi-talkers situation involves additional processing. Whether these additional processes are any specific remains debated in the literature. Some authors postulate that processing difficult language involves language specific executive functions (Ben-Shachar et al., 2003; Diachek et al., 2020; Ryskin et al., 2020) while other authors support the view of an involvement of domain general executive processes (Hsu & Novick, 2016; Ye & Zhou, 2009b for a review). The correlation observed between the proportion of false alarms in the SART and the homophone cost index for the fixation on the incorrect target suggests a link between difficult language processing and non-linguistic executive functions and more specifically inhibitory control and goal maintenance. Thus, this result may hint at the involvement of domain-general executive functions during language processing as it is only a correlational analysis.

The homophone effect observed in terms of proportion of look to the incorrect target supports the view of a frequency effect with a higher probability of look to the target depicting the most frequent (and so dominant) meaning of the homophone. The main effect of sentence type on the last look to the incorrect target also supports this view as participants tended to have a last look at the incorrect target later for sentences containing a homophone than for control sentences. These findings are in line with findings of Chen & Boland (2008) that showed an influence of meaning frequency on language processing in a neutral sentence context. Thus, it seems that in a neutral sentence context the meaning of processed words influences the way the sentence is processed.

Finally, the interaction observed in terms of reaction times does not follow our hypothesis of a larger difference between homophone and control sentences presented with babble noise than presented in silence. Instead, we observed the opposite effect with a larger difference in reaction times between homophone and

control sentences when presented in silence. This result suggests a smaller impact of ambiguity in a speech-in-speech situation than in silence. The reduction of the difference between homophone and control sentences during babble noise could be attributed to attentional and executive mechanisms. In fact, while participants have to understand the beginning of the sentence in the multi-talkers situation, their attention is increased due to the need to inhibit energetic and informational masking from the babble noise. This way it is possible that processing the beginning of the sentence with the babble noise pre-activated executive control processes that are subsequently recruited to help resolve lexical ambiguity. This result is in line with the study of Hsu, Kuchinsky, and Novick, (2020) who showed that a pre-activation of executive processes through a Flanker task facilitated subsequent syntactic ambiguity resolution (see also El Bouzaïdi Tiali et al., 2021; Hsu & Novick, 2016).

1.6 Conclusion

This study gives insight into online oral language comprehension during challenging situations. Multi-talker situations and lexical ambiguity seem to impact online language processing and reduce language comprehension abilities. This type of situation seems to require additional processing in order to correctly understand the message being processed. Correlational results suggest that these additional processes rely on or are in part linked to cognitive control.

1.6.1 Supplementary material

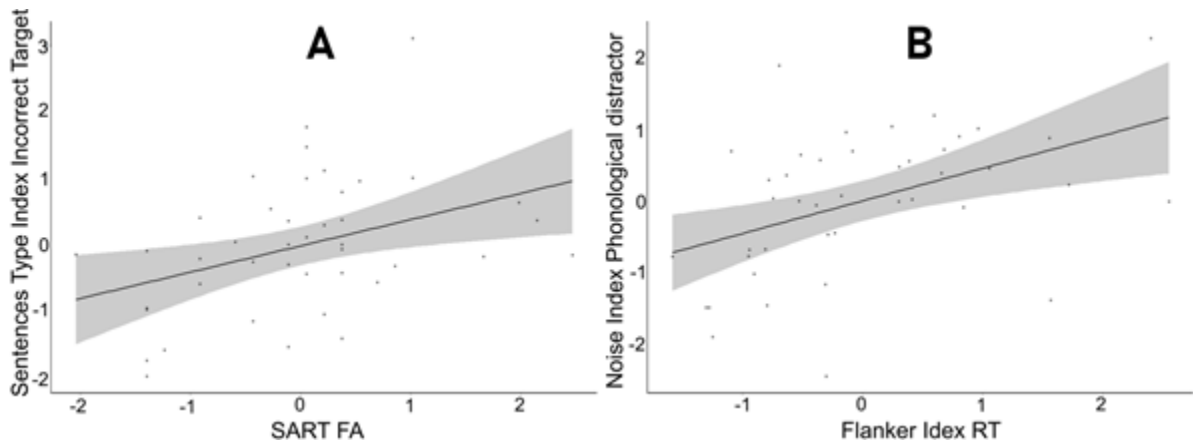


Figure 4.1.S1: A) Correlation between SART false alarm index and Sentence Type index for incorrect target fixations. B) Correlation between Flanker difference index for RT and Noise index for phonological distractor fixations

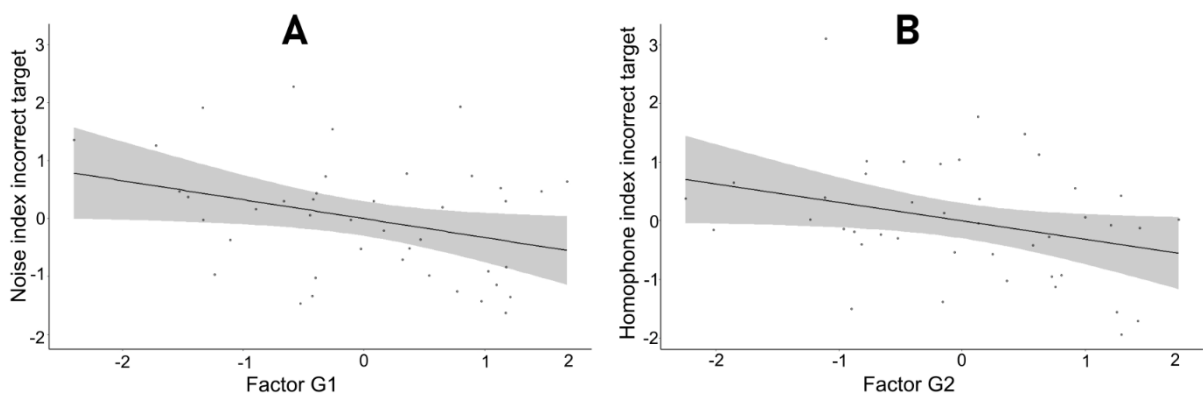


Figure 4.1.S2: A) Correlation between FactorG1 and Noise index for incorrect target fixations. B) Correlation between FactorG2 and Homophone index for incorrect target fixations

En résumé

Dans cette étude, nous avons évalué la compréhension du langage dans une situation particulière de difficulté, celle de la compréhension de phrases contenant une ambiguïté lexicale ou non dans une situation de parole dans la parole ou dans le silence. Nous avons également évalué les performances de contrôle cognitif des participants à l'aide de différentes tâches exécutives. Nous faisons l'hypothèse d'une relation entre les performances langagières et les performances de contrôle cognitif, ce d'autant plus lorsque la complexité du traitement langagier était élevée.

L'effet d'ambiguïté observé suggère une considération plus grande dans les premiers instants de traitement de l'homophone du sens dominant de ce dernier. Ce résultat réplique l'effet de fréquence observé dans la littérature lors du traitement d'homophone dans un contexte neutre. De plus, il suggère que la résolution de cette ambiguïté et donc la sélection du sens approprié de l'homophone implique davantage de ressources cognitives, rallongeant ainsi le temps de traitement. En ce qui concerne la situation de parole dans la parole sur le traitement du langage, celle-ci semble agir sur les processus de traitement du langage à différents niveaux. En effet, l'observation d'un effet de la situation de parole dans la parole sur la probabilité de regard sur le distracteur phonologique montre un effet d'une telle situation sur le traitement phonologique des mots et plus particulièrement sur la considération des potentiels candidats phonologiques. Cet effet va de pair avec la corrélation observée entre la mesure de résistance à l'interférence et l'effet de la situation de parole dans la parole puisque les participants ayant les moins bonnes capacités de résistance à l'interférence et d'inhibition semblent être ceux qui sont le plus impactés par les voix distractrices dans la situation de parole dans la parole. Enfin, l'effet de la parole dans la parole sur la mesure du dernier regard sur l'image incorrecte ainsi que les corrélations observées entre l'indice SART, les facteurs généraux et les indices de proportion de regard sur l'image incorrecte suggèrent une relation étroite entre les processus de contrôle cognitif et ceux de compréhension du langage. En revanche, les effets observés étant des mesures corrélationnelles, aucun lien direct de causalité ne peut être inféré entre l'implication du contrôle cognitif et les mécanismes de compréhension du langage. L'évaluation d'un tel lien de causalité sera l'objet des deux prochaines études (Etudes 2 et 3).

2. Etude 2 : Influence du traitement d'ambiguïtés lexicales sur les processus de contrôle cognitif : paradigme en double tâche

L'objectif de cette étude était d'évaluer la potentielle relation causale entre les mécanismes de compréhension du langage et les processus de contrôle cognitif. Au vu des résultats de l'étude précédente montrant un effet de l'ambiguïté lexicale sur la vitesse de traitement et une relation entre les processus de compréhension et ceux de contrôle cognitif, nous avons décidé de continuer d'utiliser l'ambiguïté lexicale comme moyen de modulation de la complexité du traitement langagier. Les études montrant une relation causale entre les processus de contrôle cognitif et ceux de compréhension du langage se sont principalement concentrées sur l'effet du contrôle cognitif sur les processus de traitement du langage (e.g., Hsu & Novick, 2016; Thothathiri et al., 2018). Cependant, si une relation fonctionnelle apparaît entre ces processus, il est possible que les influences entre ces processus soient réciproques et bidirectionnelles. Ainsi, dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'impact du traitement d'homophones sur les mécanismes de contrôle cognitif. Le traitement d'un homophone nécessite la sélection du sens pertinent et l'inhibition du sens non pertinent de ce dernier. Nous avons ainsi fait l'hypothèse que cette sélection et inhibition sémantique serait soutenue par des processus de contrôle cognitif, ce indépendamment de la modalité. Ainsi, nous nous attendions à observer un coup cognitif sur la tâche de contrôle lorsque le traitement de l'homophone se faisait de manière simultanée.

Cette étude expérimentale est un article publié reformaté pour les besoins de ce manuscrit. Source : El Bouzaïdi Tiali, S., Spinelli, E., Meunier, F., Palluel-Germain, R., & Perrone-Bertolotti, M. (2021). Influence of homophone processing during auditory language comprehension on executive control processes: A dual-task paradigm. *Plos one*, 16(7), e0254237. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254237>

Cette étude a également été pré-enregistrée sur la plateforme OSF contenant l'ensemble du matériel utilisé. Source : https://osf.io/65saf/?view_only=7995e9d41aab4d978cbf7f3a72cf24ac

Influence of homophone processing during auditory language comprehension on executive control processes: a dual-task paradigm

Abstract

In the present preregistered study, we evaluated the possibility of a shared cognitive mechanism during verbal and non-verbal tasks and therefore the implication of domain-general cognitive control during language comprehension. We hypothesized that a behavioral cost will be observed during a dual-task including both verbal and non-verbal difficult processing. Specifically, to test this claim, we designed a dual-task paradigm involving: an auditory language comprehension task (sentence comprehension) and a non-verbal Flanker task (including congruent and incongruent trials). We manipulated sentence ambiguity and evaluated if the ambiguity effect modified behavioral performances in the non-verbal Flanker task. Under the assumption that ambiguous sentences induce a more difficult process than unambiguous sentences, we expected non-verbal flanker task performances to be impaired only when a simultaneous difficult language processing is performed. This would be specifically reflected by a performance cost during incongruent Flanker items only during ambiguous sentence presentation. Conversely, we observed a facilitatory effect for the incongruent Flanker items during ambiguous sentence suggesting better non-verbal inhibitory performances when an ambiguous sentence was simultaneously processed. Exploratory data analysis suggests that this effect is not only related to a more difficult language processing but also to the previous ($n-1$) Flanker item. Indeed, results showed that incongruent $n-1$ Flanker items led to a facilitation of the incongruent synchronized Flanker items only when ambiguous sentences were conjointly presented. This result, even if it needs to be corroborated in future studies, suggests that the recruitment of executive control mechanisms facilitates subsequent executive control implication during difficult language processing. The present study suggests a common executive control mechanism during difficult verbal and non-verbal tasks.

2.1 Introduction

A controversial question in the literature is whether language comprehension involves cognitive mechanisms specific for decoding linguistic information (i.e., domain-specific) or whether language comprehension implies more domain-general cognitive resources. Several authors suggested that, in all circumstances, language comprehension is performed by language-specific mechanisms only (Diachek et al., 2020; Ryskin et al., 2020; Shain et al., 2019). Other authors argue for a more domain-general account of language comprehension in which linguistic information processing could be shared with a larger machinery that encompasses other cognitive functions such as executive control (e.g., (Fedorenko & Thompson-Schill, 2014; Hsu et al., 2017). In line with this approach, neuroimaging studies showed the involvement not only of the canonical language brain network (i.e. typical brain regions involved in language processing including the inferior frontal gyrus and the superior temporal cortex (Fedorenko & Thompson-Schill, 2014), but also others brain networks such as the multiple demand network (see e.g. Duncan, 2010; Hagoort, 2013; Hasson et al., 2018; Thompson-Schill et al., 1997). Some authors also suggest that executive resources are not critical for language processing, but their implication depends on the situation demands. In line with this last proposition, the *Good-Enough* approach (Ferreira et al., 2002) suggested that cognitive processes at work during language comprehension would depend on the situation requirements. Indeed, data from this approach showed that in most daily life situations only a heuristic analysis is performed as little information is sufficient to have a general idea of what has been said and to be able to communicate. Nevertheless, when the situation requires a deep understanding or when the speech is physically or linguistically degraded (Wild et al., 2012); or when the linguistic information is complex (Thothathiri et al., 2018) or ambiguous (Hsu & Novick, 2016), then a domain-general mechanism is suggested to be involved and it allows a deeper and controlled analysis.

In this debate, the relationship between language processing and executive control has been mostly studied using neuroimaging methods showing an overlap of brain regions recruited during both executive control and language processing tasks (Musz & Thompson-Schill, 2017; Novais-Santos et al., 2007; van de Meerendonk et al., 2013; Ye & Zhou, 2009a). January, Trueswell, and Thompson-Schill (2009) showed such an overlap in an fMRI study between bold activity in the posterior left

inferior frontal gyrus (LIFG) during high conflict sentence comprehension and incongruent Stroop trials. This overlap suggests that cognitive processes during language resolution and the executive inhibitory processes share the same brain structure (see Fedorenko, 2014; Ye & Zhou, 2009b for reviews). However, it has been argued that this overlap was observed because of the use of a verbal executive control task. According to this view, processes supporting such a verbal conflict resolution would be language-specific and would rely on language-specific brain regions (Ben-Shachar et al., 2003; Blank et al., 2014). Recently, Hsu, Jaeggi, and Novick (2017) showed that the LIFG could be considered as a conflict resolution hub that coordinates with different networks depending on the task (see also Perrone-Bertolotti et al., 2020). More specifically, authors showed that the LIFG was recruited during language conflict as well as during resolution of proactive interference in working memory (i.e., interference of previously learned materials on acquisition of newer materials) and during executive control. Therefore, it seems that both domain-general and domain-specific processes interact during conflict resolution in language comprehension tasks supporting the view of an involvement of executive control processes during language processing.

Additional evidence for such an involvement comes from neuropsychological studies. Vuong and Martin (2011) tested three patients (two with a LIFG lesion and one control patient without a LIFG lesion) on an attentional control tasks as well as in a language comprehension task. Attentional control tasks consisted of a Stroop task, a Picture-word interference task (i.e., patients had to name a picture while ignoring the written word), a modified Recent-negative task (i.e., patients saw series of three words followed by a probe and had to tell whether the probe was presented in the series), and a short-term memory task. In the language comprehension task, patients read sentences containing or not a lexical ambiguity and then had to name a word. Patients with a LIFG lesion exhibited lower attentional control performances and more difficulties to resolve these ambiguities. Authors interpreted this result as evidence for the role of attentional control in lexical ambiguity resolution. Novick, Kan, Trueswell and Thompson-Schill (2009) also showed such a pattern with LIFG lesion patients during comprehension of syntactically ambiguous sentences. More specifically, patients presented difficulties to inhibit and revise their first interpretation of syntactically ambiguous sentences supporting the view of an involvement of inhibitory

processes during difficult language comprehension situations. Interestingly, a similar pattern of results has been observed among children who are known to have lower cognitive control abilities due to the slow maturation of the frontal cortex (Fuster, 2002). Children around the age of five showed more difficulties to follow temporarily syntactically ambiguous instructions than adults with less abilities to revise and inhibit their first interpretation (Trueswell et al., 1999; Weighall, 2008; Woodard et al., 2016).

On a behavioral level, several studies showed correlations between executive control performances and language processing (Perrone-Bertolotti et al., 2017; Vuong & Martin, 2014) suggesting shared cognitive processes between both executive control and language comprehension. For example, Hussey and collaborators (2017) showed an improvement in language processing after a cognitive control training through a N-back task. During this training task, participants saw letters one by one and had to update information in working memory in order to be able to decide whether the presented letter was the same as the one presented three letters before (i.e. 3-back). After a N-Back training session, participants were tested on a language processing task. Participants who performed a high-conflict training reread faster and more easily ambiguous sentences than participants who performed a low-conflict training (see also Hussey & Novick, 2012; Novick et al., 2014 for similar studies). Thus, training evidence suggested a causal effect of domain-general executive control on language performances. Similarly, Rodd, Johnsrude, and Davis (2010) reported results suggesting that ambiguous sentences comprehension relied on domain-general processes. More specifically, participants listened to semantically ambiguous (containing a homophone) and unambiguous sentences and conjointly performed a case-judgement task. Authors manipulated the sentence linguistic contexts in order to induce a priori disambiguation (from prior context), an immediate disambiguation (from the words following the homophone) or a delayed disambiguation (from the end of the sentence). They evaluated the interference effect on the synchronized case-judgment task (i.e., decide whether a presented letter is in upper or lower case) on each disambiguation condition (prior, immediate or delayed disambiguation). Results showed that participants were slower on the case-judgment task for the delayed disambiguation condition compared to other conditions, i.e. they exhibited an interference effect. This result suggests that ambiguous sentences required executive control resources during the syntactic reanalysis of ambiguous sentences.

Together, these behavioral studies emphasize the view of an involvement, in some circumstances, of different executive control processes during language comprehension. However, the majority of these studies used verbal materials to evaluate such an involvement of executive control processes during language comprehension. In other words, the tasks used to evaluate executive control were designed with verbal or visuo-verbal items. Thus cognitive processes involved during such tasks could be considered as specific to language rather than more domain general processes letting uncertainties around processes at work during language comprehension. In an eye tracking experiment, Brown-Schmidt (2009) was able to predict participants' language comprehension performances based on a verbal inhibitory assessment but failed to do so based on non-verbal inhibitory assessment. Such result could be used as an argument for a domain-specific view of language comprehension but the author rather explained it as a ceiling effect or an absence of conflict inhibition in the non-verbal inhibitory task. In our study, we used a non-verbal executive control task in order to evaluate domain-general processes involvement during language comprehension.

The present study aims at evaluating the possibility of shared cognitive mechanism during verbal and non-verbal tasks and therefore the implication of domain-general cognitive control during language processing. Based on the assumption that the interference between two tasks reflects the recruitment of a common cognitive resource (Tombu & Jolicoeur, 2003), we hypothesized that a behavioral cost will be observed during dual-task processing involving verbal and non-verbal tasks. To test this claim, we designed a dual-task paradigm involving an auditory language comprehension task (sentence comprehension) and a non-verbal Flanker task. We manipulated sentence ambiguity and evaluated if the ambiguity effect (related with a more difficult language processing) modified behavioral performances in the non-verbal Flanker task. We assumed that ambiguous sentences induce a more difficult language processing compared to unambiguous sentences. In our study, ambiguity is operationalized by the use of homophones. In ambiguous sentences all the possible meaning of the homophone are activated while in the unambiguous sentences the context preceding the homophone constrained and reduced activation of non-pertinent meanings of the homophone (see Chen & Boland, 2008; Hino et al.,

2002). Consequently, we expected performances on the Flanker items to be impaired only when a simultaneous difficult language processing was performed.

2.2 Materials and methods

This study has been preregistered on the Open Science Framework website before data collection. The project including protocol and material is available at this link: https://osf.io/65saf/?view_only=7995e9d41aab4d978cbf7f3a72cf24ac

2.2.1 Participants

Eighty students from Université Grenoble Alpes participated in this study (Mean age = 20.8yo, $SD = 3.4yo$) and received course credits for their participation. All were right handed and native French speakers with a normal or corrected vision and without any hearing problems. A power calculation for mixed effect models was computed using PANGEA's website (Power ANalysis for GEneral Anova designs, v0.2) (see parameters' details in the preregistered supplementary material) before the beginning of the experiment in order to assess how many participants were needed. This power calculation revealed a needed sample of 80 participants. Each participant gave written consent before performing the experiment. This study has been approved by the local ethical committee (CERGA [Comité d'éthique pour la recherche, Grenoble Alpes], N°CER Grenoble Alpes-Avis-2020-03-10-02).

2.2.2 Task

Participants were instructed to perform a dual-task paradigm involving: a Flanker task (Eriksen & Eriksen, 1974) and an auditory language comprehension task. More specifically, participants were instructed to listen to auditory sentences and to perform a Flanker task at the same time (see Figure 4.2.1). The Flanker task was designed to measure inhibition control and interference resistance by assessing ability to suppress predominant response. For the Flanker task, participants were instructed to decide whether a central arrow in a string of five arrows pointed to the right or to the left. For the auditory language comprehension task, participants were instructed to listen to the auditory delivered sentences and to be able to answer a yes/no question related to these sentences. See below for specificity of each task.

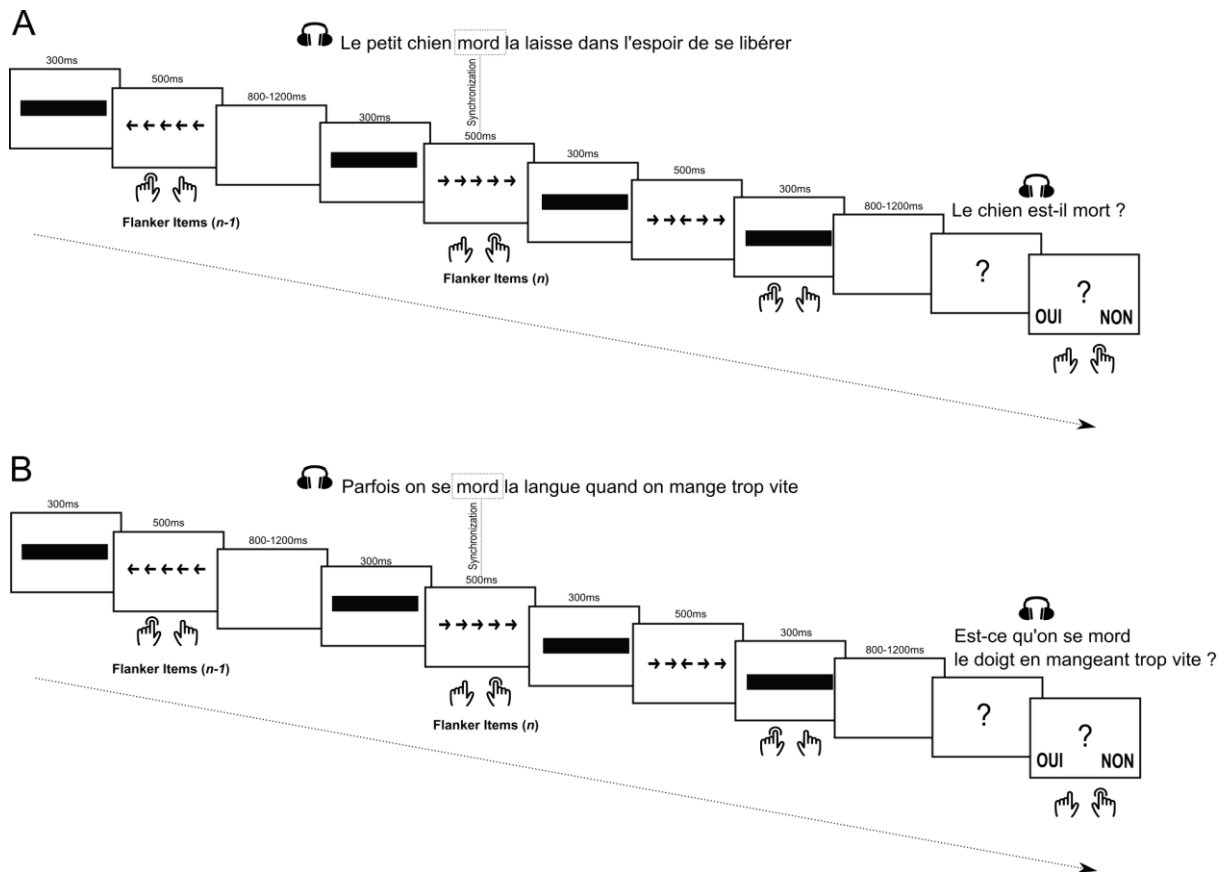


Figure 4.2.1: Dual-task paradigm involving a Flanker task and an auditory language comprehension task

Example of three consecutive Flanker items (with masks and inter-stimulus intervals) presented with (A) an ambiguous auditory sentence (“*Le petit chien mord la laisse dans l’espoir de se libérer*”; i.e., The little dog bites the leash hoping to free himself) and an auditory question by the end (“*Le chien est-il mort ?*”; i.e., “Is the dog dead?”) or (B) a control auditory sentence (“*Parfois on se mord la langue quand on mange trop vite*”; i.e., Sometimes we bite our tongue when we eat too fast) and an auditory question by the end (“*Est-ce qu’on se mord le doigt en mangeant trop vite ?*”; i.e., “Do we bite our finger when we eat too fast?”). Participants responded with both hands for left or right and yes or no answers.

2.2.3 Stimuli

2.2.4 Flanker items

The Flanker visual stimuli were strings of five arrows either all pointing to the same direction (left or right, these items are called congruent Flanker items), or with the central arrow pointing to the opposite direction of the other four arrows (incongruent Flanker items). A total of 520 trials were presented, half of them were congruent while the other half were incongruent. Strings of arrows were presented in the center of the

screen (grey background) with a visual angle of 3.6 degrees (around 4 centimeters on the screen).

2.2.4.1 Auditory language comprehension stimuli

A set of 130 auditory French sentences were selected from the study of Millotte, René, Wales, and Christophe (2008) and were included in the present study in three different experimental conditions: Ambiguous, Control and Fillers.

The Ambiguity condition included 20 pairs of temporary ambiguous sentences (mean duration = 2974ms; SD = 430ms). In these sentences, lexical ambiguity was manipulated by the presence of an auditory homophone word that is only disambiguated by the subsequent lexical context. For example, in the sentence “*Le petit chien mord la laisse dans l’espoir de se libérer*” (The little dog bites the leash hoping to free himself) the word “mord” (bites) presented auditorily can be interpreted either as the verb “mordre” (to bite) or as the adjective “mort” (dead) because of their similar pronunciation (/ m ɔ R /). In our example, the meaning of the homophone “*mord*” can be disambiguated with the following noun “*la laisse*”. Consequently, in the Ambiguous condition, it is the following context that disambiguates the homophone meaning.

The Control condition, also included 20 auditory sentences (mean duration = 3093ms; SD = 602ms). These control sentences contained the same homophones as the Ambiguous conditions but were unambiguous due to a different sentence context prior to the homophone. In particular, the beginning of the control sentence restricted possible meaning interpretations of the homophone to the correct one. For example, in the control sentence “*Parfois on se mord la langue quand on mange trop vite*” (Sometimes we bite our tongue when we eat too fast) the context preceding the homophone restrict the interpretation of the word “mord” (bites) only to that of the meaning of “mordre” (to bite) and not to the one of “mort” (dead). Each homophone was heard four times: twice for each of its meaning (once in an ambiguous context and once in a control context) (see Table 4.2.1). Importantly, in the original study of Millotte et al. (2008) from which we used the stimuli, ambiguous sentences were shown to induce an ambiguity effect with slower response times compared to control sentences in a language task.

The Filler condition included 50 auditory sentences (mean duration = 2903ms; SD = 599ms) with similar syntactic structure as control and ambiguous sentences. This condition was included in order to make sure participants do not guess experimental manipulation and hypotheses

Table 4.2.1: Example of the four experimental conditions with a similar homophone presentation (the homophone word is in bold and underlined in the sentence)

Sentences stimuli	Sentence type	Flanker congruency
Parfois on se <u>mord</u> la langue quand on mange trop vite. <i>Sometimes we bite our tongue when we eat too fast.</i>	Control	Congruent
Le petit chien <u>mord</u> la laisse dans l'espoir de se libérer. <i>The little dog bites the leash hoping to free himself.</i>	Ambiguous	Congruent
Maintenant qu'il est <u>mort</u> , les batailles d'héritage vont commencer. <i>Now that he's dead, the legacy battles will begin.</i>	Control	Incongruent
Le petit chien <u>mort</u> sera enterré demain par ses maîtres. <i>The dead little dog will be buried tomorrow by its owners.</i>	Ambiguous	Incongruent

All the sentences used presented a minimally informative prosodic pronunciation (see Millotte et al., 2008), in order to reduce the effect of prosody on ambiguity resolution and meaning selection. For each sentence, a yes/no comprehension question was recorded by a male speaker and presented at the end of the trial. Participants had 2500ms to respond after the end of the question.

All stimuli were presented using E-Prime software (v2.0.10.353). Auditory stimuli were presented in a headphone with a comfortable sound level set by participants and manual responses were made on a keyboard. Participants gave their manual responses with both hands, right hand for right Flanker arrow direction and *no* answer to questions and left hand for left Flanker arrow direction and *yes* answer to questions.

2.2.5 Procedure

Participants were instructed to listen to sentences and at the same time respond to Flanker items. They had to tell whether the central arrow of the Flanker items pointed

to the left or the right. Sentences and Flanker items were synchronized in such a way that some Flanker items started at the same time as a homophone was presented in a sentence. This manipulation was designed to involve the lexico-semantic selection at the same time as the Flanker item processing (Figure 4.2.1). For filler sentences, the Flanker item appeared at the same time as a random word in the sentence. Before each sentence, two Flanker items were presented without any auditory presentation.

Each trial was made of four Flanker items and one sentence. The trials started with two Flanker items presented in silence. Flanker items started with a central rectangle (also used as a visual mask) presented for 300ms followed by the string of arrows presented for 500ms. Time between two Flanker items varied between 800ms and 1200ms in order to avoid participants to anticipate stimulus presentation and rhythmic responses. The third Flanker item was the one synchronized with the homophone for Ambiguous and Control condition or with a random word for the Filler condition. The fourth Flanker item appeared either by the end of the sentence or after the sentence depending on the sentence duration. Inter-trial intervals corresponded to a random duration between 800 ms and 1200 ms like between all Flanker items. Sentence type (Ambiguous, Control) and Flanker congruency (Congruent and Incongruent) were counterbalanced in order to obtain 20 trials for each condition crossing (see Table 4.2.1). Overall, participants performed 130 trials for a total of 130 sentences (40 Ambiguous, 40 Control, and 50 Fillers) and 520 Flanker items (260 Congruent and 260 Incongruent).

Finally, in order to make sure participants were involved in the two tasks, an auditory yes/no comprehension question was auditorily presented at the end of the trial. These comprehension verification questions were included in 75% of trials. Participants responded to Flanker items and to the question with two keyboard buttons. A short training session was proposed for the Flanker task; including 16 Flanker items (eight congruent and eight incongruent items). Reaction times and accuracy on all of the Flanker items and language comprehension questions were recorded.

2.3 Data Analyses

Statistical analyses were conducted using R version 4.0.3 (R Core Team, 2018), and lme4 (Bates et al., 2015) and lmerTest (Kuznetsova et al., 2017) packages.

2.3.1 Verification analyses

Before performing statistical analysis assessing the study hypothesis, we performed verification analysis evaluating: 1) accuracy of each task and 2) the dual-task cost. In order to be sure that participants performed the language task, we checked participants' performances on the comprehension task by the evaluation of the behavioral responses to the comprehension questions. Before the experiment, we set a threshold for each task below which we would consider participants as not sufficiently involved in the tasks and exclude them from the statistical analyses (see pre-registered Method section of the project on OSF). These thresholds were set to 75% and 80% of correct answers for the comprehension task and the Flanker task, respectively. Then, we verified that listening to sentences during Flanker items interfered with reaction times to Flanker items. To do so, we compared reaction times of Flanker items performed while listening to a sentence (i.e., the Flanker synchronized with the homophone, we called here this condition: Flanker-in-sentence condition) and those performed in silence (we called here this condition: Flanker-in-silence condition) in a mixed effect model.

2.3.2 Confirmatory (preregistered) analyses

The main goal of this study was to evaluate whether common cognitive mechanisms are shared during difficult verbal and non-verbal tasks. More specifically, we evaluated the impact of difficult language processing, as manipulated by ambiguous sentences during auditory sentences presentation, on the behavioral performances for a non-verbal conflict resolution induced by a Flanker task. All these analyses were focused on the performances (reaction times and errors) obtained on Flanker items performed while listening to a sentence (i.e., the Flanker synchronized with the homophone).

Regarding our hypothesis, we expected a significant main effect of Flanker congruency, with slower reaction times for incongruent than for congruent Flanker items. We also expected a main effect of sentence type reflected by slower reaction times to Flanker items (both congruent and incongruent) when synchronized with ambiguous sentences than when synchronized with control sentences (i.e., unambiguous sentences). Additionally, we expected an interaction between sentence type and Flanker congruency. In other words, we expected a larger incongruency cost

(i.e., larger difference between incongruent and congruent Flanker trials -in terms of both reaction time and accuracy-) during trials involving difficult language processing (i.e. ambiguous sentence condition) than during easy language processing (i.e., control sentences condition).

To statistically evaluate our hypotheses in terms of reaction times (RTs), we computed a mixed effect model on the RTs of the Flanker trials with, as fixed effects the following factors: sentence type (Ambiguous/Control), Flanker congruency (Congruent/Incongruent) and their interaction; and as random effects: the sentence's intercept, the subject's intercept, and the subject's random slope for Flanker congruency. In order to reduce the weight of extreme data, reaction times were *log* transformed. Only correct responses were included in the RTs analyses. Regarding accuracy measure, a logistic mixed effect model was computed with as fixed effects the following factors: sentence type, Flanker congruency and their interaction; and as random effects: the stimuli's intercept, the subject's intercept, and the subject's random slope for Flanker congruency. In both of these models, subject's random slope for sentence type was removed in order to avoid a possible overfitting.

2.3.3 Exploratory (non-preregistered) analyses

Previous studies on the Flanker task have shown a *sequential congruency effect* (Gratton et al., 1992; Grundy et al., 2017) suggesting an impact of the $n-1$ congruency on the n performances. Consequently, it is possible that we observe such a sequential effect in our paradigm between the *synchronized* Flanker items (n Flanker item) and the one that precedes it ($n-1$ Flanker item) (see Figure 4.2.1). More specifically, it is possible that the congruency of the Flanker item before the *synchronized* Flanker item impacts the *synchronized* Flanker item performance. In order to consider a such possible effect, we included this factor in our model: specifically, we included the Flanker congruency of the $n-1$ Flanker items. We computed a mixed effect model on the RTs of the Flanker items with, as fixed effects the following factors: sentence type (Ambiguous/Control), n Flanker congruency (Congruent/Incongruent), $n-1$ Flanker congruency (Congruent/Incongruent), their interactions and the three-way interaction; and as random effects: the sentence's intercept, the subject's intercept, and the subject's random slope for Flanker congruency. Moreover, in light of the sequential effect of the Flanker items, the

inclusion of the *n-1* Flanker congruency in our model will allow to absorb a lot of variance and consequently provide a better understanding of the processes involved during the task.

Finlay, we evaluated the possibility of a residual effect of the homophone processing. Indeed, in the present experiment, the control sentences were considered as unambiguous because the context preceding the homophone in the sentence driving lexical interpretation toward only one specific meaning of the homophone. Nevertheless, processing a homophone still involves different processing mechanisms than non-homophone words. For instances, in these control sentences, the context might indeed favor one interpretation of the homophone, but does not totally remove activation of other interpretations (Seidenberg et al., 1982; Tanenhaus et al., 1979). Consequently, in order to exclude this residual effect, we compared ambiguous sentences to filler sentences, i.e., sentences without word activating multiple meanings. We included the filler sentences in the sentence type variable of the statistical model evaluating the interaction between Flanker congruency on *synchronized* Flanker item and sentence type (i.e., Ambiguous, Control and Filler sentences). Thus, we were able to compare ambiguous sentences to control ones but also to filler sentences and their interaction with Flanker congruency.

2.4 Results

2.4.1 Verification analyses

As previously suggested to ensure that all participants correctly perform the dual-task paradigm, we checked accuracy in both Flanker and language comprehension tasks. We showed that all participants performed correctly the language comprehension task with rates higher than 75% (mean percentage of correct answers = 92%; SD = 27%). Regarding performances to the Flanker items (mean percentage of correct responses = 94%; SD = 8%), three participants were below the threshold of 80% of correct answers and were removed from the analyses. In addition to these thresholds, we excluded participants deviating from more than two standard deviations from the overall mean reaction time. Thus, a total of six participants were removed from the analyses.

We also evaluated the dual-task cost of participants by comparing participant's performances to flanker items performed in silence (i.e., Flanker-in-silence condition) and Flanker items performed during sentence comprehension (i.e., Flanker-in-sentence condition). This analysis revealed a main effect of Flanker situation (i.e., Flanker-in-silence condition v.s. Flanker-in-sentence condition) ($t = 24.46, p < .001$). Participants were slower for Flanker-in-sentence items (mean RT = 516ms; SD = 128ms) than for Flanker-in-silence items (mean RT = 455ms; SD = 100ms). This main effect is observed for both congruent and incongruent Flanker conditions (Figure 4.2.2) and confirms a cognitive cost of doing two tasks at the same time in this paradigm. Results also show a significant main effect of Flanker congruency ($t = 55.70, p < .001$) with participants being slower for incongruent items (mean RT = 515ms; SD = 111ms) compared to congruent ones (mean RT = 441ms; SD = 104ms). A significant interaction between Flanker situation and Flanker congruency ($t = -11.02, p < .001$) was observed. More specifically, this interaction reveals a larger incongruency cost (i.e., slower reaction times to incongruent items than to congruent items) during the Flanker-in-silence (mean difference incongruent minus congruent = 80ms; SD = 22ms) condition than during the Flanker-in-sentence condition (mean difference incongruent minus congruent = 57ms; SD = 31ms).

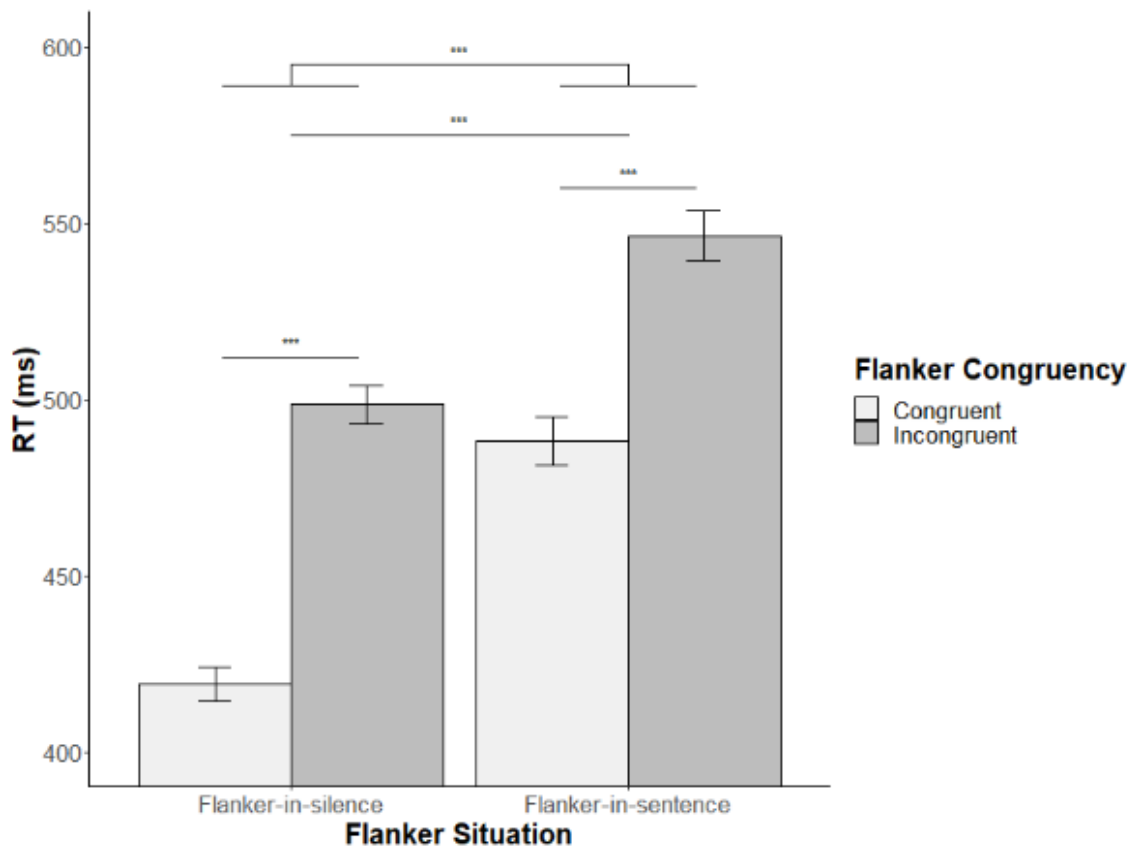


Figure 4.2.2: Reaction times for the Flanker items as a function of Flanker situation and Flanker congruency conditions
Note: *** $p < .001$.

2.4.2 Confirmatory results

In terms of accuracy, analysis of Flanker congruency (Congruent/Incongruent) and sentence type (Ambiguous/Control) revealed a significant effect of Flanker congruency ($Z = -5.21$, $p < .001$, $d = 1.53$) showing that participants responded more correctly for congruent ($M = 99\%$; $SD = 12\%$) than for incongruent ($M = 93\%$; $SD = 26\%$) Flanker items. We observed no significant effect of sentence type ($Z = 1.37$, $p = 0.17$) as well as no significant interaction effect between Flanker congruency and sentence type ($Z = -0.75$, $p = 0.46$).

In terms of reaction times, the computed model showed a significant main effect of Flanker congruency ($t = 11.29$, $p < .001$, $d = 2.34$). Participants were slower for the incongruent Flanker condition (mean RT = 539ms; $SD = 119$ ms) than for the congruent condition (mean RT = 482ms; $SD = 111$ ms). A marginal significant main effect of sentence type ($t = -1.91$, $p = 0.059$, $d = 0.44$) was observed in which participants seem

to be faster to Flanker items while listening to ambiguous sentences (mean RT = 505ms; SD = 119ms) than while listening to control sentences (mean RT = 516ms; SD = 121ms). Finally, no significant interaction between Flanker congruency and sentence type was observed ($t = 0.92$, $p = 0.36$). This absence of interaction effect prevents us from concluding on a modulated influence of the sentence type by Flanker congruency on Flanker items (Figure 4.2.3).

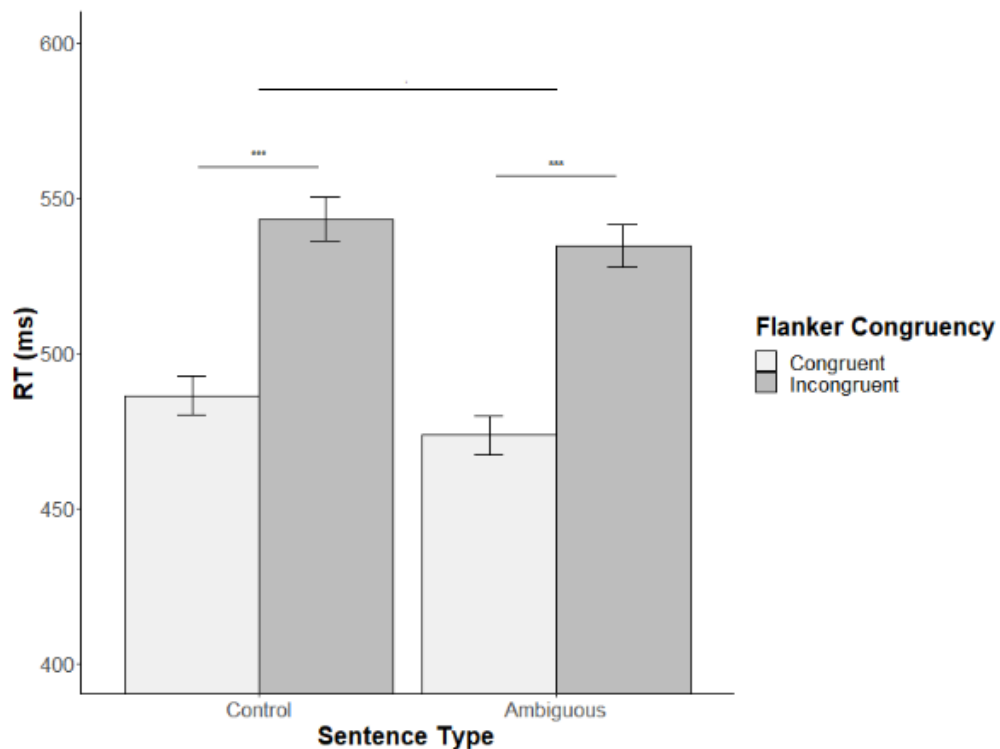


Figure 4.2.3: Mean reaction times for each experimental sentence type as a function of synchronized Flanker congruency
Note: * $p < .06$.; *** $p < .001$.

2.4.3 Exploratory results

The mixed model including $n-1$ Flanker congruency, *synchronized* Flanker congruency and sentence type as fixed effects revealed a significant main effect of *synchronized* Flanker congruency ($t = 3.73$, $p < .001$, $d = 0.84$). As observed in the first model (confirmatory results), participants were faster for congruent Flanker items than for incongruent ones. Analysis revealed a marginally significant interaction effect between *synchronized* Flanker congruency and sentence type ($t = 1.92$, $p = 0.058$, $d = 0.43$), showing that the incongruency cost (reaction times to incongruent items minus reaction times to congruent items) was slightly smaller for Ambiguous sentences than for Control ones. Finally, we observed a marginally significant

interaction between $n-1$ Flanker congruency, *synchronized* Flanker congruency, and sentence type ($t = -1.94$, $p = 0.056$, $d = 0.44$) as shown in Figure 4.2.4. This marginal effect could suggest a different pattern of interaction between the *synchronized* Flanker congruency and sentence type as a function of the $n-1$ Flanker congruency. This is why we also included in the analyses the interaction between $n-1$ Flanker congruency and *synchronized* Flanker congruency for Ambiguous and Control sentences separately.

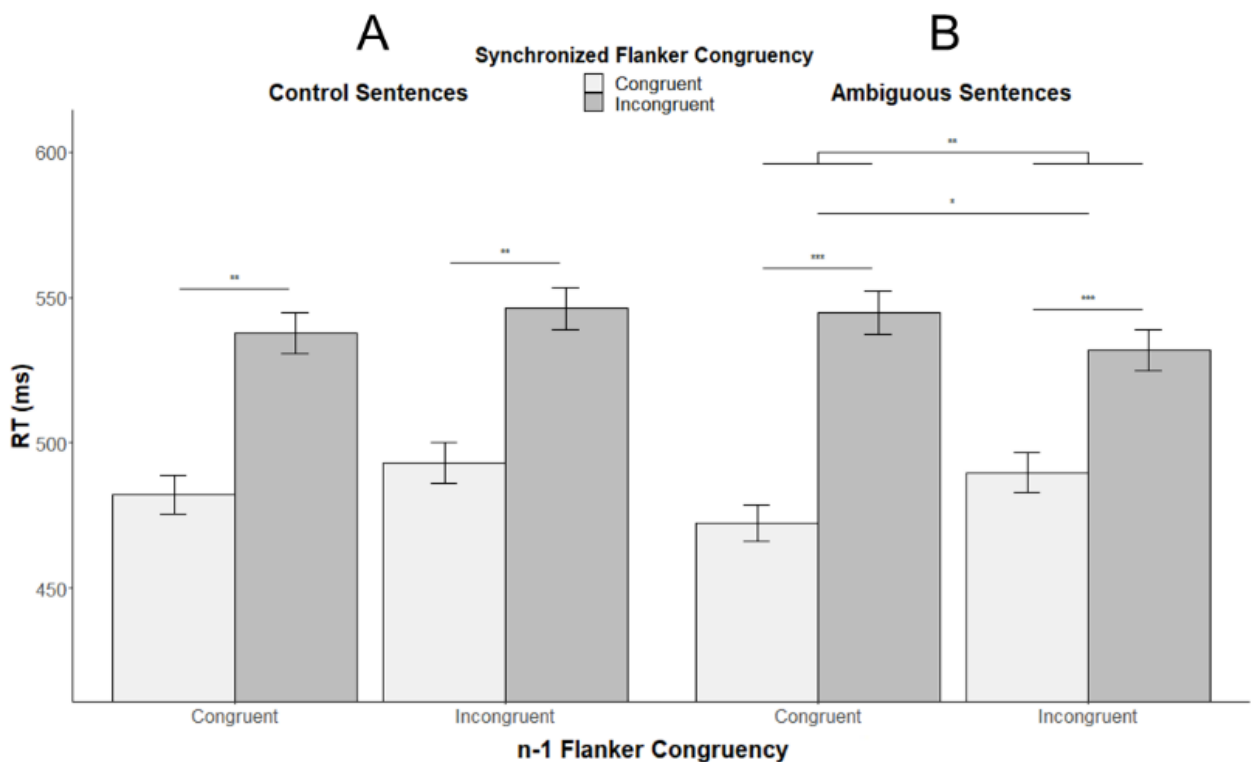


Figure 4.2.4: Mean reaction times to synchronized Flanker items as a function of synchronized and $n-1$ Flanker congruency and Sentence congruency

(A) shows a significant main effect of *synchronized* Flanker congruency for control sentences while (B) shows significant main effects of $n-1$ and *synchronized* Flanker congruency as well as a significant interaction effect between the two variables for ambiguous sentences.

Note: * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Regarding ambiguous sentences, we observed a significant effect of $n-1$ Flanker congruency ($t = 2.69$, $p = .01$, $d = 0.86$), suggesting an influence of $n-1$ Flanker items on *synchronized* ones. More specifically, for ambiguous sentences, participants were slower on the *synchronized* Flanker item after an incongruent $n-1$ Flanker item (mean RT = 521ms; SD = 122ms) than after a congruent one (mean RT = 490ms; SD = 117ms). We also observed a significant effect of *synchronized* Flanker congruency

($t = 6.9$, $p < .001$, $d = 2.19$), showing that participants were faster for congruent *synchronized* Flanker items (mean RT = 477ms; SD = 111ms) than for incongruent ones (mean RT = 535ms; SD = 123ms) when presented with ambiguous sentences. Finally, we observed a significant interaction effect between $n-1$ and *synchronized* Flanker congruency presented with ambiguous sentences ($t = -3.18$, $p = .003$, $d = 1.02$). These results suggest that the incongruency cost for *synchronized* Flanker items is smaller (mean difference between incongruent and congruent items = 42ms; SD = 54ms) after incongruent $n-1$ Flanker items than after congruent ones (mean difference between incongruent and congruent items = 73ms; SD = 70ms) when presented with ambiguous sentences (Figure 4.2.4B and Figure 4.2.5). Regarding control sentences, we only observed a significant effect of *synchronized* Flanker congruency ($t = 3.47$, $p = .001$, $d = 1.12$) showing that participants were faster for congruent *synchronized* Flanker items (mean RT = 490ms; SD = 119ms) than for incongruent ones (mean RT = 540ms; SD = 121ms) without specific influence of $n-1$ Flanker congruency (Figure 4.2.4A and Figure 4.2.5).

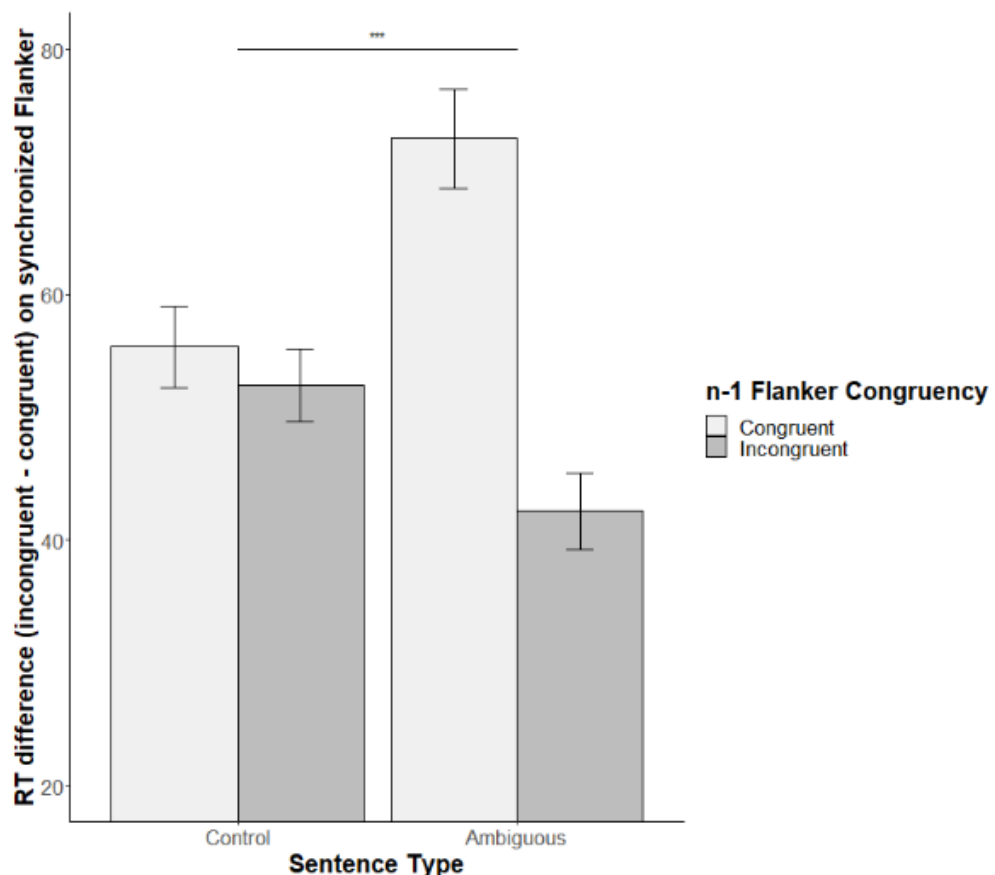


Figure 4.2.5: Mean reaction time difference between incongruent and congruent synchronized Flanker items as a function of sentence Type and $n-1$ Flanker Congruency

The analysis including fillers sentences revealed a significant difference between ambiguous sentences and filler ones ($t = 2.69$, $p < .05$, $d = 0.42$). This effect suggests that participants were slower for Flanker items while listening to fillers sentences (mean RT = 526ms; SD = 125ms) than while listening to ambiguous sentences (mean RT = 505ms; SD = 119ms) (see Figure 4.2.S1). Moreover, when we took filler sentences into consideration in our model, the difference between ambiguous sentences and control ones did not reach significance level suggesting that this effect was small compared to the one of filler sentences.

2.5 Discussion

The main goal of this preregistered study was to evaluate whether common cognitive control processes are shared during difficult verbal and non-verbal situations. Specifically, we evaluated the effect of homophone processing on a non-verbal conflict resolution task. We have for this purpose designed an experimental paradigm in which participants performed a non-verbal Flanker task synchronized or not with a homophone processing during an auditory sentence comprehension task. Participants were instructed to be involved in these two tasks at the same time (i.e., a dual-task paradigm). We expected the flanker task performances to be impaired only when a simultaneous difficult language processing was performed. This would be reflected by a performance cost during incongruent Flanker items for the more difficult language condition (ambiguous sentences) only.

Confirmatory results show a marginal effect ($p = 0.059$, $d = 0.44$) of sentence type on the Flanker task, in which participants seem to be faster to Flanker items while listening to an ambiguous sentence than a control one. It is important to highlight that given the paradigm used in the present study, in which the dependent variable measured was the reaction time to the *synchronized* Flanker items, this marginal main effect of sentence type can be interpreted as an influence of linguistic information processing on cognitive control processes at work during Flanker items. This marginal effect, even if it needs to be interpreted with caution, reveals a facilitatory effect in which difficult language condition facilitated the non-verbal inhibitory processes. It is important to note that this marginal effect was reversed with respect to our expectations. Indeed, we expected an interference effect, reflected by a Flanker item cost (i.e., a reaction time increase for the *synchronized* Flanker item) during difficult

sentences (i.e., ambiguous sentence) due to shared cognitive resources. Such effect would have corroborated the surprisal account proposed by Hale (2001) according to which cognitive control load corresponds to the amount of meaning possibilities rejected in a sentence (see also Levy, 2007). Instead, the present data showed that participants seemed to respond faster to Flanker items when presented with an ambiguous sentence than with a control one. This pattern of results is in line with the proposition of a cognitive control pre-activation effect during difficult language processing as previously suggested in the literature (Hsu & Novick, 2016; Kan et al., 2013; Thothathiri et al., 2018). It is possible that the cognitive load induced by ambiguous sentences (multiple activated meanings), and therefore a more difficult language situation, pre-activates executive control processes needed for the Flanker item, leading to faster reaction times.

Our exploratory analysis including the filler sentences, provides evidences in line with this facilitatory effect. Indeed, participants exhibited slower reaction times during the filler sentences (i.e. without any cognitive load because only one meaning is activated) than during ambiguous sentences. Consequently, it seems that a greater language difficulty led to a facilitation of the concomitant inhibitory conflict resolution (see S1 Fig 1 in supporting information). Flanker congruency effect on the $n-1$ items also brings evidence toward such a facilitatory effect. Indeed, previous studies suggested that conflict detection initiates sustained cognitive control which attenuates the cost of subsequent conflict processing (Gratton et al., 1992; Ullsperger et al., 2005): like a pre-activation effect of the cognitive control process. This effect is in line with our exploratory analysis in which a three-way marginal interaction ($p = 0.056$, $d = 0.44$) between the $n-1$ Flanker congruency, the *synchronized* Flanker congruency, and sentence type was observed. This marginal interaction is to be interpreted with caution. Nevertheless, it shows that the difference in reaction time between incongruent and congruent *synchronized* Flanker items is modulated both by $n-1$ Flanker congruency and sentence type conditions. More specifically, the interaction effect between the congruency on the $n-1$ and n Flanker (i.e. synchronized Flanker items) items is only observed during ambiguous sentences. Indeed, the incongruent $n-1$ Flanker items seem to reduce the incongruency cost only during ambiguous sentences presentation. The fact that the interaction effect appears only for ambiguous sentences supports the hypothesis of a recruitment of executive control during difficult language processing.

Furthermore, and even if this result need to be taken with caution because it is statistically marginal, it suggests that previous cognitive control pre-activation induces a facilitatory effect only when the following language processing is difficult.

This exploratory result is in line with findings reported by Hsu and Novick (2016) in an EyeTracking paradigm. They observed a facilitatory effect of a previous increase in executive control load (through incongruent Stroop trials) on syntactic resolution trials. Recently, Thothathiri, Asaro, Hsu and Novick (2018) used the same EyeTracking paradigm with active and passive sentences processing and also showed a facilitatory effect of previous high executive control load on the more difficult language condition (i.e., passive sentences). These studies show a direct relation between executive control processing arising from Stroop conflict and complex or difficult language conditions processing. It is important to highlight that these studies use executive control task in a verbal modality with the Stroop task, and this could be interpreted as the implication of a domain-specific conflict resolution mechanism. In our study, we used a non-verbal executive control task with the Flanker task in order to evaluate the possible implication of a domain-general mechanism during language processing. This way, our findings add evidence to the domain-general cognitive control account and suggest an involvement of non-verbal executive control during difficult language processing.

The present study presents several limitations. First, some results we are interpreting are marginally significant and would need to be replicated. Second, it is possible that the control sentences present a residual homophone effect (i.e., multiple meanings activated) as they contained the same homophone as those used in the ambiguous sentences. Even if the pervious homophone context is supposed to disambiguates and lead the interpretation toward the correct meaning (Altmann & Kamide, 1999; Millotte et al., 2008; Van Berkum et al., 2005), it is possible that a minimal activation of the other meanings remains. Consequently, the control sentences used might not be the most favorable condition for demonstrating the effect assessed in the present study. Another limitation can be related to the strength of the Flanker effect. Indeed, as previously mentioned, the Flanker effect is a strong behavioral effect that could mask other processes at work during this task. For this reason, it could be interesting to use a similar paradigm with another non-verbal executive task instead of

the Flanker task in order to better identify the different executive control mechanisms that are at work during difficult language processing. In our paradigm, it would also be very interesting to synchronize the Flanker item on the disambiguation point or after the disambiguation to have a better idea of cognitive load throughout sentence processing.

Further research is needed to investigate which executive control processes are at work during language comprehension. Different executive functions could be involved during different steps or types of language processing. For example, revising a syntactic ambiguity might involve inhibition processes and working memory as one has to inhibit first interpretation of an ambiguous sentence when realizing we are misinterpreting it and maintain already processed linguistic information in order to be correctly interpret the sentence (Rodd et al., 2010; Swets et al., 2007). The current study focused on non-verbal executive processes that might be at work during difficult language processing (multiple meanings activated). In a study with patients with aphasia, Hoffman, Rogers and Lambon Ralph (2011) showed that selection between several semantic meanings of words rely on control processes. In fact, authors showed that patient with aphasia, who are known to have difficulties inhibiting semantics associations (Noonan et al., 2010), exhibited a frequency effect on a synonym judgment test only when semantic diversity of words (i.e., how many meanings and semantic associations words can have) was taken into account. This study presents evidence for an involvement of inhibitory processes during lexical selection as more diverse words have more related meaning and more semantic associations that need to be inhibited in order to correctly perform the task. In a more recent study with two patients with aphasia, Nozari (2019) was able to segregate activation and inhibition processes involved in meaning selection during language production (see also (Mirman & Britt, 2014) for an interesting review on access deficits). Such a distinction between activation and inhibition during meaning selection might also appear in language comprehension and could be important to better rehabilitate patients with language deficits.

2.6 Conclusion

In this study, we evaluated the influence of difficult language processing on a concomitant Flanker task. Results seemed to show a facilitatory effect of difficult

language processing on Flanker processing. Thus, this study presents evidence for an involvement of non-verbal executive control processes during difficult language comprehension. Moreover, analysis considering $n-1$ Flanker items suggests an interaction between cognitive processes at work during Flanker items and difficult language processing reflecting the complex interplay between domain-general and domain-specific language processing.

2.6.1 Supporting Information

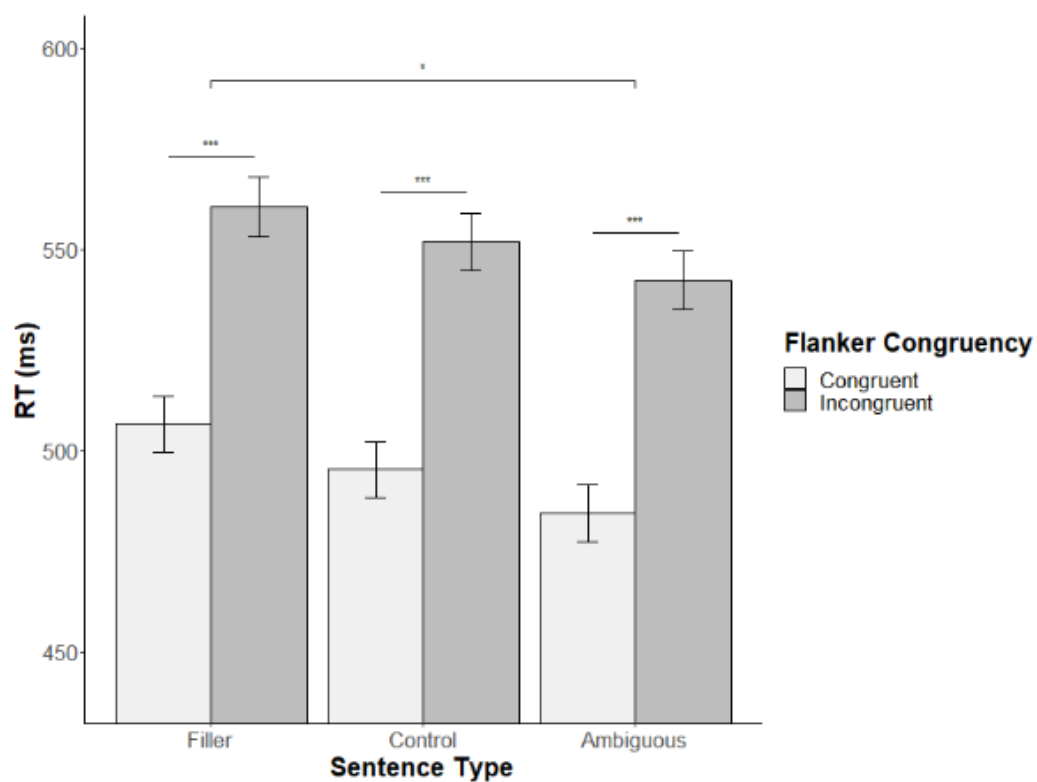


Figure 4.2.S1: Reaction times to Flanker items as a function of Flanker congruency and sentence type
Note. * $p < .05$. *** $p < .001$.

En résumé

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'influence d'un traitement langagier complexe sur les processus de contrôle cognitif. Plus particulièrement, nous nous sommes focalisés sur l'influence du traitement d'ambiguïtés lexicales sur les processus d'inhibition. Les travaux antérieurs semblent montrer une influence des processus de contrôle cognitif sur les mécanismes de compréhension du langage. Nous faisons l'hypothèse que cette relation entre contrôle cognitif en compréhension du langage pouvait être bidirectionnelle. Ainsi, nous nous sommes demandés si l'augmentation de la demande de traitement langagière pouvait impacter un traitement de contrôle apparaissant en même temps, auquel cas un partage de ressources entre les deux tâches (et donc indépendamment de la modalité) serait suggéré. Afin de tester cette hypothèse, nous avons mis au point ce paradigme expérimental en double tâche permettant la synchronisation d'un traitement langagier plus ou moins complexe (i.e., présence d'un homophone ou non) avec un traitement de contrôle non-langagier (congruent ou incongruent). Nous nous attendions ainsi à observer une interférence du traitement de l'ambiguïté lexicale sur le traitement exécutif non-langagier. L'effet d'ambiguïté observé révèle un effet de facilitation de l'ambiguïté plutôt qu'un effet d'interférence. En effet, l'augmentation de la charge de traitement engendrée par l'activation des différents sens des homophones et la sélection du sens pertinent semble pré-activer les processus de contrôle cognitif recrutés pour la tâche Flanker. L'absence d'un tel effet pour les phrases filler (i.e., sans homophone) supporte d'autant plus l'hypothèse d'une pré-activation des processus de contrôle cognitif par le traitement langagier complexe. Cet effet est cohérent avec les études manipulant la pré-activation du contrôle cognitif afin d'évaluer l'influence de cette manipulation sur le traitement langagier (Hsu et al., 2020; Hsu & Novick, 2016; Thothathiri et al., 2018) et montre une implication des mécanismes de contrôle cognitif lors d'un traitement langagier difficile. L'observation d'un impact de l'essai *n-1* uniquement lorsque le traitement langagier est complexe renforce également l'hypothèse d'une pré-activation du contrôle cognitif.

3. Etude 3 : Évaluation de l'engagement du contrôle cognitif lors de la compréhension du langage : réplique de l'étude de Hsu et Novick (2016)

L'objectif de cette étude était de répliquer l'expérience de Hsu et Novick (2016) dans laquelle les auteurs ont mis en place un protocole expérimental permettant d'évaluer un lien direct et causal du contrôle cognitif lors de la résolution d'ambiguïtés syntaxiques (adapté de Tanenhaus et al., 1995). Peu de paradigmes expérimentaux comportementaux ont été proposés dans la littérature pour évaluer un tel lien de causalité. En effet, la majorité des études évaluant la relation entre les mécanismes de compréhension du langage et les processus de contrôle cognitif se basent sur des études de neuroimagerie montrant un recouvrement des aires cérébrales recrutées lors des deux types de traitement (Musz & Thompson-Schill, 2017; Ye & Zhou, 2008), sur des études de neuropsychologie (Novick et al., 2009; Vuong & Martin, 2011), ou des études corrélationnelles (Perrone-Bertolotti et al., 2017). L'étude précédente a permis de mettre en évidence une relation causale entre les processus de contrôle cognitif et ceux de compréhension du langage, et plus particulièrement de traitement de l'ambiguïté lexicale. Cependant, l'ambiguïté lexicale apparaît de manière très temporaire laissant peu de marge de manœuvre pour évaluer une potentielle interaction avec d'autres processus cognitifs. C'est pourquoi nous avons souhaité tester l'effet du contrôle cognitif sur la résolution d'ambiguïtés syntaxiques en répliquant l'étude de Hsu et Novick (2016).

Cette étude visait également à caractériser le type de fonctions exécutives impliquées lors de la résolution d'ambiguïté syntaxique. A ces fins, nous avons également demandé aux participants de réaliser quatre tâches de contrôle cognitif évaluant les processus d'inhibition, de mise à jour en mémoire de travail, de flexibilité et d'attention soutenue. Cela nous a permis d'évaluer les relations entre les performances de contrôle cognitif des participants et leurs performances de compréhension du langage.

Cette étude a été pré-enregistrée sur la plateforme Open Science Framework (OSF).
Source : https://osf.io/tkhya/?view_only=00941722ef2842838bea887ddcaaf36c

Abstract

This study is a replication of Hsu and Novick (2016). It aims at assessing cognitive control engagement in language comprehension. In a first session, 30 participants performed four tasks assessing different cognitive control processes. During a second session, they performed a cross-task that interleaved Stroop and language comprehension (involving or not temporary syntactic ambiguity) trials. Results showed that the experimental manipulation of cognitive control and syntactic ambiguity during the cross-task did not enable us to show a cause-and-effect interplay between cognitive control and language as in the original study. We calculated the correlations between performance of the cross-task and those of each cognitive control task in order to assess which cognitive control processes were most related to syntactic ambiguity resolution and more generally to language comprehension. We also correlated participants' overall cognitive control performance calculated with different general factors from measures of executive control tasks. Results showed that the better the participants' executive control performance the bigger the cost of Stroop incongruency during the cross task and the bigger the difference of look to the correct target. We expose the potential causes of the failure of this replication attempt and discuss our results in the light of the link between cognitive control and language comprehension.

3.1 Introduction

La compréhension du langage est un processus automatique qui demande très peu d'effort et de contrôle (Shtyrov, 2010). Cependant, dans certaines situations les conditions de compréhension sont dégradées, ou le matériel langagier est ambigu ou complexe. Il est suggéré que dans de telles situations les fonctions exécutives seraient impliquées dans les processus de compréhension du langage afin de faciliter le traitement de l'information et de résoudre, entre autres des possibles conflits.

Les fonctions exécutives, également appelées le contrôle cognitif (CC) font référence à l'ensemble des processus de haut niveau guidant notre attention, nos pensées et nos actions conformément à nos buts (Friedman et al., 2006; Miyake & Friedman, 2012). Les fonctions exécutives regroupent différents processus tels que la flexibilité, l'inhibition, contrôle attentionnel et la mise à jour en mémoire de travail, (Miller & Cohen, 2001; Miyake et al., 2000; Smith & Jonides, 1999). Lors de la compréhension du langage plusieurs de ces processus sont mis à l'œuvre. Par exemple, dans la vie quotidienne la mise à jour des informations en mémoire de travail est indispensable : lorsqu'on traite une phrase il nous est indispensable d'actualiser les différentes informations traitées au fur et à mesure de de la phrase si l'on veut arriver à la traiter correctement. De plus, nous avons besoin d'inhiber les informations non pertinentes lorsque nous traitons le langage et ceci à différents niveaux. Par exemple, lorsque nous écoutons quelqu'un qui nous parle dans la rue nous devons inhiber non seulement le bruit des voitures (masquage physique, dit énergétique) mais également d'autres possibles conversations qui se tiennent dans notre environnement (masquage sémantique, dit informationnel). Un autre exemple est celui en lien avec l'ambiguïté du langage, en effet le langage peut présenter des ambiguïtés au niveau lexico-sémantique (e.g., les homophones, Chen & Boland, 2008) ainsi que des ambiguïtés syntaxique (Chambers et al., 2004). Lorsque nous devons comprendre en temps réel la parole et que la structure syntaxique est momentanément ambiguë (e.g., « Un journaliste questionna l'avocat de la chanteuse qui était en retard et furieuse. ») nous devons inhiber le traitement de l'information initialement comprise et réaliser une révision de la phrase pour être en mesure de comprendre celle-ci. Ce processus dit de révision est proposé par certains auteurs comme impliquant également des processus de CC. Cependant, les résultats dans la littérature ne sont pas unanimes sur l'implication du CC lors de la compréhension du langage et plus spécifiquement

lors de la résolution des ambiguïtés (Fedorenko, 2014; Ye & Zhou, 2009b, pour des revues).

Plusieurs auteurs proposent des évidences en lien avec la neuroimagerie ou la neuropsychologie allant en faveur d'un lien entre le CC et le langage. Il est tout d'abord proposé que le gyrus frontal inférieur gauche, appelé également par certains auteurs cortex préfrontal ventrolatéral gauche (CPVLG) (Nozari & Thompson-Schill, 2016) soit une région clef dans les processus de CC et plus particulièrement dans les processus permettant la résolution de conflit de représentations, indépendamment de leur modalité (Milham et al., 2003; J. K. Nelson et al., 2003; Novick et al., 2010; Thompson-Schill et al., 1997). Ainsi, un déficit de CC suite à une lésion de cette structure devrait induire une difficulté de langage, et c'est ce qui a été montré, entre autres, par Vuong et Martin (2011). Dans leur étude, les auteurs ont évalué les habiletés de dénomination chez deux patients avec un déficit de contrôle attentionnel suite à une lésion du CPVLG. De manière intéressante, ils ont montré que ces patients avaient des difficultés pour dénommer un mot lorsqu'une phrase lue précédemment induisait une ambiguïté entre les différentes interprétations du sens du mot à dénommer. Des résultats similaires ont été proposés par Novick, Kan, Trueswell et Thompson-Schill (2009) chez un patient ayant également un déficit de CC suite à une lésion du CPVLG. Lorsque ce dernier écoutait des instructions temporairement ambiguës telles que « *Mettez la grenouille sur la serviette dans la boîte* », il présentait des difficultés à réviser sa première interprétation. En effet, l'interprétation des phrases étant réalisée au fur et à mesure de l'écoute (Altmann & Kamide, 1999), de telles instructions donnent lieu à une première interprétation de l'action à réaliser lorsqu'on entend « *Mettez la grenouille sur la serviette* » qui entre en conflit avec l'interprétation apparaissant lorsqu'on entend la dernière partie de l'instruction « *dans la boîte* ». Ainsi, lorsque le patient devait réaliser l'action demandée, il avait tendance à regarder davantage le but incorrect de l'instruction (e.g., la serviette) et à réaliser davantage d'actions erronées (e.g., mettre la grenouille sur la serviette au lieu de la mettre dans la boîte). Le patient échouait lorsqu'il devait réviser une ambiguïté syntaxique et donc lorsqu'il faisait face à un conflit entre différentes interprétations. De plus, il est important de noter que l'ensemble des patients de ces études ne présentaient pas de difficultés lorsque les instructions étaient non-ambiguës car cela soutient l'idée selon laquelle c'est lorsque le traitement langagier est complexe et non automatique que les processus de CC

seraient impliqués. Ces études montrent qu'un déficit de CC induit par une lésion au niveau du CPVLG peuvent provoquer une difficulté dans la compréhension des phrases qui nécessitent une révision ou actualisation.

Ce type de résultat a été également observé chez les enfants de cinq ans (Trueswell et al., 1999; Weighall, 2008; Woodard et al., 2016). En effet, face à des instructions temporairement ambiguës (similaires à celles précédemment décrites), les enfants de cinq ans ont tendance à ne pas revoir l'interprétation initiale de ces instructions, menant à davantage d'actions erronées. Cette difficulté à résoudre un conflit entre une interprétation initiale et une nouvelle interprétation pourrait être liée au développement plus lent des capacités de CC chez l'enfant (Novick et al., 2005), notamment dû à la maturation tardive du cortex frontal (Fuster, 2002). Les faibles capacités de CC des enfants de cet âge pourraient alors expliquer leurs performances de compréhension du langage dans des conditions complexes. Des effets similaires semblent également présents avec le déclin cognitif chez les personnes âgées (Salthouse, 2009). En effet, il semblerait que le déclin cognitif altère certains processus de CC comme la mémoire de travail (Hasher & Zacks, 1988), l'attention (McDowd & Filion, 1992), ou l'inhibition (Fisk & Sharp, 2004; Van der Lubbe & Verleger, 2002). Or, il a été montré que les performances de mémoire de travail et d'inhibition prédisaient les performances de langage (Kwong See & Ryan, 1995). Ceci suggère qu'une diminution des capacités de CC pourrait induire une réduction des capacités de traitement du langage. Baciú et al. (2016) ont notamment observé chez les personnes âgées une corrélation positive entre les performances de CC celles de fluence verbale, suggérant que plus les personnes âgées avaient des difficultés de CC moins leurs performances de fluence verbale étaient élevées. Les tâches de fluence verbale requièrent de retenir les mots produits et de changer de sous-catégorie afin de produire un maximum de mots, impliquant ainsi des processus de CC tels que la mise à jour en mémoire de travail, l'inhibition et la flexibilité (Rosen & Engle, 1997; Troyer et al., 1998).

Les évidences présentées jusqu'ici montrent que dans des populations où les performances de CC sont faibles (pathologie, développement ou déclin cognitif avec le vieillissement normal) le traitement du langage semble affecté, suggérant ainsi une implication du CC dans le langage. Les études dans des populations adultes non pathologiques sont moins nombreuses et elles portent soit sur des variables invoquées

telles que la population bilingue (Bialystok, 2007; Blumenfeld & Marian, 2011; Costa & Santesteban, 2004; Luo et al., 2010; Marian & Spivey, 2003), soit sur des arguments anatomo-fonctionnels issus d'études en neuroimagerie. En effet, un certain nombre d'études en neuroimagerie ont montré un recouvrement des activités cérébrales lors de la réalisation des tâches de langage et de tâches faisant appel au CC (Musz & Thompson-Schill, 2017; van de Meerendonk et al., 2013; Ye & Zhou, 2008). Par exemple, Ye et Zhou (2009a) ont observé un chevauchement des activations au niveau des régions cérébrales impliquées lors d'une tâche de CC (Stroop et Flanker) et lors d'une tâche de compréhension de langage qui demandait la résolution d'un conflit. Plus spécifiquement les auteurs ont proposé à des participants de juger la compatibilité de deux phrases présentées successivement. Les auteurs ont manipulé la difficulté de la seconde phrase (phrases actives ou passives) et la cohérence sémantique entre les deux phrases de manière à créer un conflit ou non entre les deux phrases. Ainsi, les auteurs ont montré un recouvrement des activations lors d'un conflit entre les deux phrases et lors d'un conflit dans les tâches de CC suggérant un recrutement des processus de CC lors de la résolution de conflit au cours de la compréhension. De manière similaire, January, Trueswell et Thompson-Schill (2009) ont observé un recouvrement des régions cérébrales activées lors de conflits langagiers (i.e., conflit syntaxique par des phrases ambiguës) et non langagiers (i.e., par une tâche de Stroop). Ces études suggèrent que lorsque la compréhension du langage implique une résolution de conflit, les mêmes mécanismes impliqués lors de la résolution de conflit non langagier seraient à l'œuvre. Ainsi, il y aurait un seul mécanisme de résolution de conflit indépendamment du type de matériel. De plus, les auteurs proposent que ce mécanisme soit soutenu au niveau cérébral par un réseau appelé le « Domain-General Network » (DGN). Cette vision s'inscrit dans la théorie du « Conflict Monitoring » (Botvinick et al., 2001) selon laquelle la détection d'un conflit, quel qu'il soit, met en jeu des processus de CC.

D'autre part, certaines études suggèrent que les processus de CC engagés lors de la compréhension du langage seraient spécifiques au traitement du langage et supporteraient des fonctions distinctes de celles engagées lors de la résolution de conflits non-linguistiques (Ben-Shachar et al., 2003; Blank et al., 2014; Fedorenko, 2014; Fedorenko et al., 2011). Dans cette perspective, Vuong et Martin (2014) ont réalisé une tâche de compréhension des phrases avec une ambiguïté syntaxique

temporelle (appelée *garden-path* en anglais) et deux tâches de CC (une tâche de Stroop verbale et une de Stroop non-verbale). Leurs résultats montrent que les performances de révision de phrases ambiguës corrèlent avec les performances de la tâche de Stroop verbale mais pas avec la tâche de Stroop non-verbale. Ces résultats semblent aller dans le sens d'une implication des mécanismes de résolution de conflit qui serait dépendante de la modalité (i.e., des mécanismes de résolution domaine-spécifique).

Ces deux positions opposées semblent aujourd'hui converger vers une vision intermédiaire des mécanismes et réseaux mis en jeu lors de la compréhension du langage. En effet, selon cette vision, le DGN serait recruté et se coordonnerait avec le réseau du langage afin de pallier aux conflits présents dans le langage (Fedorenko & Thompson-Schill, 2014; Hsu et al., 2017). Ainsi, les mécanismes impliqués dans le CC se coordonneraient et se synchroniseraient avec les mécanismes impliqués dans le traitement spécifique au langage lorsque le traitement du langage serait complexe afin de surmonter les difficultés pouvant apparaître.

Ces nouvelles perspectives concernant l'implication du CC lors de la compréhension du langage se fondent principalement sur les études de neuroimagerie mettant en évidence un recouvrement ou non des régions cérébrales recrutées lors de tâches linguistiques et non-linguistiques. Cependant, ces études ne constituent pas de preuves directes de cette implication et aucune relation causale ne peut en être inférée. En effet, ces études nous indiquent qu'il existe potentiellement une relation entre les processus impliqués lors de tâches linguistiques et non-linguistiques mais ne nous permettent pas de savoir si les mécanismes engagés lors d'une tâche linguistique sont les mêmes que ceux engagés lors d'une tâche non-linguistique. Aussi, elles ne permettent pas de comprendre si les mécanismes engagés lors des deux types de tâches servent les mêmes fonctions cognitives. D'autre part, l'évaluation de l'implication du CC lors de la compréhension du langage au niveau comportemental chez l'adulte sain est difficile à mettre en œuvre, dû à l'automatisme et l'expertise du traitement du langage. Bien qu'elles soient possibles dans les situations où la compréhension du langage est difficile (Perrone-Bertolotti et al., 2017) ou ambiguë (Vuong & Martin, 2014), ces études relèvent généralement d'analyses corrélationnelles ne permettant pas de mettre en évidence une relation de causalité entre CC et compréhension du langage.

Ainsi, ces éléments témoignent de la nécessité d'établir un paradigme expérimental permettant d'évaluer la potentielle relation causale entre CC et compréhension du langage, ce au niveau comportemental. C'est ce que Hsu et Novick (2016) ont réalisé dans leur étude. En effet, dans leur expérience, des participants réalisaient une tâche entrelaçant des essais Stroop verbaux (congruents ou incongruents) et des essais d'une tâche de compréhension d'instructions auditives (ambiguës ou non-ambiguës). Les auteurs manipulaient le CC à l'aide des essais Stroop et mesuraient son impact sur la résolution de l'ambiguïté syntaxique des instructions lors des essais de compréhension du langage en analysant les mouvements oculaires des participants. Ainsi, ils ont montré qu'une forte charge de CC (i.e., essais Stroop incongruents) avant une instruction ambiguë permettait une meilleure révision de l'ambiguïté que lorsqu'une faible charge de CC (i.e., essais Stroop congruents) précédait une instruction ambiguë. Cette étude a donc permis de mettre en évidence un lien causal entre le CC et la compréhension du langage.

La présente étude vise à répliquer cet effet de l'engagement du CC lors de la compréhension du langage observé par Hsu et Novick (2016). Nous voulons évaluer dans quelle mesure l'augmentation de la charge de CC facilite le traitement du langage. Plus précisément, nous voulons évaluer si la détection d'un conflit de Stroop permet une meilleure résolution d'une ambiguïté syntaxique temporaire. Nous nous attendons donc à ce qu'une forte charge de CC (i.e., essais Stroop incongruents) avant une instruction ambiguë facilite la résolution de l'ambiguïté comparativement à lorsqu'une faible charge de CC (i.e., essais Stroop congruents) précède une instruction ambiguë. Nous nous attendons également à ce que les instructions ambiguës induisent plus de difficulté que les instructions non-ambiguës. Aussi, les essais Stroop incongruents précédant une instruction devraient mener à de meilleures performances lors des essais de compréhension que les essais Stroop congruents.

Lors de cette étude, les participants réaliseront également quatre tâches permettant une caractérisation fine des différents processus de CC : une tâche Flanker, une tâche N-back, une tâche Number-letter et une tâche SART (Sustained Attention to Response Task). Ces tâches sont destinées à évaluer les performances des participants dans différents processus de CC, à savoir : le contrôle d'inhibition, la mise à jour en mémoire de travail, la résistance à l'interférence, le coût de changement de tâche, et l'attention soutenue (ou maintien actif d'un but). Ainsi, nous explorerons

les relations entre les processus évalués lors de ces tâches de CC et les processus engagés lors de la tâche entremêlant des essais de CC et de compréhension du langage.

3.2 Méthode

Cette étude s'est déroulée en deux sessions. La première session regroupait les quatre tâches évaluant les différents processus de CC et se déroulait une semaine avant la seconde session. La seconde session correspondait à la réplication (en français) de l'étude de Hsu et Novick (2016) au cours de laquelle les participants réalisaient la tâche entremêlant compréhension du langage et CC (tâche Langage/CC).

3.2.1 Participants

Avant de débiter notre étude, nous avons réalisé un calcul de puissance pour une analyse en modèle mixte à l'aide de la plateforme PANGEA (Power ANalysis for GEneral Anova designs, v0.2, <https://jakewestfall.shinyapps.io/pangea/>) avec $\alpha = .05$ et d de Cohen = 0.4 (calculé à partir de l'étude de Hsu & Novick, 2016). Ce calcul de puissance nous a permis de fixer une taille d'échantillon nécessaire à 20 participants. Afin d'anticiper la potentielle perte expérimentale, nous avons recruté 30 participants.

Trente étudiants de l'Université Grenoble Alpes ont participé à cette étude (âge moyen = 19.9, ET = 1.3) et recevaient des points d'expérience pour leur participation. Tous étaient droitiers, de langue maternelle française et avaient une vue normale ou corrigée. Un contrôle de leur latéralité manuelle était réalisé à l'aide du questionnaire abrégé d'Edinburgh (Oldfield, 1971). Les participants donnaient leur consentement par écrit lors des deux sessions d'expérience. Nous avons retiré un participant de l'étude dû à une calibration impossible de l'Eye-tracker. De plus, nous avons retiré tous les essais comportant plus de 33% de données manquantes (représentant 15.8% de l'ensemble des essais). Cette étude a été approuvée par le comité d'éthique local (CERNI, numéro IRB : 00010290-2018-02-06-35).

3.2.2 Stimuli et Matériel

L'ensemble des stimuli des tâches des deux sessions étaient présentés à l'aide du logiciel E-prime (v2.0.10.353). Concernant la session 2, les stimuli verbaux de l'étude de Hsu et Novick (2016) ont été traduits de l'anglais au français. Certains mots

des instructions originales étaient très peu fréquents en français et ont donc été remplacés par d'autres mots équivalents en termes de fréquence lexicale. L'ensemble des phrases ont été enregistrées par une femme dans la chambre anéchoïque du GIPSA-lab (Saint Martin d'Hères, France). Au total, 248 phrases, dont 48 ambiguës (durée moyenne = 2214ms, ET = 209), 48 non-ambiguës (durée moyenne = 2489ms, ET = 184) et 152 phrases de remplissage ou fillers (durée moyenne = 1853ms, ET = 408) ont été enregistrées.

En ce qui concerne les images constituant les scènes visuelles, nous en avons conservé certaines de l'étude originale et en avons recréé d'autres pour des raisons liées à la résolution à l'écran. Au total, nous avons utilisé 71 images d'objets pour l'ensemble des contextes visuels. La mesure des mouvements oculaires a été réalisée à l'aide d'un oculomètre Eyelink™ 1000 Hz de SR Research (<http://www.sr-research.com/>) avec une résolution spatiale : $\leq 1.5^\circ$ et un échantillonnage temporel à 500Hz. Les participants écoutaient les instructions auditives à l'aide d'un casque audio.

3.2.2.1 Session 1 : Contrôle Cognitif

La première session se déroulait dans une pièce silencieuse et durait environ 45 minutes. Lors de cette session, les participants réalisaient les quatre tâches évaluant différents processus de CC. Tous les participants effectuaient l'ensemble des tâches dans le même ordre. Il était demandé aux participants d'accorder autant d'importance à la rapidité qu'à l'exactitude des réponses.

Tâche Flanker

Cette tâche, initialement proposée par Eriksen et Eriksen (1974), permet de mesurer les performances de contrôle d'inhibition et de résistance à l'interférence, ce en évaluant la capacité à inhiber une réponse prédominante. Lors de cette tâche, les participants devaient décider si une flèche présentée au centre de l'écran (flèche cible) pointait vers la droite ou vers la gauche en appuyant une touche du clavier parmi deux touches de réponse (touche « P » : droite, touche « E » : gauche). Deux flèches distractrices étaient présentées de chaque côté de la cible en même temps que cette dernière. Ces distracteurs pouvaient être soit congruents (pointant dans la même direction) soit incongruents (pointant dans la direction opposée) avec la direction de la flèche cible. Pour chaque essai un rectangle de fixation était présenté pendant 300ms

suivi de l'ensemble des flèches pendant 500ms (Figure 4.3.1). Le rectangle de fixation servait également de masque visuel. L'intervalle inter-stimuli était de 1000ms. L'ensemble des flèches était présenté sur quatre centimètres soit environ 3,6 degrés d'angle visuel. La tâche comprenait un total de 240 essais dont 120 congruents et 120 incongruents. La flèche cible pointait à gauche pour la moitié des essais et à droite pour l'autre moitié. L'ordre de présentation des essais était pseudo-aléatoire de façon à ce qu'il n'y ait pas plus de deux essais identiques consécutifs (e.g., la flèche cible pointant à gauche avec des distracteurs incongruents) et pas plus de quatre essais du même type consécutifs (e.g., distracteurs congruents). Une pause de minimum 20 secondes était imposée tous les 80 essais. Les participants réalisaient 16 essais d'entraînement afin de se familiariser avec la tâche.

Tâche N-back

Cette tâche est une adaptation de celle de Kane, Conway, Miura et Colflesh (2007). Elle mesure les performances de mise à jour en mémoire de travail ainsi que la résistance à l'interférence. Lors de cette tâche, des lettres étaient présentées une à une à l'écran et les participants devaient indiquer à chaque fois si oui ou non la lettre présentée à l'écran était la même que la lettre présentée n essais auparavant. Ici n était fixé à deux (figure 4.3.1). Ainsi, si les participants voyaient les lettres *F-N-L-N*, ils devaient répondre respectivement : *non-non-non-oui*. Les différentes lettres présentées étaient les suivantes : *B, F, H, L, N, Q, R, X et Z*. Les participants appuyaient sur la barre espace pour répondre oui et sur la touche contrôle gauche pour répondre non. Cette tâche comportait quatre blocs de 50 essais avec 10 cibles et 10 leurres. Parmi les leurres, cinq sur les dix étaient des répétitions n-1-back, c'est-à-dire que la même lettre était présentée deux fois d'affilé, et les cinq autres étaient des répétitions n-3-back, c'est-à-dire que la lettre présentée avait été présentée à l'avant-avant-dernière position. Ainsi, les participants voyaient au total 20% de lettres cibles, 20% de lettres leurres et 60% de lettres neutres. Les lettres étaient présentées pendant 500ms avec un intervalle entre chaque lettre de 2000ms. Les participants réalisaient 11 essais d'entraînement afin de se familiariser avec la tâche.

Tâche Number-Letter

Cette tâche est une adaptation de la tâche proposée par Miyake et al. (2000) permettant d'évaluer le coût cognitif induit par le changement de tâche, plus particulièrement le changement entre le traitement de lettres et le traitement de

chiffres. Lors de cette tâche, une paire chiffre/lettre (e.g., 7U) était présentée soit dans la partie supérieure soit dans la partie inférieure de l'écran. Lorsque cette paire était présentée dans la moitié supérieure de l'écran, les participants devaient indiquer si la lettre était une voyelle ou une consonne à l'aide de deux touches du clavier (« P » pour voyelle et « E » pour consonne). Lorsque la paire était présentée dans la moitié inférieure de l'écran, les participants devaient si le chiffre était pair ou impair à l'aide des mêmes touches du clavier (« P » pour pair et « E » pour impair). La tâche se déroulait en trois blocs : le premier bloc (bloc Lettre) ne comportait que des essais lettre (ensemble des paires présentées dans la moitié supérieure de l'écran), le deuxième bloc (bloc Chiffre) ne comportait que des essais chiffre (ensemble des paires présentées dans la moitié inférieure de l'écran), et le troisième bloc (bloc Mixte) comportant des essais lettre et des essais chiffre présentés en ordre aléatoire (Figure 4.3.1). Les blocs Lettre et Chiffre comptaient chacun 40 essais tandis que le bloc Mixte en comptait 80. Les participants réalisaient 6 essais d'entraînement au début de chaque bloc. Les paires chiffre/lettre étaient présentées jusqu'à la réponse du participant avec un intervalle inter stimuli de 150ms.

Tâche SART

Cette tâche est une adaptation de la version de Robertson, Manly, Andrade, Baddeley, et Yiend (1997) permettant d'évaluer l'attention soutenue (maintien actif d'un but) ainsi que le contrôle d'inhibition. Lors de cette tâche, des chiffres (de 1 à 9) étaient présentés un à un au centre de l'écran. Les participants avaient pour consigne d'appuyer sur la barre espace à chaque fois qu'un chiffre apparaissait sauf lorsqu'il s'agissait d'un 3 (Figure 4.3.1). Chaque chiffre était présenté 50 fois, donnant lieu à un total de 450 essais. L'ordre d'apparition des chiffres était pseudo-aléatoire. Chaque chiffre restait 250ms à l'écran et était suivi d'un masque visuel pendant 900ms. Les participants réalisaient 18 essais d'entraînement afin de se familiariser avec la tâche.

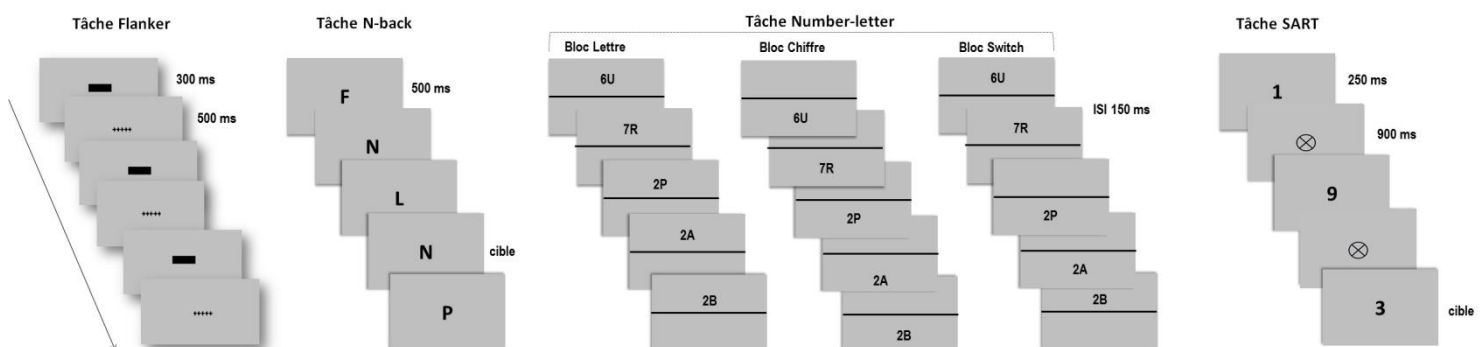


Figure 4.3.1 : Tâches utilisées pour l'évaluation du Contrôle Cognitif (session 1)

3.2.2.2 Session 2 : Réplication de l'étude de Hsu et Novick (2016)

Cette session est une réplique en français de l'expérience de Hsu and Novick (2016). Elle a pour but d'évaluer l'implication du CC lors de la compréhension du langage, plus particulièrement lors de la réévaluation de l'interprétation d'instructions ambiguës ou non ambiguës. L'expérience se déroulait dans une pièce silencieuse et durait environ 45 minutes.

Tâche de Stroop

Les participants réalisaient dans un premier temps une tâche d'entraînement de Stroop (1935) afin de s'entraîner à répondre avec une souris à trois boutons. Un nom de couleur (*bleu, jaune, vert, rouge, orange* ou *marron*) était présenté à l'écran écrit dans une couleur parmi trois possibles (bleu, jaune ou vert). Les participants devaient indiquer la couleur dans laquelle le nom de couleur était écrit (i.e., bleu, jaune ou vert) en cliquant sur le bouton de la souris correspondant (chaque bouton correspondant à une couleur d'écriture). Au total, cette tâche comprenait 144 essais. Le nom de couleur correspondait à la couleur d'écriture pour 72 essais (essais congruents, e.g., « bleu » écrit en bleu) et ne correspondait pas pour les 72 autres essais (essais incongruents, e.g., « rouge » écrit en bleu). Tout comme Hsu et Novick (2016), pour les essais incongruents, les noms de couleurs ne correspondaient à aucune couleur de réponse possible afin de créer un conflit de représentation et non un conflit de réponse (Milham et al., 2001). Le nombre d'apparitions de chaque nom de couleur et de chaque couleur d'écriture était contrebalancé de façon à ce que chaque nom de couleur et chaque couleur d'écriture apparaisse en proportion égale. Une croix de fixation (500ms) précédait la présentation du stimulus. Une fois le stimulus apparu, les participants avaient 1000ms pour répondre.

Tâche Langage/CC

Cette tâche est une réplique de la tâche réalisée par Hsu et Novick (2016) et s'inscrit dans un paradigme d'adaptation croisée entre deux tâches. En d'autres termes, cette tâche entremêle des essais Stroop (identiques à ceux de la tâche d'entraînement précédemment décrite) avec des essais d'une tâche de compréhension du langage comprenant des instructions induisant ou non une ambiguïté syntaxique temporaire (description ci-dessous). Lors de cette tâche, nous avons enregistré les mouvements et la position des yeux sur l'écran afin d'évaluer en temps réel la révision syntaxique.

Procédure

Lors des essais de compréhension du langage, une scène visuelle comportant cinq images d'objets était présentée aux participants. Cent millisecondes après l'apparition de cette scène, les participants écoutaient une instruction présentée auditivement leur demandant de réaliser une action tout en regardant la scène visuelle. Les instructions étaient soit non-ambiguës (e.g., « Mettez le crayon qui est sur la serviette sur le classeur »), soit temporairement ambiguës (e.g., « Mettez le crayon sur la serviette sur le classeur »). La scène visuelle comportait un référent cible (e.g., le crayon qui est sur la serviette), un référent non-cible (e.g., le couteau), un but correct (e.g., le classeur) et un but incorrect (e.g., la serviette seule). Les participants devaient déplacer le référent cible sur le but correct à l'aide de la souris d'ordinateur. Chaque essai de compréhension du langage était précédé d'un essai Stroop congruent ou incongruent (Figure 4.3.2).

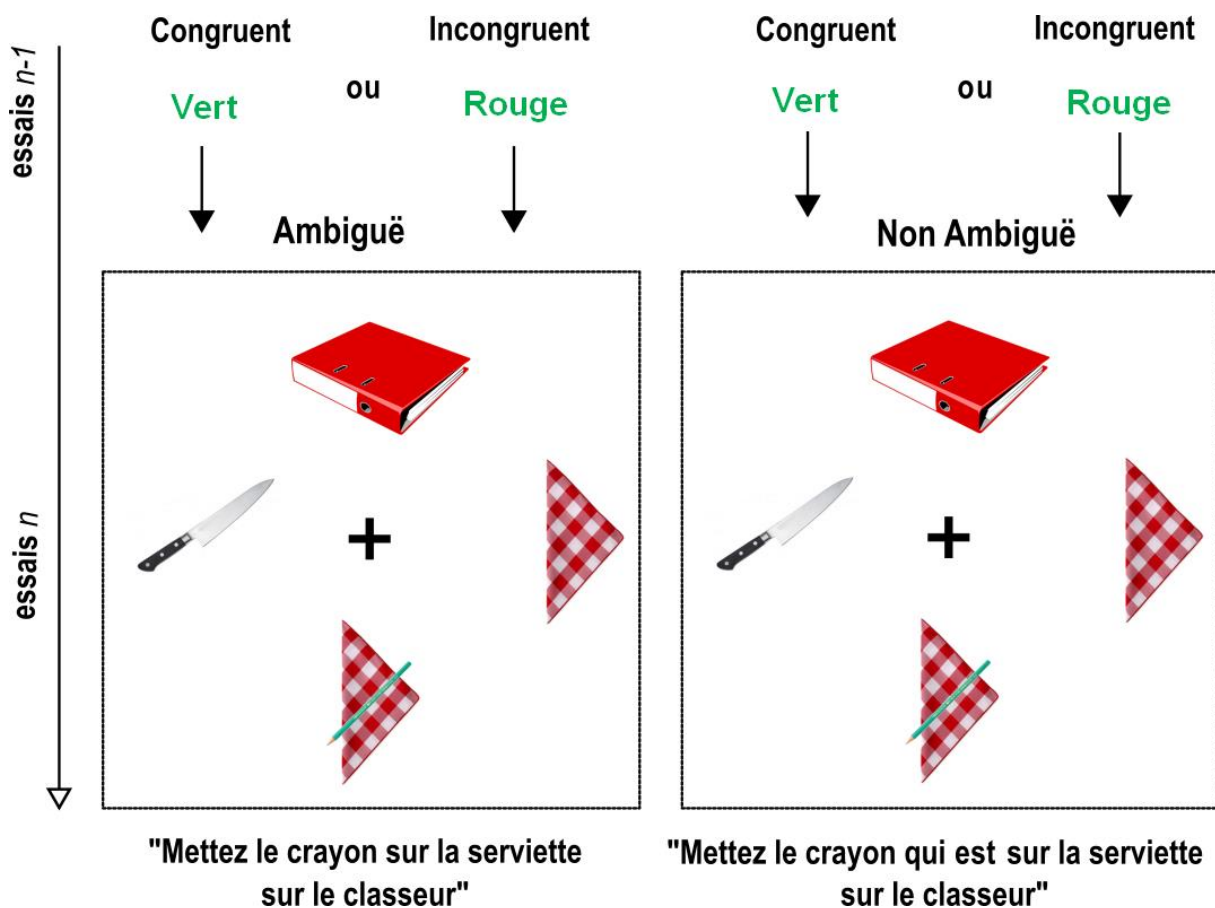


Figure 4.3.2 : Paradigme expérimental adapté de Hsu et Novick (2016) afin d'évaluer l'engagement du CC lors de la révision syntaxique en temps réel

Cette tâche Langage/CC était divisée en deux blocs comportant chacun 120 essais Stroop (60 congruents et 60 incongruents) et 124 essais de compréhension du langage (24 instructions ambiguës, 24 instructions non-ambiguës et 76 fillers). Les fillers avaient pour but de masquer notre manipulation expérimentale afin d'éviter que les participants prédisent l'action à réaliser. De plus, 72 essais Stroop ont été ajoutés afin également d'éviter toute prédiction de la part des participants. L'ordre des essais était pseudo-aléatorisé de manière à obtenir chaque croisement des conditions d'intérêt dans les mêmes proportions, soit 12 essais Stroop congruent/instruction ambiguë 12 essais Stroop congruent/instruction non-ambiguë 12 essais Stroop incongruent/instruction ambiguë et 12 essais Stroop incongruent/instruction non-ambiguë. La création de deux blocs a permis de contrebalancer les instructions ambiguës et non-ambiguës ainsi que la scène visuelle. En effet, chaque instruction ambiguë dans le premier bloc était non-ambiguë dans le second et inversement. De plus, la scène visuelle associée à une instruction ambiguë ou non ambiguë dans un bloc était composée des mêmes images pour l'instruction homologue de l'autre bloc. L'essai Stroop précédant une instruction du premier bloc était du même type pour l'instruction homologue du second bloc. L'ordre de présentation des blocs était contrebalancé entre les participants.

Pour faciliter la compréhension de notre étude, nous avons présenté les sessions dans l'ordre chronologique de passation. En revanche, nous présenterons dans un premier temps les analyses confirmatoires faisant références aux analyses des tâches de la seconde session, puis dans un second temps les analyses exploratoires. Nous exposerons ensuite les résultats de la même manière en commençant par les résultats confirmatoires suivis des résultats exploratoires.

3.3 Analyses

3.3.1 Analyses confirmatoires

Lors des essais Stroop, pour la tâche d'entraînement comme pour la tâche Langage/CC, nous avons enregistré les temps de réponse ainsi que la précision des réponses. Lors des essais de compréhension du langage de la tâche Langage/CC, nous avons enregistré la précision des actions réalisées à l'aide de la souris (i.e., si le sujet a pris le bon référent et l'a placée sur le bon but) ainsi que les mouvements oculaires. Nous avons par la suite calculé les proportions de temps de fixation sur le

but correct et le but incorrect en post-traitement à l'aide du logiciel Matlab (version 9.7.0, Matlab ® R2019b) à partir des durées de chacune des fixations enregistrées par l'EyeTracker pour chaque essai. L'ensemble des analyses statistiques étaient réalisées à l'aide du logiciel R.

Tout d'abord, nous avons réalisé un *t*-test apparié comparant la moyenne des essais incongruents avec la moyenne des essais congruents de la tâche d'entraînement de Stroop (72 essais dans chacune des conditions) afin de vérifier que la manipulation de la congruence induisait une interférence. Nous avons ensuite réalisé un *t*-test apparié comparant les essais Stroop congruents et incongruents de la tâche Langage/CC afin de vérifier qu'il y avait également une interférence de Stroop lors de cette tâche.

Par la suite, nous avons comparé, à l'aide d'un *t*-test apparié, l'interférence de Stroop entre le premier et le second bloc lors de la tâche Langage/CC afin d'évaluer s'il y avait une diminution de cette interférence au cours de la tâche. Ces analyses étaient nécessaires en ce qu'elles vérifiaient si la manipulation de la congruence des effets Stroop induisait une interférence et donc si nous manipulions bien la charge de CC lors de notre tâche.

En ce qui concerne la précision des actions réalisées lors des essais de compréhension du langage, nous avons calculé la proportion d'actions correctes (i.e., déplacement d'un référent sur le but correct). Nous avons ensuite testé l'effet de l'ambiguïté des phrases, de la congruence et leur interaction sur les proportions d'actions correctes à l'aide d'une régression logistique mixte. Notre modèle logistique mixte avait pour effets fixes l'ambiguïté, la congruence et leur interaction et pour effets aléatoires la pente aléatoire des stimuli et la pente aléatoire des participants. Pour ce qui est des temps de réaction, nous avons réalisé une régression mixte avec les mêmes effets fixes et les mêmes effets aléatoires que pour la régression logistique mixte.

Pour ce qui est des analyses des mouvements oculaires, nous nous sommes dans un premier temps intéressés à la probabilité de regard sur l'image correcte et incorrecte au cours des essais de compréhension du langage. Pour cela, nous avons effectué des ANOVAs à chaque sample testant l'effet de l'ambiguïté, de la congruence de l'essai Stroop précédant et leur interaction. Une correction *False discovery rate*

(FDR) était ensuite appliquée à l'aide de la procédure de Benjamini et Hochberg, (1995) afin de corriger pour les tests multiples. Les phrases non-ambiguës comportant les mots « qui est » en plus, nous avons recalé la période considérée comme ambiguë pour l'ensemble des essais de cette condition. Enfin, nous avons analysé la proportion de temps de fixation sur l'image correcte et sur l'image incorrecte à l'aide de deux modèles mixtes incluant les mêmes effets fixes et effets aléatoires que pour les analyses de temps de réaction.

3.3.2 Analyses exploratoires

Tout d'abord, nous nous sommes intéressés aux essais Stroop. En effet, dans la tâche entremêlée, les essais Stroop pouvaient soit suivre un essai de langage (i.e., essai Stroop Switch) soit suivre un autre essai Stroop (i.e., essai Stroop Non-Switch). Ce changement de tâche pourrait avoir un effet sur la charge de contrôle cognitif engagé. Ainsi, nous avons testé si le coût de switching entre les essais Stroop et les essais de compréhension du langage induisaient un coût cognitif en réalisant un t-test apparié mesurant la différence de moyenne de temps de réponse entre les essais Switch et les essais Non-Switch. De là, on peut penser qu'un essai Stroop Switch (induisant une charge cognitive supplémentaire) précédant un essai de compréhension du langage n'aura pas le même effet sur les temps de fixation qu'un essai Stroop Non-Switch. En d'autres termes, le coût cognitif induit par un essai Stroop Switch pourrait également avoir un impact sur les processus de traitement du langage. C'est pourquoi nous avons réalisé de nouvelles analyses en ajoutant la « nature » des essais Stroop (Switch/Non-Switch) à nos modèles. Ainsi, bien que nous ayons contrôlé pseudo-aléatoirement ce switch, nous avons mesuré (dans une perspective exploratoire) l'influence de la nature des essais Stroop sur la différence entre les proportions de temps de fixation sur le but correct et incorrect ainsi que son interaction avec le type d'essai Stroop et le type d'instruction.

3.3.2.1 Tâche Flanker

Dans un premier temps nous avons vérifié que les essais incongruents induisaient bien des temps de réaction plus long que les essais congruents. Pour cela, nous avons réalisé un t-test qui s'est révélé significatif, $t = -4.53$, $p < .05$. Les participants répondaient plus lentement pour les essais incongruents ($M = 539\text{ms}$, $ET = 68$) que pour les essais congruents ($M = 465\text{ms}$, $ET = 59$) Afin de mesurer la

résistance à l'interférence et le contrôle d'inhibition, nous avons calculé le temps de réaction moyen de chaque participant pour les essais congruents ainsi que pour les essais incongruents. Ceci nous a permis de calculer un indice de la résistance à l'interférence (i.e., temps de réaction essais incongruents - temps de réaction essais congruents) pour chaque participant.

3.3.2.2 Tâche N-back

Dans un premier temps, pour vérifier l'effet des leurres, nous avons réalisé des *t*-tests appariés entre les conditions non-leurre, leurre *n-1* et leurre *n-3*. Nous avons ainsi observé une différence significative uniquement entre les conditions non-leurre et leurre *n-3* en termes de proportion de bonnes réponses ($t = 1.83, p < .05$) suggérant que les participants faisaient moins d'erreurs lors des essais non-leurre ($M = 0.86, ET = 0.10$) que lors des essais leurre *n-3* ($M = 0.74, ET = 0.17$). Afin de mesurer la mise à jour en mémoire de travail lors de cette tâche, nous avons calculé la proportion de bonnes réponses de chaque participant. Ainsi, plus la proportion de bonnes réponses d'un participant est élevée, plus sa capacité de mise à jour en mémoire de travail serait importante. Ensuite, pour obtenir un indice de résistance à l'interférence, nous avons calculé la proportion de fausses alarmes sur les essais leurres pour chaque participant. En effet, lors de la tâche N-back, les leurres étant familiers avec la cible, car vus soit trois fois auparavant (leurres *n-3*), soit juste avant (leurres *n-1*), les participants devaient résister à cette interférence liée à la familiarité et inhiber une réponse qui correspondrait à une réponse de familiarité (réponse prédominante). Plus la proportion de fausses alarmes est élevée, moins le participant serait résistant à l'interférence due à la familiarité.

3.3.2.3 Tâche Number-Letter

Dans un premier temps, nous avons testé si le changement de tâche induisait bien un coût cognitif en réalisant un *t*-test apparié comparant la moyenne des essais Switch à la moyenne des essais Non-Switch. Ce *t*-test s'est révélé significatif ($t = -3.83, p < .05$) suggérant un effet du changement de tâche puisque les participants étaient plus rapides lors des essais non-switch ($M = 1166\text{ms}, ET = 331$) que lors des essais switch ($M = 1599\text{ms}, ET = 524$). Nous avons également testé cet effet de switching entre les blocs en réalisant un *t*-test en la moyenne de temps de réaction pour les deux blocs sans switch et la moyenne de temps de réaction pour le bloc mixte. Ce test s'est également révélé significatif ($t = 7.86, p < .05$), avec les participants

répondant plus rapidement lors des blocs lettres ou chiffre seul ($M = 756\text{ms}$, $ET = 124$) que lors du bloc mixte ($M = 1384\text{ms}$, $ET = 420$), confirmant l'effet de switching. Afin de mesurer la capacité de switching des participants, nous avons calculé, pour le bloc mixte uniquement, la différence de temps de réponse entre les 40 essais pour lesquels il y a un changement de tâche (essais Switch) et les 40 essais pour lesquels il n'y a pas de changement de tâche (essais Non-Switch), ce pour chaque participant. Plus cette différence est élevée, plus le coût dû au switching est fort. Cet indice de coût de switching se rapproche du paradigme Langage/CC de la deuxième session en ce qu'il est sensible à la réponse à l'essai précédent. Nous avons également effectué une telle mesure entre la moyenne des blocs sans switching et celle du bloc mixte.

3.3.2.4 Tâche SART

Dans un premier temps, nous avons vérifié si les participants étaient engagés dans la tâche en calculant la proportion de bonnes réponses totale. Les participants devant répondre en appuyant sur la barre espace dans 89% des cas (400 essais go sur 450 essais au total), nous avons considéré qu'ils étaient engagés dans la tâche si leur pourcentage de bonnes réponses total était supérieur à 89% (car un participant appuyant sur la touche de réponse systématiquement aurait un pourcentage total de bonnes réponses de 89%). La proportion moyenne de bonnes réponses des participants était de 0.94. Ensuite, nous avons calculé la proportion de fausses alarmes, c'est-à-dire la proportion de réponses manuelles lorsque le chiffre 3 apparaissait (alors qu'il ne fallait pas répondre, items cible no-go). Cette proportion de fausses alarmes constitue un indice de l'attention soutenue et du contrôle d'inhibition. En effet, plus cet indice est élevé, moins le participant serait capable de maintenir son attention de façon soutenue, et moins importante serait sa capacité à inhiber une réponse automatique.

3.3.2.5 Corrélations

Avant de tester les corrélations entre les performances de CC et de compréhension du langage, nous avons calculé différents indices pour la tâche de langage. Pour les temps de réaction, les proportions de bonnes réponses et les proportions de fixation sur l'image correcte et incorrecte nous avons calculé : un indice reflétant le coût de l'ambiguïté (i.e., condition ambiguë – non-ambiguë) et le coût de l'incongruence de l'essai Stroop précédent (i.e., condition incongruente – congruente). Nous avons par la suite calculé huit facteurs généraux différents à partir des indices calculés pour les

différentes tâches de CC. Ces huit facteurs généraux correspondaient à la moyenne de quatre indices (un de chaque tâche de CC) avec les indices suivants : la différence de proportion de bonnes réponses ou de temps de réaction entre les essais incongruents et congruents pour la tâche Flanker ; la proportion moyenne de bonnes réponses ou de fausses alarmes pour la tâche NBack, la différence entre les essais switch et non-switch du bloc mixte ou la différence des bloc sans switching et du bloc mixte en terme de proportion de bonnes réponses ou de temps de réaction pour la tâche Number-Letter ; et la proportion de fausses alarmes pour la tâche SART. Nous avons ensuite calculé les corrélations entre ces différents facteurs généraux et les indices de la tâche de compréhension du langage. Enfin nous avons testé les corrélations entre les indices de la tâche de langage et chaque indice de CC. Nous avons appliqué une correction FDR sur ces différentes corrélations pour compenser pour les comparaisons multiples.

3.4 Résultats

3.4.1 Résultats confirmatoires

3.4.1.1 Vérification de l'effet Stroop

Tout d'abord, l'analyse visant à vérifier que la manipulation de la congruence des essais lors de la tâche de Stroop d'entraînement induisait une interférence s'est révélée significative, $t = -4.67$, $p < .05$. Ainsi, les participants répondaient plus rapidement pour les essais congruents ($M = 556\text{ms}$, $ET = 56.83$) que pour les essais incongruents ($M = 576\text{ms}$, $ET = 59.57$). Nous avons également observé un effet significatif de la congruence pour les essais de Stroop lors de la tâche Langage/CC, $t = -5.59$, $p < .05$. Les participants répondaient plus rapidement pour les essais congruents ($M = 575\text{ms}$, $ET = 50.57$) que pour les essais incongruents ($M = 600$, $ET = 49.34$). La manipulation de la congruence des essais Stroop induisait un conflit de représentation entre le nom de la couleur écrite et la couleur dans laquelle était écrit le nom de couleur lors de la tâche de Stroop d'entraînement tout comme lors de la tâche Langage/CC.

Ensuite, l'analyse permettant d'évaluer une potentielle variation de l'interférence de Stroop entre les deux blocs d'essais de la tâche Langage/CC s'est révélée non significative, $t = 0.23$, $p = .817$. La différence de temps de réponse entre

les essais congruents et incongruents ne semblait pas plus importante entre le premier et le second bloc (différence moyenne = 1.71ms, ET = 39.38).

3.4.1.2 Proportion d'actions correctes

En ce qui concerne l'analyse des proportions d'actions correctes, nous avons observé une absence d'effet principal du type de Stroop ($z = 0.13$, $p = 0.89$). Les participants ne semblaient pas réaliser significativement plus d'actions correctes lorsque l'essai Stroop n-1 était congruent que lorsque celui-ci était incongruent. Nous avons également observé une absence d'effet principal de l'ambiguïté, $z = -0.09$, $p = 0.93$, ce qui indique une absence de modification de l'exactitude de réponse en fonction de l'ambiguïté. De plus, une absence d'interaction entre le type d'essai Stroop et le type d'instruction est également observée ($z = 0.88$, $p = 0.38$). Cette absence d'interaction semble indiquer que l'effet du type d'essai Stroop ne variait pas significativement en fonction du type d'instruction en termes de bonnes réponses.

3.4.1.3 Temps de réaction

En ce qui concerne les temps de réactions, nous avons observé un effet marginalement significatif du type d'essai Stroop ($t = 1.753$, $p = 0.083$). Il semblerait que les participants soient plus lents pour répondre à la tâche de compréhension lorsque l'essai Stroop précédent était incongruent ($M = 1000\text{ms}$, $ET = 418$) que lorsque l'essai Stroop précédent était congruent ($M = 975\text{ms}$, $ET = 336$). Les effets d'ambiguïté et d'interaction se sont révélés non-significatifs ($t = 0.43$, $p = 0.67$ et $t = -1.46$, $p = 0.15$, respectivement) (Figure 4.3.3).

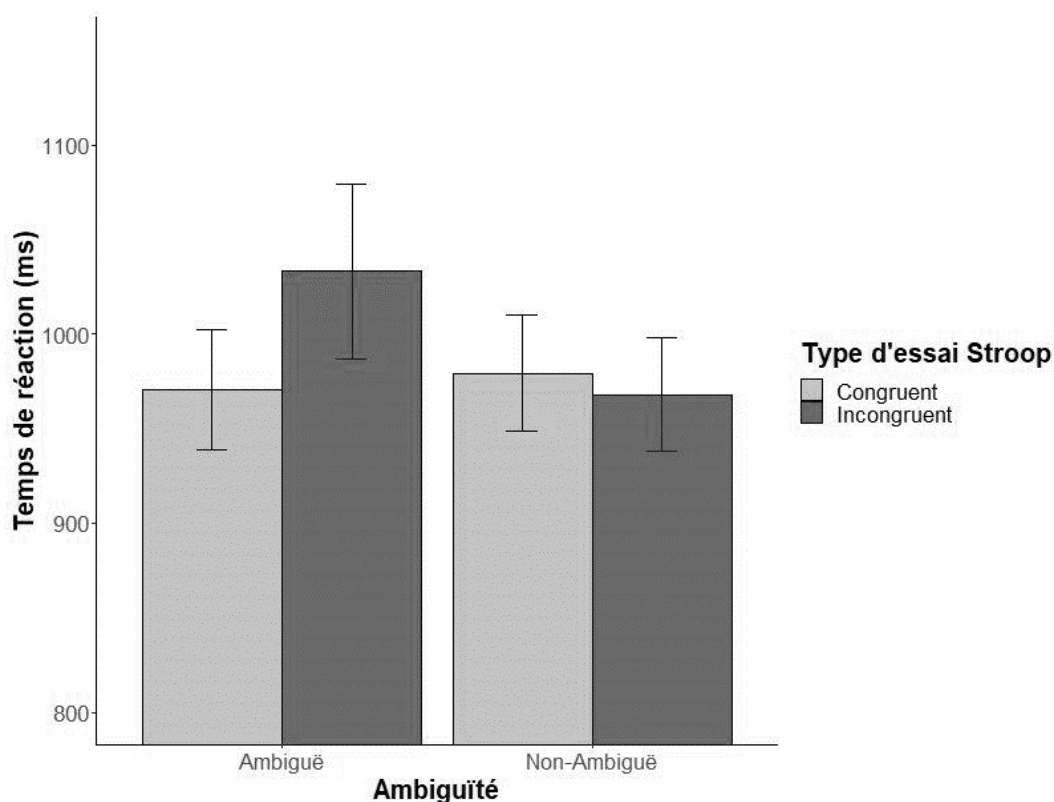


Figure 4.3.3 : Temps de réaction sur les essais de compréhension de langage en fonction de l'ambiguïté et du type d'essai Stroop *n-1*

3.4.1.4 Probabilité de regards

En ce qui concerne les analyses de probabilité de regard sur les images correctes et incorrectes au cours des essais, les ANOVAs se sont révélées non significatives sur les périodes d'intérêt (période ambiguë allant de 800ms à 1250ms et d'après ambiguïté, i.e., après 1250ms) (voir Figure 4.3.4). Les mesures online de mouvements oculaires ne permettent donc pas de mettre en évidence un effet de nos conditions expérimentales.

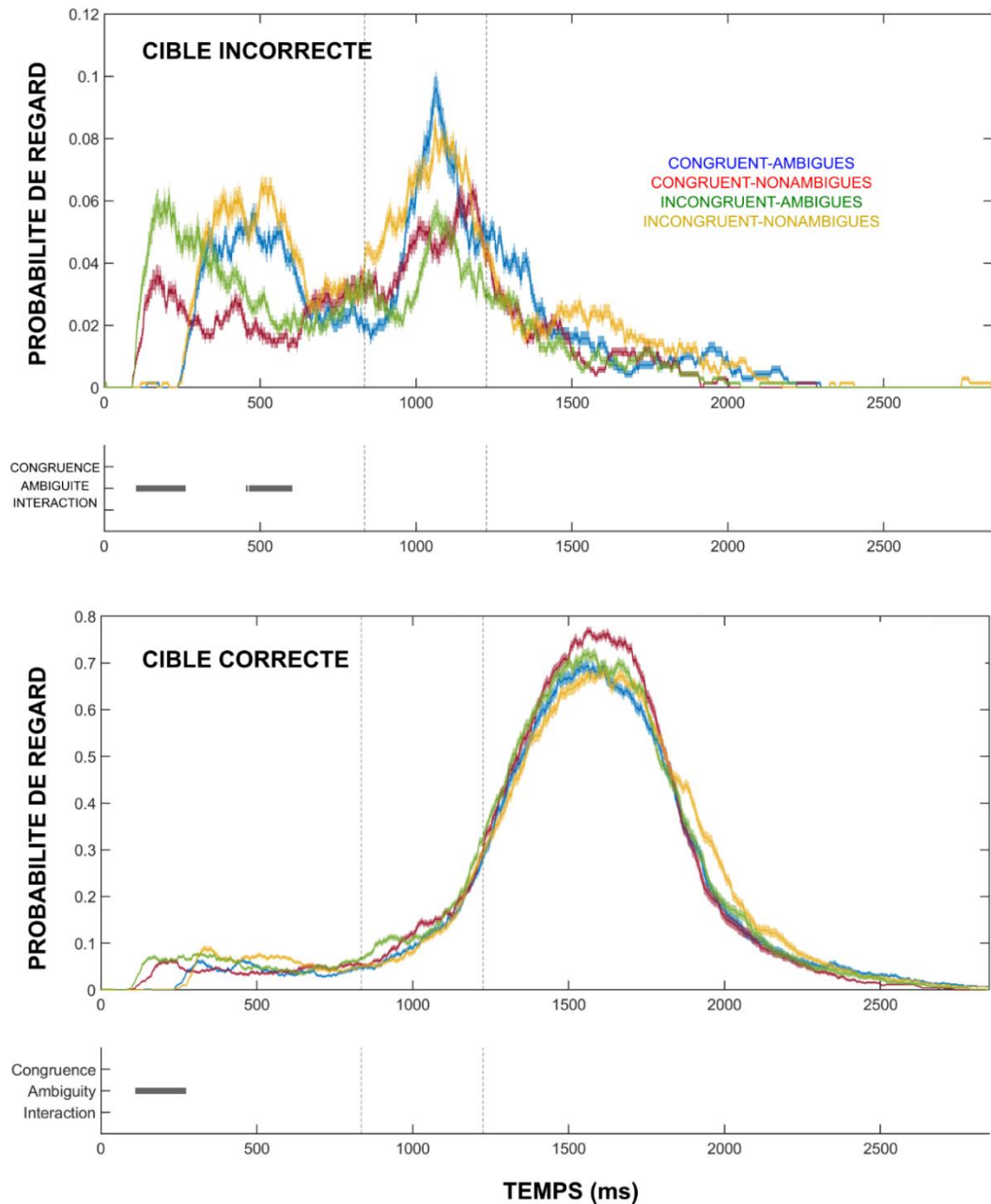


Figure 4.3.4 : Probabilité de regard sur l'image incorrecte et correcte au cours du temps en fonction de l'ambiguïté de la phrase et du type d'essai Stroop réalisé précédemment

Les traits horizontaux, en bas de chaque graphique, représentent la significativité des effets à travers le temps. Les analyses ont été corrigées pour des comparaisons multiples (correction FDR)

3.4.1.5 Proportion de fixation

Image correcte

L'analyse des proportions de fixation sur l'image correcte, ont révélé une absence d'effet du type de Stroop ($t = 1.47$, $p = 0.14$). Ainsi, la différence entre les

proportions de temps de fixation sur l'image correcte ne semble pas significativement plus importante lorsque l'essai Stroop $n-1$ est incongruent ($M = 0.28$, $ET = 0.08$) que lorsque l'essai Stroop $n-1$ était congruent ($M = 0.27$, $ET = 0.08$). De plus, nous avons observé un effet non-significatif de l'ambiguïté, $t = -0.45$, $p = 0.65$. Il semblerait donc que les participants ne fixaient pas davantage l'image correcte lorsque les instructions étaient non-ambiguës ($M = 0.27$, $ET = 0.08$) que lorsqu'elles étaient ambiguës ($M = 0.28$, $ET = 0.08$). L'effet d'interaction entre le type d'essai Stroop et le type d'instruction s'est également révélé non-significatif, $t = -0.31$, $p = 0.76$. Ainsi, l'effet du type d'essai Stroop ne variait pas significativement en fonction de l'ambiguïté (Figure 4.3.5).

Image incorrecte

Pour ce qui est de l'analyse des proportions de fixations sur l'image incorrecte, nous avons observé une absence d'effet du type d'essai Stroop ainsi qu'un effet d'ambiguïté ($t = 0.79$, $p = 0.43$ et $t = -1.39$, $p = 0.17$, respectivement). Nous avons également observé une absence d'effet d'interaction ($t = -0.35$, $p = 0.72$).

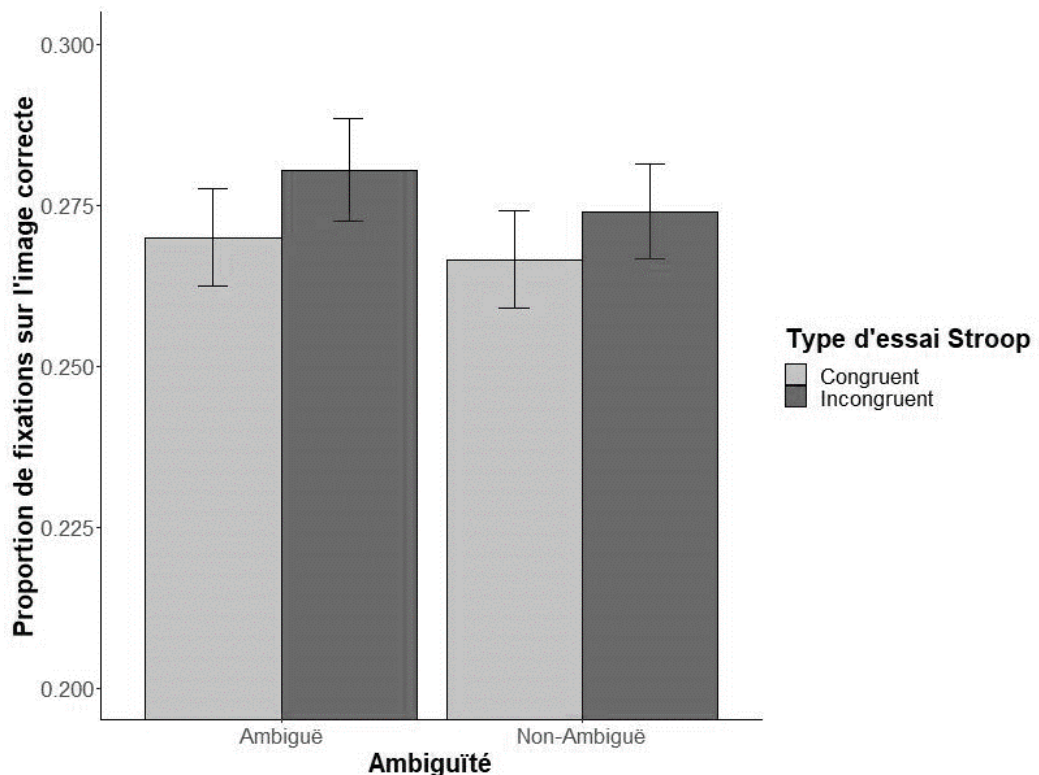


Figure 4.3.5 : Proportion de fixation sur l'image correcte en fonction de l'ambiguïté et du type d'essai Stroop $n-1$

3.4.2 Résultats exploratoires

Tout d'abord, pour ce qui est du test du coût de switching des essais Stroop, nous avons observé un effet significatif ($t = -12.15$, $p < .05$) montrant que les participants répondaient plus rapidement aux essais Stroop Non-Switch ($M = 511$ ms, $ET = 44$) qu'aux essais Stroop Switch ($M = 694$ ms, $ET = 68$). En ce qui concerne les modèles incluant la nature du type de Stroop comme effet fixe en termes de temps de réaction, proportion de fixation sur l'image correcte et proportion de fixation sur l'image incorrecte, aucun n'a révélé d'effet significatif.

Les corrélations testées entre les différents indices de la tâche de compréhension de langage et les facteurs généraux calculés ont révélé une corrélation positive entre le coût de congruence durant la tâche de langage et un facteur général (G1) comprenant la différence de proportion de bonnes réponses en Flanker, la proportion de bonnes réponses en NBack, la différence de proportion de bonnes réponses entre le bloc mixte et les deux autres blocs de la tâche Number-Letter, et la proportion de fausses alarmes de la tâche SART (Figure 4.3.S1). Cette corrélation suggère que meilleures étaient les performances de CC des participants plus grand était le coût de l'incongruence des essais Stroop durant la tâche de langage. Nous avons également observé une corrélation positive significative entre l'indice d'ambiguïté en termes de proportion de fixation sur l'image correcte et un autre facteur général (G2) incluant : la différence de proportion de bonnes réponses en Flanker, la proportion de bonnes réponses en NBack, la différence de proportion de bonnes réponses entre les essais switch et non-switch durant le bloc mixte de la tâche Number-Letter, et la proportion de fausses alarmes de la tâche SART. Cette corrélation suggère que plus les performances en CC des participants sont élevées plus il apparaîtrait une différence de proportion de fixation sur l'image correcte entre les phrases ambiguës et non-ambiguës (Figure 4.3.S2).

3.5 Discussion

Lors de cette étude, les participants réalisaient dans une première session un ensemble de tâches mesurant leurs performances dans différents processus de CC et dans une seconde session une tâche entremêlant des essais Stroop et des essais de compréhension du langage. Le but premier de cette étude, plus particulièrement de cette seconde session, était de répliquer les résultats obtenus par Hsu et Novick (2016)

montrant une implication du CC lors de la compréhension du langage. Contrairement à nos hypothèses, les résultats de notre étude n'ont pas permis de mettre en évidence un effet de la détection d'un conflit Stroop, et donc de l'augmentation de la charge de CC, sur la compréhension d'instructions orales. De plus, l'ambiguïté des instructions ne semblait pas induire davantage d'actions incorrectes. Cette ambiguïté ne semblait pas non plus avoir d'effet sur la différence entre les proportions de temps de fixation sur le but correct et incorrect. En outre, nous n'avons pas observé d'interaction entre le type d'essai Stroop et l'ambiguïté. Ainsi, la détection d'un conflit Stroop ne semblait pas permettre une meilleure révision des instructions ambiguës que lorsqu'aucun conflit n'était détecté.

De fait, contrairement à Hsu et Novick (2016), nous n'observons pas d'effet de l'ambiguïté des instructions sur la compréhension des instructions. Cette absence d'effet de l'ambiguïté des instructions est problématique puisque les instructions ambiguës étaient supposées induire un conflit temporaire entre les interprétations apparaissant au fur et à mesure de l'écoute et étaient donc censées permettre une manipulation de la difficulté du traitement du langage. L'utilisation du français est peut-être une des causes de cette absence d'effet du type d'instruction. En effet, la structure syntaxique des instructions ambiguës était à la limite d'être syntaxiquement incorrecte en français. Etant donné que notre étude est une réplique, nous avons décidé de garder la même structure syntaxique pour nos stimuli. Ainsi, il est possible que les participants aient été perturbés lors de l'écoute de ces instructions et qu'ils se soient rapidement habitués à ce type de structure syntaxique inhabituelle. De cette manière, le traitement des instructions ambiguës n'aurait pas été plus difficile que le traitement des instructions non-ambiguës et les instructions ambiguës n'auraient donc peut-être pas induit de conflit d'interprétation. Ce point semble être soutenu par le très faible pourcentage d'actions erronées lors des essais de compréhension du langage ambigu. En effet, les participants de notre étude commettaient en moyenne 0.22% d'erreurs lorsque les instructions étaient ambiguës contre 13.7% dans l'étude originale. Ce résultat descriptif met également en évidence le fait que les essais de compréhension du langage étaient peut-être trop simples en français. Ainsi, la manipulation de l'ambiguïté des instructions ne semblait pas optimale et pourrait être responsable de l'absence d'effet principal du type d'instruction mais également de l'absence d'effet d'interaction dans notre étude. Pour remédier à ce problème, il serait

nécessaire d'adapter les essais de compréhension de langage de façon à pouvoir utiliser des stimuli syntaxiquement ambigus plus corrects en français (voir Levelt et al., 1970, pour des exemples de phrases ambiguës correctes en français) induisant réellement un conflit entre les différentes interprétations possibles. Il serait également possible d'adapter les essais de compréhension de langage en utilisant des phrases comprenant une ambiguïté lexicale plutôt que syntaxique (voir Spinelli et al., 2003 pour des exemples d'ambiguïtés lexicales en français).

En ce qui concerne l'absence d'effet principal du type d'essai Stroop, elle semble indiquer que la détection d'un conflit lors d'un essai Stroop incongruent n'influçait pas le traitement d'un essai subséquent de compréhension du langage. Ce résultat pourrait être lié au changement de tâche permanent lors de la tâche Langage/CC. En effet, la manipulation de la congruence des essais Stroop était destinée à modifier la charge de CC avant la compréhension d'instruction. Cependant, le fait simplement de passer d'un essai Stroop à un essai de compréhension du langage augmente la charge cognitive (Monsell, 2003). Ainsi, il est probable que la charge cognitive allouée au changement de tâche interfère avec la manipulation de la charge de CC via l'incongruence des essais Stroop. Les résultats de nos analyses exploratoires testant l'effet de la nature des essais Stroop nous a permis de montrer que le changement de tâche avait un impact sur les processus évalués lors de notre tâche. Ainsi, le changement de tâche engendrerait une charge cognitive supplémentaire qui pourrait masquer notre manipulation de la charge de CC par la congruence des essais Stroop. Il serait donc nécessaire de contrôler ce changement entre les essais Stroop et de compréhension de langage non plus pseudo-aléatoirement mais en fixant un nombre minimum ou maximum d'essais Stroop afin qu'ils soient tous de nature Non-Switch ou Switch, ou en manipulant ce changement et en l'intégrant dans le design expérimental afin de mesurer son effet sur les performances lors de la tâche.

Dans un tel paradigme expérimental, il serait intéressant de remplacer la tâche de Stroop verbale par une tâche de Stroop non-verbale (voir Vuong & Martin, 2014 pour un exemple de de Stroop non-verbal) ou par d'autres tâche de CC comme une tâche Flanker ou SART. En effet, cela permettrait de caractériser plus finement quels processus de CC seraient le plus impliqués lors de la compréhension du langage. Il serait également intéressant d'adapter ce paradigme afin de rendre la tâche plus

écologique en présentant non plus des images d'objets séparées mais dans une scène visuelle ou encore en manipulant la difficulté du traitement langagier non plus par une ambiguïté mais par la présence de bruit ou d'autre voix.

Pour ce qui est des analyses exploratoires portant sur la relation entre les performances aux tâches de CC et à la tâche Langage/CC, l'observation d'une corrélation positive entre un facteur général et le coût de congruence des essais Stroop ne va pas dans le sens de nos hypothèses. En effet, ce résultat suggère que les participants ayant de meilleures performances de CC témoignent d'un plus grand coût de l'incongruence des essais Stroop sur les essais de compréhension du langage. De manière similaire, l'observation d'une corrélation positive entre un second facteur général et le coût de l'ambiguïté en termes de proportion de temps de fixation sur l'image correcte suggère que les participants avec les meilleures performances de CC auraient plus de difficultés avec les phrases ambiguës que ceux ayant de moins bonnes performances de CC. Ces résultats corrélationnels sont surprenants et vont à l'encontre d'études montrant un effet positif d'un entraînement des fonctions exécutives sur les capacités de traitement du langage (e.g., Hussey et al., 2017). C'est notamment ce qu'ont montré Novick et al. (2014) en entraînant ou non des participants à une tâche de CC non linguistique nécessitant le recrutement de processus de résolution de conflits et en évaluant le transfert de cet entraînement non linguistique sur les capacités de résolution d'ambiguïtés (voir Hussey et al., 2017 pour une étude similaire). Aussi, Kan et al. (2013) ont mis en évidence le mécanisme inverse en montrant un transfert d'un entraînement à la résolution d'ambiguïté syntaxique sur les capacités de résolution de conflits non-syntaxiques. Ces études ont permis de mettre en évidence une relation causale entre le CC et le traitement du langage et ouvrent à des perspectives de réhabilitation de troubles du langage par l'entraînement de processus non linguistiques.

Pour conclure, cette étude n'a pas permis de répliquer les résultats obtenus par Hsu et Novick (2016), à savoir un effet causal entre le CC et la compréhension du langage. De plus, les effets corrélationnels observés semblent surprenant compte tenu de la littérature. Davantage de participants sont nécessaires afin d'atteindre une puissance statistique suffisamment élevée et pouvoir ainsi établir une caractérisation des processus de CC engagés dans la compréhension du langage. De plus, les différentes limites exposées montrent qu'il serait nécessaire de prendre en

considération le changement de tâche dans un tel protocole et d'adapter la tâche afin d'utiliser des stimuli plus pertinents en français. Enfin, il serait intéressant d'étudier plus précisément sous quelles conditions le CC serait essentiel ou non à la compréhension du langage.

Matériel Supplémentaire

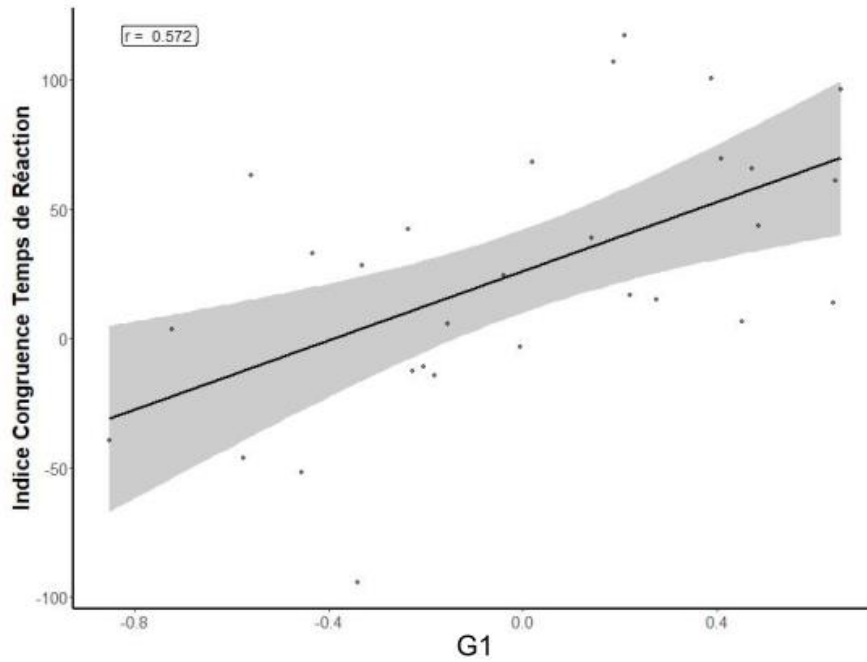


Figure 4.3.S1 : Corrélation entre le facteur général G1 et l'indice de coût de congruence durant la tâche de langage

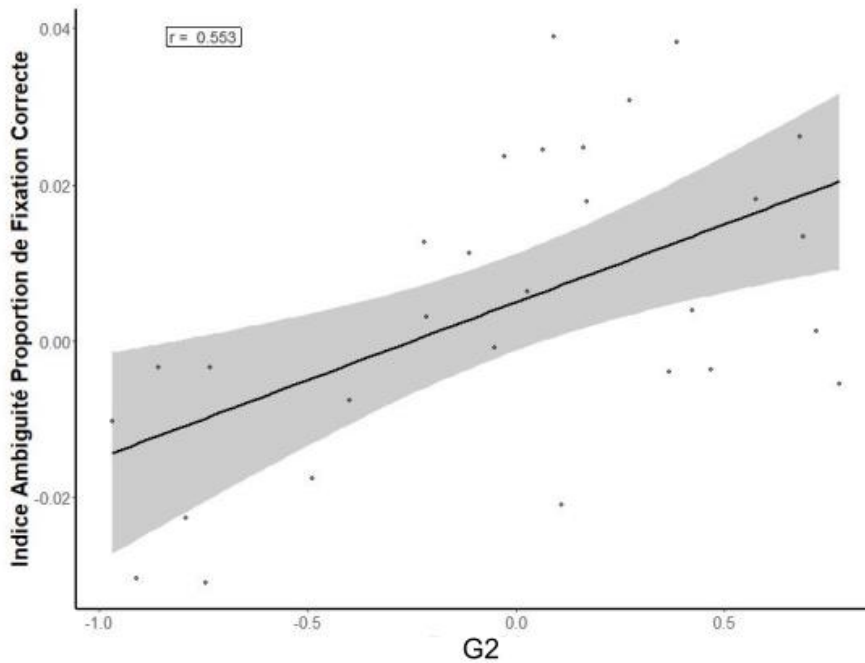


Figure 4.3.S2 : Corrélation entre le facteur général G2 et l'indice de coût d'ambiguïté sur la proportion de regard sur l'image correcte

En résumé

Dans cette étude nous avons effectué une réplique de l'étude de Hsu et Novick (2016) montrant un effet causal du recrutement du contrôle cognitif sur la résolution d'ambiguïté syntaxiques. En plus de la tâche répliquée, nous avons évalué les performances de contrôle cognitif à l'aide de tâches exécutives afin de caractériser plus finement l'implication des différents processus exécutifs. Tout d'abord, nous ne sommes pas parvenus à répliquer l'effet observé par Hsu et Novick. En effet, la détection d'un conflit de Stroop ne facilitait pas la résolution d'ambiguïté ultérieure. L'absence d'effet principal de l'ambiguïté semblerait expliquer cette non réplique de l'effet escompté. En effet, les instructions ambiguës étaient peut-être trop simples en français pour qu'un véritable conflit de représentation apparaisse, d'autant plus qu'elles étaient à la limite d'être non-correctes d'un point de vue de la langue française. Un autre facteur pouvant expliquer l'absence de réplique est l'entrelacement aléatoire des essais Stroop et de compréhension du langage. En effet, le changement d'une tâche à l'autre a pu interférer avec la manipulation du contrôle cognitif des essais Stroop puisque le changement de tâche induit en lui-même une augmentation de la charge cognitive. En ce qui concerne la mise en relation des mesures de contrôle cognitif et les performances lors de la tâche de réplique, les analyses corrélationnelles semblent montrer que les participants ayant les moins bonnes performances de contrôle cognitif étaient moins impactés par le conflit de Stroop et l'ambiguïté lors de la tâche de compréhension du langage. Ainsi, nous n'avons pas répliqué les résultats obtenus par Hsu et Novick ne permettant pas de conclure quant à un lien causal direct entre les processus de contrôle cognitif et la compréhension de phrases complexes. Les limites liées au matériel langagier et au type d'ambiguïté syntaxique utilisés semblent expliquer en grande partie l'absence d'effet de cette étude. C'est pour cette raison que nous nous sommes penchés pour la prochaine étude sur d'autres types de complexités syntaxiques et langagières, à savoir les structures passives et la négation.

4. Etude 4 : Traitement de phrases non-canoniques et implication du contrôle cognitif

L'objectif de cette étude était d'évaluer la relation entre la compréhension de phrases non-canoniques et les capacités de contrôle cognitif individuelles. Pour cela, nous avons utilisé une tâche de vérification phrase-image dans laquelle les participants écoutaient des phrases puis voyaient une image qu'ils devaient juger comme correspondant ou non à la phrase écoutée. Les phrases utilisées étaient des phrases dont la structure syntaxique était plus ou moins complexe (i.e., active ou passive) et contenant ou non une négation afin de manipuler la difficulté de la compréhension étant donnée la diminution de la fréquence ou la canonicité des phrases. Il a été montré dans la littérature que le traitement de phrases dont la structure syntaxique ou contenant une négation est plus complexe et impliquerait des processus de contrôle cognitif. Ainsi, nous avons manipulé ces facteurs et évalué les capacités de contrôles exécutifs des participants afin de mettre en relation ces processus langagiers et non-langagiers. Nous avons proposé une évaluation des capacités d'inhibition, de mise à jour en mémoire de travail, de flexibilité et de maintien actif d'un but. Ces différentes mesures nous ont permis de caractériser les différentes relations possibles avec les performances de compréhension du langage.

Cette étude expérimentale est un article soumis reformaté pour les besoins de ce manuscrit. Source : El Bouzaïdi Tiali, S., Borne, A., Meunier, L., Bolocan, M., Baciù, M., & Perrone-Bertolotti, M. (2021). Domain-general mechanism relationship with non-canonical sentence comprehension. <https://doi.org/10.31234/osf.io/ghmy8>

Le matériel utilisé dans cette étude est disponible sur la plateforme Open Science Framework. Source : https://osf.io/spwh6/?view_only=ffc27c618f61462a8e75e01717783893

Domain-general mechanism relationship with non-canonical sentence comprehension

Abstract

Canonical sentence structures are the most frequently used in a given language. Less frequent or non-canonical sentences tend to be more challenging to process and to induce a higher cognitive load. To deal with this complexity several authors suggest that not only linguistic but also non-linguistic (domain-general) mechanisms are involved. In this study, we were interested in evaluating the relationship between non-canonical oral sentence comprehension and individual cognitive control abilities. Participants were instructed to perform a sentence-picture verification task with canonical and non-canonical sentences. Sentence structures (i.e., active or passive) and sentence types (i.e., affirmative or negative) were manipulated. Furthermore, each participant performed four cognitive control tasks measuring inhibitory processes, updating in working memory, flexibility and sustained attention. We hypothesized that more complex sentence structures would induce a cognitive cost reflecting involvement of additional processes, and also that this additional cost should be related with cognitive control performances. Results showed better performances for canonical sentences compared to non-canonical ones supporting previous work on passive and negative sentence processing. Correlation results suggest a close relationship between cognitive control mechanisms and non-canonical sentence processing. This study adds evidence for the hypothesis of a domain-general mechanism implication during oral language comprehension and highlights the importance of taking task demands into consideration when exploring language comprehension mechanisms.

4.1 Introduction

Oral language comprehension occurs, in most situations, rapidly and effortlessly. Results on oral language processing suggested that this processing is usually automatic (Shtyrov, 2010). However, sometimes the situation in which we understand language or linguistic material itself interferes with automatic language processing, leading to a more critical processing load (as reflected by more extended processing or even comprehension errors). Non-canonical sentences fall into these more difficult language comprehension situations. Non-canonical sentences refer to less frequent sentences, and more specifically, that do not follow a usual structure or common sense. For example, the sentence “*The man bit the dog*” is not complex itself. However, its passive structure is less frequent, and its meaning is unusual and does not follow traditional world knowledge. Faced with such a sentence, Ferreira (2003) postulates that, when/if a deep processing is not required (with regard to task demands), we would misinterpret the sentence as if the man was bitten by the dog. According to the *good-enough* approach (Ferreira, 2003; Ferreira et al., 2002), plausibility and word order are two factors that constrain sentence interpretation because they induce more or less predictability in a sentence and rely on more or less frequent structure (see also (Christianson et al., 2010).

Different types of non-canonical sentences characterized French language, such as sentences with a non-canonical word order (as in passive sentences) and sentences containing negation. Such non-canonical sentence structures or types are less frequent and take longer to be processed (Mack & Thompson, 2017). Different propositions were made in the literature regarding the specific mechanisms involved during non-canonical sentences processing. It is suggested that these non-frequent structures require a syntactic reanalysis in order to reassign thematic roles in the sentence. Linguistic theories suggested that non-canonical sentences with unusual word order, such as passives structures, involve a movement of the agent in regards to the verb position in the sentence, requiring consideration of the different elements of the sentence in order to process it correctly (Chomsky, 1986). According to this view, dealing with this type of difficulty is entirely performed by the specialized language system. Nevertheless, a new cognitive approach suggested that non-canonical sentence processing requires additional non-linguistic mechanisms (i.e., domain-general) in order to deal with the difficulty (Novick et al., 2009).

In line with this cognitive view, several studies using oral sentence-picture matching tasks showed that non-canonical sentences were harder to process than canonical ones (e.g., Hanne et al., 2015), as reflected by longer reaction times in the former situation. Using a grammatical sentence judgment task, Bader and Meng (1999) also observed such an effect. In their study, participants had to judge whether a visually presented sentence was grammatical or not (i.e., respected grammatical structure or not). The authors observed longer reaction times and less correct responses for correct non-canonical sentences than correct canonical ones. Thus, the most accessible word order to understand is the most frequent one in a given language. This effect of word order with a processing speed cost has been observed during reading tasks such as self-paced reading tasks (e.g., Kaiser & Trueswell, 2004) and sentence plausibility tasks (e.g., Koizumi et al., 2014) but also during oral language comprehension (Kaiser & Trueswell, 2004; Tamaoka et al., 2011).

The disadvantage at the level of behavioral performances for non-canonical sentences processing also finds support in neuropsychological studies. Specifically, patients with aphasia tend to exhibit more difficulties processing passive sentences than active ones (Hanne et al., 2015; Mack & Thompson, 2017; Murray, 2018). Indeed, Bastiaanse and Edwards (2004) showed that individuals with aphasia performed poorly on a sentence-picture matching task evaluating comprehension of canonical and non-canonical sentences compared to a matched control group. Similarly, Burchert and De Bleser (2004) also showed that agrammatic patients (with anterior frontal lesion) tended to have more difficulty processing passive sentences (see also Duman et al., 2011; A. M. Meyer et al., 2012). It is in line with neuroimaging data suggesting a central role of the left inferior frontal gyrus (IFG) on complex sentence and syntactic structure processing (Caplan et al., 1998; Rogalsky & Hickok, 2011). Studies suggested that non-canonical word order induces more critical activity in the left IFG than canonical ones. For instance, Bornkessel-Schlesewsky and collaborators (2009) used fMRI measures during a sentence plausibility judgment task. They observed higher activity in the left IFG, specifically in the *pars opercularis*, for non-canonical sentences than canonical ones. Consequently, the authors suggested that the *pars opercularis* supports word-order processing mechanisms during language comprehension. Friederici et al. (2005) also showed this left *pars opercularis* implication on syntactic complexity processing. In their study, authors manipulated the number of objects permuted in the presented

sentences. They observed that permutation of one or more elements in a sentence (inducing a syntactic violation) increased the *pars opercularis* activation (see also Europa et al., 2019; Röder et al., 2002; Walenski et al., 2019 for a review). Thus, non-canonical word order (such as in passive sentence structure, for example) seems to have a non-negligible impact on sentence processing and involves different cognitive and brain mechanisms during language comprehension.

Another type of non-canonical sentence is sentences containing a negation. Sentences with negation are also less frequent than affirmative sentences and induce a higher processing load. Indeed, negative sentences take longer to process (Carpenter et al., 1999; Kaup et al., 2006) and are often misinterpreted (Carpenter & Just, 1975). This processing cost can be explained by several negative sentence characteristics such as more complex syntactic structure as negation introduce one additional element to the syntactic structure. Furthermore, it is suggested that negative sentences modify the semantic representation activation of the negated element. In other words, it is suggested that negation reduces access to mental representations of negated concepts. In line with this suggestion, MacDonald and Just (1989) showed that participants tended to inhibit representation of a word when it was negated, leading to reduced activation of its semantic representation and a longer time to subsequently access its representation. Also, Carpenter and Just (1975) demonstrated that comprehension of a sentence with a negation was more difficult than that of affirmative sentences using a sentence-picture verification task. It was reflected by longer reaction times to verify the correspondence between negative sentences and a picture than reaction times to verify the correspondence between affirmative sentences and a picture. Thus, processing negative sentences add complexity to comprehension mechanisms (i.e., representation construction) due to additional syntactic elements to the sentence structure and reduction of activation of the negated element. Tettamanti and collaborators (2008) showed that this reduction of conceptual representation activation by a negation could also be observed through brain activity with a deactivation of brain regions involved in action-related language processing when action was negated in the sentence.

Further, de Vega et al. (2016) observed that the inhibitory processes activated during negative sentence comprehension were similar to those observed during response inhibition in a no-linguistic task (see also Beltrán et al., 2018). In their study, the authors

asked participants to perform a dual-task including comprehension of negative and affirmative sentences and Go/NoGo items while recording EEG activity. Results revealed a reduced theta oscillation (known to reflect inhibitory processes) on the NoGo trials during negative sentences compared to affirmative sentences. The authors interpreted these results as an evidence of the recruitment of inhibitory processing during negative sentence comprehension. Moreover, studies with patient with aphasia who had lesion in the left temporal lobe (Wernicke or fluent aphasia) suggested that these patients exhibited more difficulty verifying negative sentences than affirmative ones compared to patients who had a lesion in the right temporal lobe or to typical adults (Juncos-Rabadà, 1992). The involvement of the temporal lobe during negative sentence processing has also been observed in fMRI studies using a picture verification task. For example, Carpenter and collaborators (1999) conducted an experiment in which participants had to verify whether a picture corresponded to a previously affirmative or negative read sentence. The authors observed a higher brain activity during negative sentences in the posterior part of the superior temporal gyrus and the supramarginal gyrus than during affirmative sentences (see also Christensen, 2009). Similar to passive sentences, Bahlmann et al. (2011) observed in an fMRI study that negative sentence processing involved higher activation of the left IFG than affirmative sentence processing (but this increased activation for negative sentences has not always been observed in the literature, see for instances Christensen, 2009).

Nevertheless, the left IFG is also related to domain-general cognitive mechanisms. Some authors have hypothesized that processing of non-canonical sentences involves such domain-general processes (Novick et al., 2005; Thompson-Schill et al., 2005), in line with the observation of inhibitory system involvement during negative sentence processing by de Vega et al. (2016). According to this hypothesis, domain-general mechanisms interact with language processing when there is a need for conflict resolution between different representations as well as during semantic inhibition. In addition, it has been shown that working memory plays an important role in non-canonical sentence processing (Sung et al., 2017). Several studies demonstrated a close relationship between language comprehension and cognitive control (El Bouzaïdi Tiali et al., 2021; Hsu et al., 2020; Hsu & Novick, 2016; Hussey et al., 2017; Perrone-Bertolotti et al., 2020; Vuong & Martin, 2014). For example, Hsu et al. (2020) showed that cognitive control trials with nonverbal material influenced ambiguous sentence

processing trials in an interleaved task. On a neuropsychological level, Vuong and Martin (2011) showed that patients with a lesion in the left IFG with difficulties in executive processing also exhibited difficulty resolving syntactic ambiguity (see also Novick et al., 2009). In the same vein, Hussey and collaborators (2015) presented language processing improvement following transcranial direct current stimulation (tDCS) on the left prefrontal cortex, known to be involved in cognitive control processing. Language improvement has also been observed following working memory training (Hussey et al., 2017), adding evidence for the proposal of a close relationship between cognitive control and language processing.

In this study, we were interested in the relationship between non-canonical oral sentence processing and cognitive control mechanisms. To evaluate language processing, we presented participants with a sentence-picture verification task. We manipulated the extent to which sentences were canonical or not by presenting active and passive sentences that contained or not a negation. We expect the non-canonical sentences to be more difficult to process and to induce a higher cost than canonical ones. In addition, and to evaluate the relationship between language and cognitive control processes, participants also performed four cognitive control tasks assessing different executive processes. We expect that participants with better cognitive control abilities should also exhibit better language processing. Specifically, a more robust relationship is expected between language and general cognitive domain for processing non-canonical sentences conditions.

4.2 Method

The study was composed of two sessions, one for language and another one for the executive control. The order of each session was randomized between participants. All tasks were presented using E-Prime software (v2.0.10.353).

4.2.1.1 Participants

Eighty-two French students (23 males and 59 females; mean age = 20.6 years old; SD = 1.66) from Grenoble Alpes University took part in this study. They were all right-handed with no history of neurological diseases, normal or corrected to normal vision. Participants gave written consent before performing the experiments and received course credits for their participation. The local ethical committee has approved this study.

4.2.2 Language Session

4.2.2.1 Material

Fifty-six French sentences were recorded by a male native French speaker (mean duration = 1673ms; SD = 223ms) and 14 black and white drawing pictures were taken from the French version of the Paradis bilingual aphasia test (Paradis, 1987). Sentences varied according to sentence structure (i.e., Active condition vs. Passive condition) and sentence type (i.e., Affirmative condition vs. Negative condition). Overall, 14 sentences were Active-Affirmative, 14 were Active-Negative, 14 were Passive-Affirmative, and 14 were Passive-Negative. Each action represented an action involving two elements (e.g., a man and a woman; a dog and a cat).

4.2.2.2 Procedure

Participants listened to sentences followed by a picture and had to judge whether the picture corresponded or not to the heard sentence. Each sentence was presented twice, congruent with the image (i.e., Congruent condition) and incongruent (i.e., Incongruent condition). A typical trial started with the sentence presentation with a fixation cross at the center of the screen. At the end of the sentence, the fixation cross remained on the screen for 200ms and was then followed by the picture until participants' response or for a maximum of 3000ms (see Figure 4.4.1). Crossing between sentences structure conditions (i.e., Active or Passive), sentence type conditions (i.e., Affirmative or Negative), and congruency conditions (i.e., Congruent or incongruent) was counterbalanced.

Consequently, each image was presented eight times, four times congruent, and four times incongruent to the sentence, according to four versions of the sentence (i.e., Active-Affirmative, Active-Negative, Passive-Affirmative, and Passive-Negative). Participants provided manual responses with a computer mouse, left when picture and sentence matched and right when the picture and sentence did not match. Accuracy and reaction times were measured.

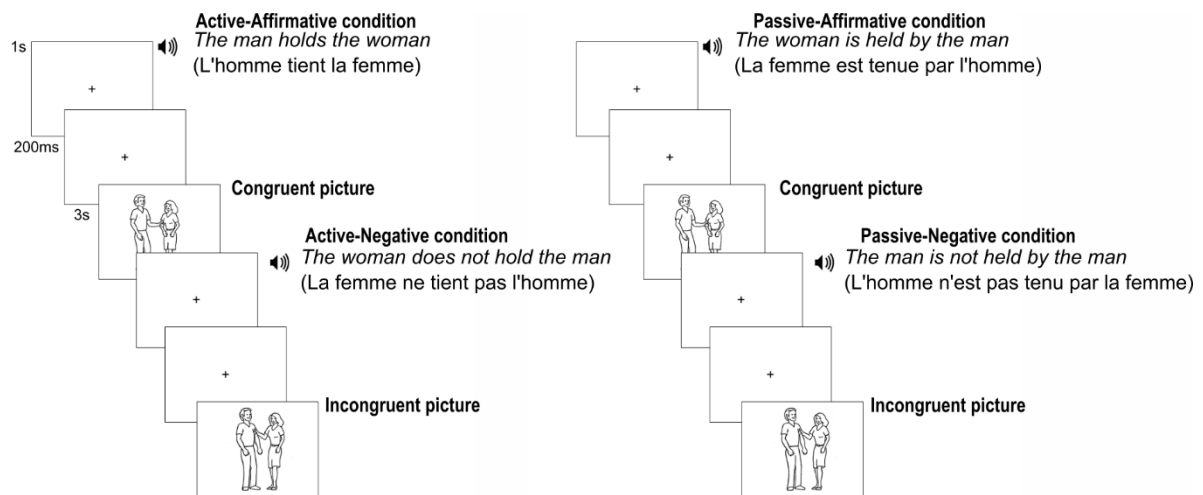


Figure 4.4.1: Typical trial of the sentence-picture verification task. Sentences for each of the four language conditions: Active-Affirmative; Active-Negative; Passive-Affirmative and Passive-Negative, both congruent and incongruent picture presentation are also presented

4.2.3 Executive Control Session

This session was composed of four tasks to evaluate four cognitive control processes. Each task lasted about 15 minutes and is described hereafter.

4.2.3.1 Flanker Task

This task proposed by Eriksen & Eriksen (1974) assesses inhibition control and interference resistance (Ridderinkhof et al., 1999). Participants were instructed to decide whether a target arrow, presented in the center of the screen among other distracting arrows, was pointed to the right or the left. Each trial included five black arrows (a central target arrow and two distracting arrows on each side of the central one; overall covering 4cm on the screen, i.e., 3.6 of visual angle) presented in the center of a grey screen during 700ms. A black rectangle 4cm in size followed the arrows during 300ms (see Figure 4.4.2). This black rectangle served as a visual mask. A total of 240 trials were presented, divided into two conditions: congruent (120 trials) and incongruent (120 trials). For congruent trials, the central target arrow pointed out in the same direction as distracting arrows. In contrast, the central target arrow pointed out in the opposite direction for incongruent trials. For each condition, the target arrow pointed to the right for half of the trials and to the left for the other half. Trials were pseudo-randomly presented, controlling for the absence of two subsequently identical trials (e.g., target arrow pointed to the left with incongruent distractors) and for the

absence of four consecutive trials of the same condition (i.e., congruent or incongruent). The experimental task was performed with a 20s break every eighty trials. Manual responses were recorded with a computer mouse (right button for the central arrow pointing to the right and left button for the central arrow pointing to the left). Accuracy and reaction times were measured. Participants performed 16 training trials in order to get familiarized with the task.

4.2.3.2 N-Back Task

This task was adapted from Kane et al. (2007) and assessed working memory updates (Smith & Jonides, 1999). During this task, participants were instructed to judge whether the letter presented on the screen was the same as the second-to-last one presented (2-back). According to Kane et al. (2007), this difficulty level is the most adequate to assess updates in working memory. One trial was constituted of a single letter presented on the center of the screen during 500ms with an inter-stimulus interval of 200ms (see Figure 4.4.2). Nine different letters were presented: N, Z, R, B, H, X, Q. The task was composed of 200 trials presented in four blocks of 50 trials each. Each block was composed of 10 target, 10 lure, and 30 neutral trials. The ten lure trials were divided into two categories, half of them being a repetition of the same letter (1-back) and the other half a repetition of the third-last letter (3-back). The lure trials increased the difficulty of the task and the risk of false alarms (Kane et al., 2007). Overall, 162 non-target trials (20% lures and 60% neutrals) and 40 target trials (20% of letters the same as the second-to-last letter, i.e., 2-back) were presented. Participants provided manual responses with the computer mouse, the left button for a “yes” response (i.e., when the second-to-last letter was the same as the letter on the screen), and the right button for a “no” response. The accuracy and the reaction times were measured, as well as the rate of false alarms. False alarms allowed us to evaluate the familiarity and response inhibition (i.e., the higher the proportion of false alarms, the lower the inhibition of predominant responses). Participants performed 11 training trials in order to get familiarized with the task.

4.2.3.3 Number-Letter Task

This task was adapted from the task Miyake et al. (2000) proposed to evaluate the cognitive cost induced by the change of task (i.e., cognitive switching) and, more specifically, the change between letter processing and number processing. During this task, a number/letter pair (e.g., 7U) was presented in the upper or lower part of the

screen (see Figure 4.4.2). When this pair was presented in the upper half of the screen, participants were instructed to indicate whether the letter was a vowel or a consonant. Participants were instructed to indicate whether the number was even or odd when the pair was displayed in the lower half of the screen.

The task was divided into three blocks: a Letter block, a Number block, and a Mixed block (including both Letter and Number condition items presented in random order). The Letter and Number blocks were composed of 40 trials each, while the Mixed block composed 80 trials. A brief pause was made after each block. Each trial included the letter/number pair presentation that remained on the screen until the participant's manual response. The stimulus presentation was followed by a grey screen that lasted 150ms. Participants performed a training session including three trials per condition.

Participants responded with the computer mouse by pressing the left button when the letter was a consonant or the number odd (i.e., G, K, M, R; and 3, 5, 7, 9), and the right button when the letter was a vowel or the number even (i.e., A, E, I, U; and 2, 4, 6, 8). Accuracy and reaction times were measured. The comparison between the no-switch condition (i.e., Number block and Letter block) and switch condition (i.e., Mixed block) allowed the evaluation of the switching cost (Miyake et al., 2000; Rogers & Monsell, 1995).

4.2.3.4 SART

The SART is a Go/No-Go task assessing sustained attention and inhibition (Robertson et al., 1997). During this task, participants were instructed to respond when a digit other than "3" was presented on the screen (i.e., 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9) and not to respond when "3" was presented (see Figure 4.4.2). A trial included the presentation of a digit (black font, size 14) on the center of a grey screen, during 250ms, followed by a visual mask lasting 900ms (circle with two diagonals). The task was composed of a total of 450 trials presented randomly. Each digit was presented 50 times. The total number of trials was performed in 10 random blocks of 45 trials each. The digit 3 (the target item) appeared five times per block. A pause between blocks was proposed to participants. Manual responses were recorded with the computer mouse by pressing any button when a digit, excepting "3", appeared on the screen. Accuracy and reaction times were measured. To evaluate the level of sustained attention and inhibition, we calculated the false alarm rate of each participant (i.e., the percentage of responses on No-Go trials). A high percentage of false alarms indicates difficulties in maintaining

attention and inhibiting automatic responses. Participants performed 18 training trials to get familiarized with the task.

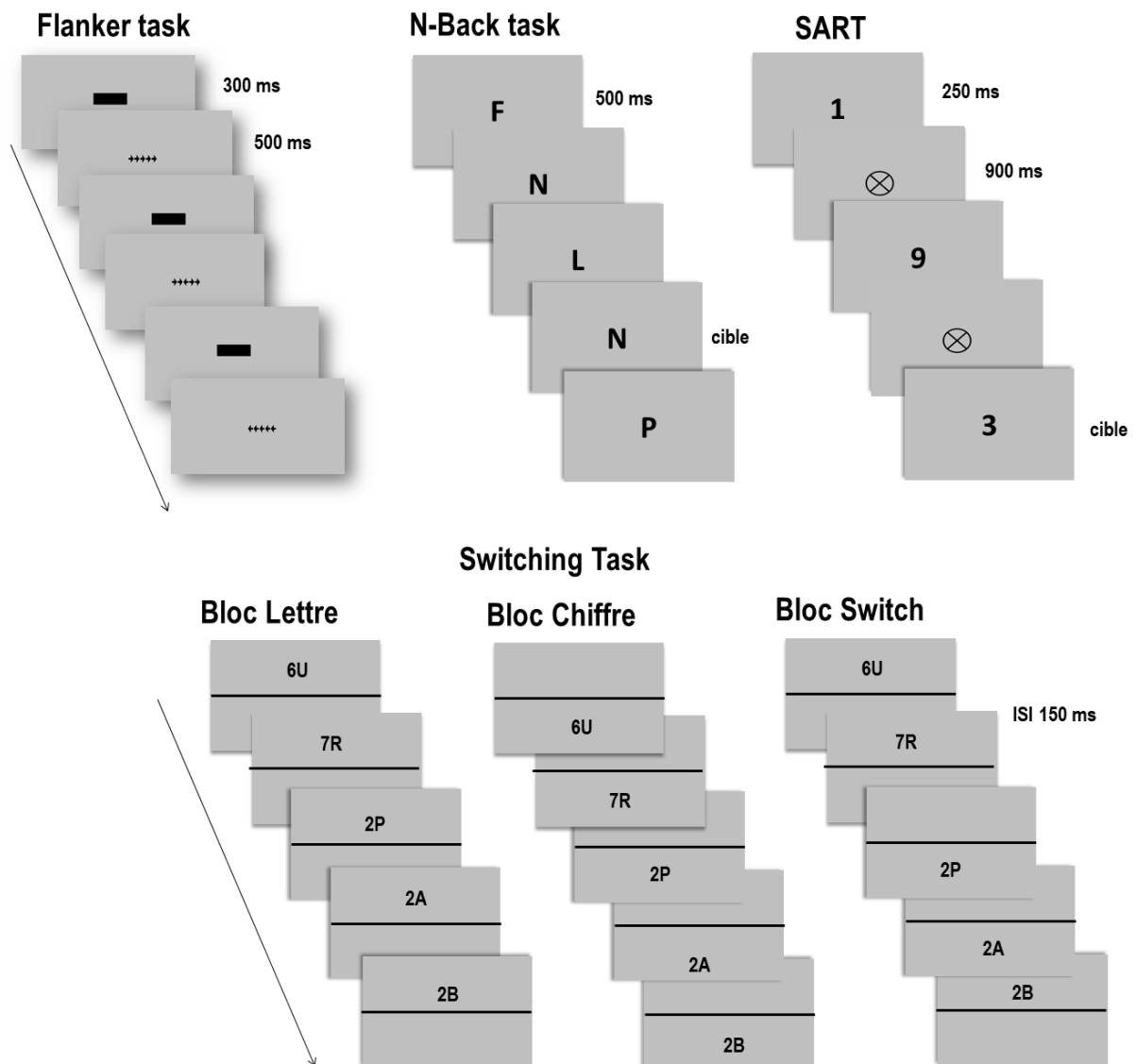


Figure 4.4.2: Experimental design of the four cognitive control tasks used in the cognitive control session

4.3 Analyses

Statistical analyses were conducted using R version 4.0.3 (R Core Team, 2018), and lme4 (Bates et al., 2015) and lmerTest (Kuznetsova et al., 2017) packages.

4.3.1 Language Session

This task was designed to evaluate the effect of sentence structure and sentence type on language comprehension. We hypothesized that sentences with a passive structure would be harder to understand than sentences with an active one. This way, we expected participants to be less accurate and slower for passive than for active sentences. Similarly, we expected comprehension to be more difficult for negative sentences than affirmative ones. In addition, we also expected an increase in comprehension difficulty reflected by an increase in error rates and longer reaction time when sentences were both passive and negative compared to other condition crossings. More specifically, we expected a gradual difficulty with the following pattern in terms of performance: Active-Affirmative > Passive-Affirmative > Active-Negative > Passive-Negative. As a first step, we analyzed accuracy and reaction times as a function of sentence type and sentence structure through a logistic mixed effect model and a mixed effect model, respectively. Both of these models included as fixed effects: sentence structure, sentence type, and as random effects: participants' intercept and stimuli's intercept.

As in this experiment, participants' comprehension was evaluated through a verification task; we also evaluated the congruence of the picture. More specifically, participants had to judge whether the picture presented corresponded to the sentence they just heard or not. The picture presented could be congruent or incongruent with the sentence, influencing both accuracy and reaction times. This is why we also computed other analyses, including the picture congruency in the statistical design. Regarding accuracy, we computed a logistic mixed-effect model with as fixed effects: sentence structure, sentence type, and congruency of the picture; and as random effects: participants' intercept and stimuli's intercept. Regarding reaction times, we computed a mixed-effect model with the same fixed and random effects.

In addition, we computed a general score for each condition crossing and each participant corresponding to their performance in the language task. We obtained four scores corresponding to participants' performance for Affirmative-Active, Affirmative-Passive, Negative-Active, and Negative-Passive sentences. This score corresponded to the mean of the Z-Score of the accuracy and reaction time performances (for reaction times, we computed the Z-Score from the opposite of the mean reaction times

so that a higher score reflected a higher performance). Hence, each score considers the possible participant's strategy (speed/accuracy trade-off).

4.3.2 Executive Control Session

In order to facilitate reading of results and as the executive control tasks used in this study are classic tasks with well-known and robust effects (e.g. Stroop effect), we present the analyses and results verifying these effects at the same time.

4.3.2.1 Flanker Task

Accuracy and reaction times were measured and analyzed to assess inhibition and interference resistance. We computed two paired *t*-tests (one for accuracy and one for reaction times) to compare congruent and incongruent Flanker trials. Regarding accuracy, a significant main effect of congruency was observed ($t = 7.58, p < .05$) in which participants responded more accurately during congruent ($M = 0.99; SD = 0.01$) than during incongruent trials ($M = 0.97; SD = 0.04$). The same effect was observed for reaction times ($t = -18.16, p < .05$) with participants being faster for congruent trials ($M = 473\text{ms}; SD = 93\text{ms}$) than for incongruent ones ($M = 564\text{ms}; SD = 108\text{ms}$).

4.3.2.2 N-Back Task

For this task, due to a technical issue, accuracy and reaction times could not be recorded for 48 participants. Hence, we compared neutral trials to $n-1$ lure trials and to $n-3$ lure trials, and $n-1$ lure to $n-3$ lure trials through paired *t*-tests for both accuracy and reaction times for the remaining 34 participants. These analyses assessed the effect of lures on working memory performances. In terms of accuracy, significant effects were observed when comparing neutral trials to $n-1$ lure trials ($t = 4.35, p < .05$) and neutral trials to $n-3$ lures ($t = 4.64, p < .05$). Indeed, more accurate responses were observed for neutral trials ($M = .73; SD = 0.08$) than for $n-1$ lure trials ($M = 0.66; SD = 0.13$) and $n-3$ lure trials ($M = 0.62; SD = 0.16$). No difference was observed between $n-1$ lure and $n-3$ lure trials. In terms of reaction times, similar results were observed with significant differences between neutral and $n-1$ lure trials ($t = -6.32, p < .05$) as well as between neutral and $n-3$ lure trials ($t = -3.37, p < .05$). Participants were faster for neutral trials ($M = 467\text{ms}; SD = 43\text{ms}$) than for $n-1$ ($M = 502\text{ms}; SD = 61\text{ms}$) and $n-3$ ($M = 484\text{ms}; SD = 53\text{ms}$) lure trials. A significant difference between $n-1$ and $n-3$ lure trials ($t = 2.77, p < .05$) was also observed in terms of reaction times.

4.3.2.3 Number-Letter Task

For this task, we tested the difference between switch and non-switch trial in the mixed block in terms of accuracy and reaction time in order to evaluate switching cost. Regarding accuracy, no significant difference was observed between non-switch and switch trials. However, in terms of reaction times, we observed a significant difference ($t = 13.35, p < .05$) showing that participants were faster during non-switch trials ($M = 1140\text{ms}, SD = 247\text{ms}$) than during switch trials ($M = 1556\text{ms}, SD = 401\text{ms}$).

4.3.2.4 SART

For this task, we computed a t -test comparing the proportion of correct answers of Go and NoGo trials. This test revealed a significant difference ($t = 9.27, p < .05$), showing that participants responded more correctly to Go trials ($M = 0.92; SD = 0.10$) than to NoGo trials ($M = 0.77; SD = 0.18$). Average false alarm rate of participants on NoGo trials was 0.23 ($SD = 0.18$).

For each of these cognitive control task, we calculated a general score for each participant corresponding to the mean of their Z-Scored mean accuracy and mean reaction time (for reaction times we computed the Z-Score from the opposite of the mean reaction times in order that a higher score reflected a higher performance). This way we obtained a Z-Score for each participant for each task of this study⁶. We then used these scores to calculate the correlation between all tasks and evaluate the relationship between language comprehension processes assessed in the language task and cognitive control processes. More specifically, we were interested in the correlations between each language condition crossing and the score of each executive control task. Correlations were Bonferroni corrected for multiple comparisons.

4.4 Results

Regarding the language task, in terms of accuracy, the first analyses including only the sentence structure and sentence type as fixed effect revealed a significant main effect of sentence structure ($z = -3.97, p < .05$), suggesting that participants were more accurate for active ($M = 0.91, SD = 0.11$) than for passive sentences ($M = 0.85, SD = 0.10$). The main effect of sentence type was also significant ($z = -6.72, p < .05$),

⁶ Correlations for the N-Back task were performed with the remaining 34 participants since we had a technical issue with the other ones.

showing that participants responded more correctly for affirmative ($M = 0.93$, $SD = 0.10$) than for negative sentences ($M = 0.84$, $SD = 0.12$) (see Figure 4.4.3). However, the interaction effect was not significant. In terms of reaction times, we observed a significant main effect of sentence structure ($t = 6.18$, $p < .05$) as well as a significant main effect of sentence type ($t = 10.2$, $p < .05$). These effects revealed that participants were faster to respond to active sentences ($M = 1239$ ms, $SD = 177$ ms) than to passives ones ($M = 1398$ ms, $SD = 207$ ms), and were faster to respond to affirmative sentences ($M = 1180$ ms, $SD = 196$ ms) than to negative ones ($M = 1466$ ms, $SD = 209$ ms) (see Figure 4.4.3). Interestingly, for both accuracy and reaction times, the less canonical the sentence the lower the performance.

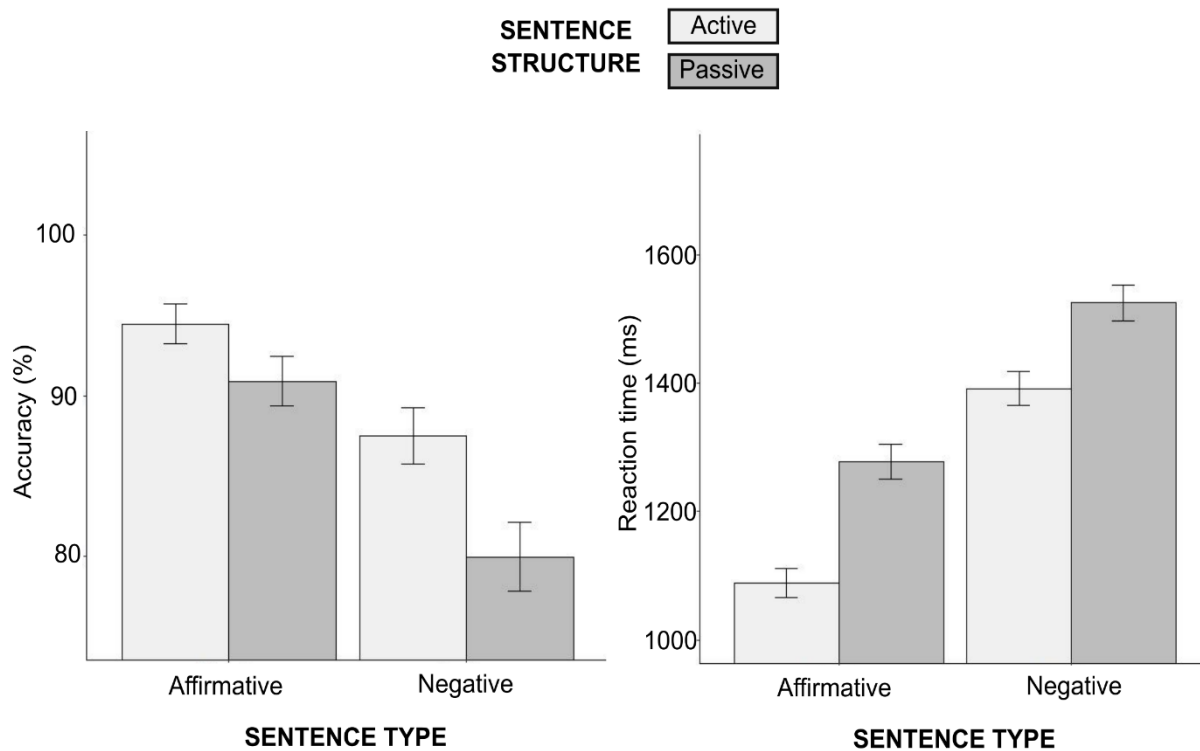


Figure 4.4.3: Results from the sentence-picture verification task in terms of accuracy (percent of correct responses) and reaction times (in milliseconds) showing the effect of sentence type (Affirmative and Negative sentences) and sentence structure (Active and Passive sentences)

Analyses of accuracy including congruency of the picture as a fixed effect revealed a significant main effect of sentence structure ($z = -5.09$, $p < .05$) and a main effect of the sentence type ($z = -9.40$, $p < .05$) similar to the model without the congruency factor. The analysis also revealed a significant main effect of picture

congruency ($z = -5.50, p < .05$). Surprisingly, this effect revealed that participants were more accurate to tell whether the picture corresponded to the sentence they just heard when the picture was incongruent with the sentence ($M = 0.90, SD = 0.11$) than when it was congruent ($M = 0.87, SD = 0.11$). In addition, we observed a significant interaction effect between the sentence structure and the picture congruency ($z = 3.43, p < .05$) as well as a significant interaction between the sentence type and the picture congruency ($z = 7.88, p < .05$). The analysis also revealed a three-way interaction between sentence structure, sentence type and picture congruency ($z = -2.55, p < .05$) (see Figure 4.4.4).

In terms of reaction times, the analysis revealed a significant main effect of sentence structure ($t = 6.45, p < .05$), suggesting that participants responded faster for Active sentences than for Passive ones. Similarly, we observed a significant main effect of sentence type ($t = 14.3, p < .05$) showing that participants responded faster for Affirmative sentences than for Negative ones. The analysis also revealed a significant interaction between sentence structure and picture congruency ($t = -2.05, p < .05$), and a significant interaction between sentence type and picture congruency ($t = -13.35, p < .05$) (see Figure 4.4.4). These interaction effects suggest that the reaction time to incongruent or congruent pictures is different according to the sentence structure (i.e., Active or Passive sentences) and to the sentence type (i.e., Affirmative or Negative sentences).

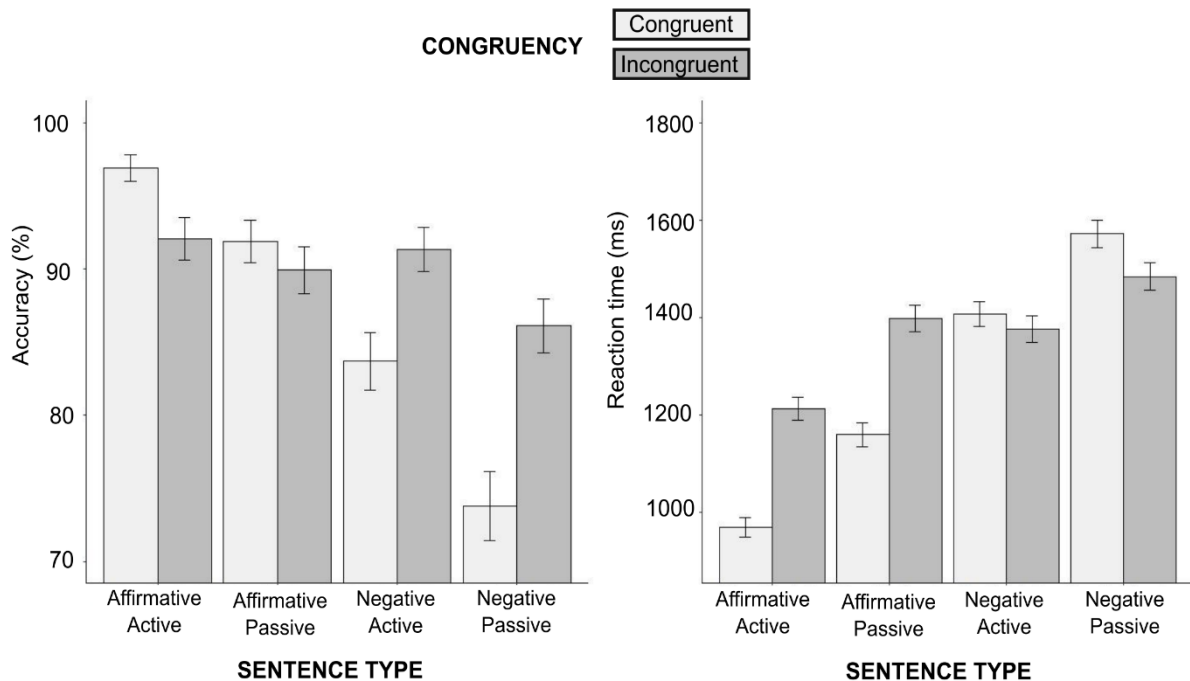


Figure 4.4.4: Results from the sentence-picture verification task in terms of accuracy (percent of correct responses) and reaction times (in milliseconds) showing the effect of Congruency (Congruent and Incongruent conditions) as a function of both sentence structure and sentence type (i.e., each sentence condition crossing)

Regarding correlation analyses between language and cognitive control performances, we observed significant moderate positive correlations between the Number-Letter task score and the four language condition crossings (Active-Affirmative: $r = 0.34$, $p < .05$; Passive-Affirmative: $r = 0.46$, $p < .05$; Active-Negative: $r = 0.45$, $p < .05$; Passive-Negative: $r = 0.37$, $p < .05$). These correlations suggest that the better the performance in the Number-Letter task, the better the performance in the sentence-picture verification task. In other words, cognitive flexibility and the capacity to switch between tasks and representations seemed to be linked to language processing. We also observed a significant moderate positive correlation between the N-Back score and Passive-Affirmative sentences ($r = 0.48$, $p < .05$). This correlation is to be interpreted with caution as it was computed with only 34 participants. However, it seems to suggest a relationship between update in working memory processes and language mechanisms. No significant correlation was observed between each of the other cognitive control tasks (i.e., the Flanker task and the SART) and the different

condition crossings of the sentence-picture verification task. The different correlations are shown in schematic display in Figure 4.4.5.

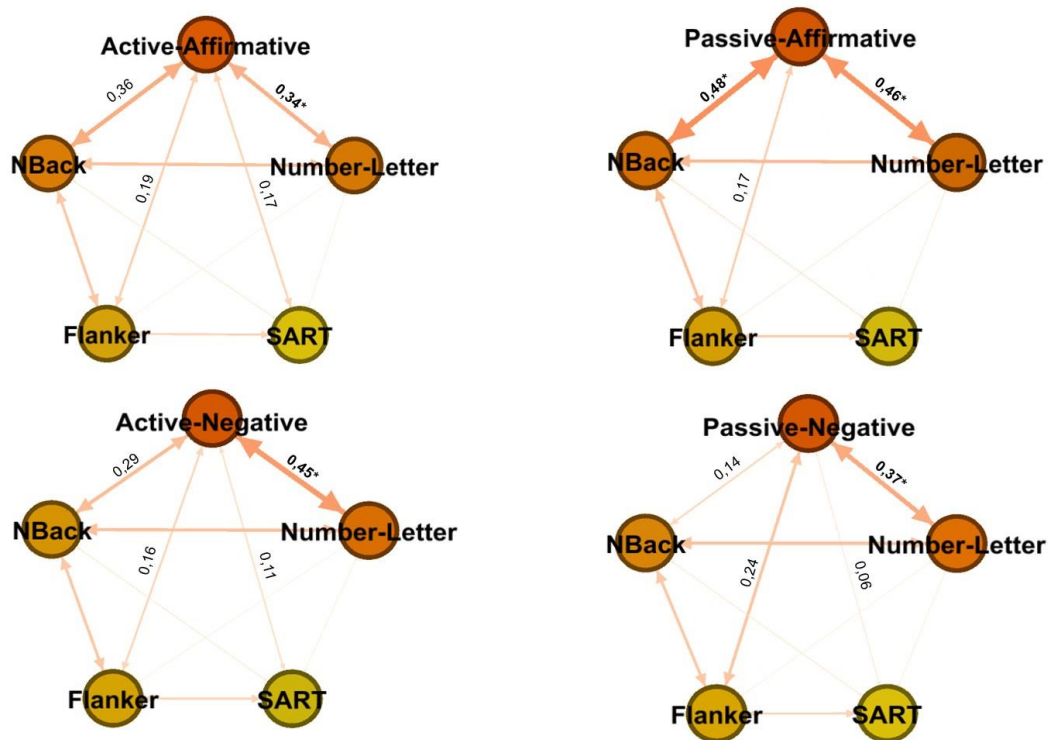


Figure 4.4.5: Correlation between cognitive control tasks and each condition crossing for the sentence-picture verification task

The significant r values are displayed in bold with an asterisk. The strength of the correlations is also represented through the width and color of the arrows.

4.5 Discussion

The present study aimed at evaluating non-canonical sentence processing and its relationship with cognitive control mechanisms. For this purpose, we used a sentence-picture verification task in which participants listened to a sentence followed by a picture and had to tell whether the picture corresponded to the sentence they listened to or not. We manipulated the extent to which sentences were canonical or not on two linguistic features: sentence structure (i.e., active or passive) and sentence type (i.e., affirmative or negative). As expected, we observed an effect of sentence structure and sentence type for both accuracy and reaction time measures suggesting that participants performed better for the active sentences than for the passive ones and also for the affirmative sentences than for the negative ones. Interestingly, the pattern of performance was decreasing with sentence complexity. In other words, the less canonical the sentence, the lower the performance of participants. Indeed, when we

look at the mean difference between the least canonical sentences (i.e., Negative-Passive sentences) and the most canonical sentences (i.e., Affirmative-Active sentences), we observed that participants took additional 400 milliseconds and were around 15% less accurate to decide whether the picture corresponded to sentences of the least canonical condition (see Figure 3). This study confirmed the additional cost of processing non-canonical sentences and brings additional evidence of the complex processing of non-canonical sentences in the auditory modality. This difficulty in processing non-canonical sentences can be explained in terms of syntactic constructions frequency. In the same way as lexical frequency strongly influences lexico-semantic processing (Ferreira et al., 1996; Meunier & Segui, 1999), syntactic structure frequency seems to influence sentence processing (Greenbaum, 1980). This result reflected the syntactical frequency in French, in which passive and negative sentence structures are less frequent than active and affirmative ones. Indeed, when an item is less frequent, predictive mechanisms that explain (in part) the automatic auditory language processing are limited. Processing complex sentences engage conflict between sentence representations that need to be dealt with. It implies that additional processing is at stake and that executive control processes could be involved in more difficult sentences (Novick et al., 2005).

We proposed four executive control tasks to evaluate this relationship with the executive control implication during non-canonical sentences comprehension. Firstly, correlation analyses showed a relationship between the performances in the N-Back task and the Passive-Affirmative sentence performance. This correlation has to be interpreted carefully due to the number of participants included in the test (n=34). Nevertheless, it suggests that participants with the higher update in working memory abilities tend to better process Passive-Affirmative sentences. This pattern can be explained because passive sentences put additional demands on syntactic structure processing that working memory processes could support. Several studies have shown a close relationship between working memory load and the processing of syntactically complex sentences (Gordon et al., 2002; King & Just, 1991).

Moreover, the fact that this correlation pattern is not observed for negative sentences can be explained by the demand for negativity. Indeed, negative sentences put higher demands in terms of content representation, while passive sentences increase demands in terms of binding elements of the sentence. It is also possible that the task

demands explain in part this correlation effect. Indeed, the task requires participants to maintain information and representations of the sentence they just heard in working memory to verify whether it corresponds to the following picture. Thus, working memory abilities seem to play a role in this task and during complex sentence processing. However, this correlation analysis does not allow us to determine whether this involvement of working memory processes appears during sentence processing or during verification processing of the task.

Secondly, correlation analysis also showed a positive correlation between the Number-Letter task and each condition crossing of the language task. Participants who had better flexibility abilities also exhibited better language comprehension performance. Specifically, participants who exhibited better abilities to switch between instructions during the Number-Letter task are those who performed the best in the language comprehension task. Different processes at work during the language task can account for this relationship with flexibility in mental processing. Indeed, here, sentence-picture verification processing can be compared to comprehension of someone explaining a schema, a graphic, or, more generally, a visual scene. In that sense, matching the sentence or not with a visual item can be viewed as an everyday comprehension process that requires switching between representations. Thus, on the one hand, flexibility might be required to process sentences and to deal with the different types of syntactic structures. On the other hand, flexibility might also be required to verify the compatibility between the sentence and the picture, and more specifically, to switch from an auditory representation to a visual one. If this is correct, cognitive flexibility could be involved during language comprehension about task demands.

Finally, the effect of congruency of the picture observed suggests that the task influences how participants are dealing with the sentence they processed. Indeed, verifying the correspondence between the sentence and the picture seems to vary according to the sentence type and sentence structure and according to the picture congruency. While deciding whether the picture was congruent or not, the sentence seemed easier for affirmative sentences when the picture was congruent than incongruent; it seemed that the same judgment was more accessible when the picture was incongruent for negative sentences. This might be because negative sentences reverse the representation of the sentence. This reversal of the truth value of a sentence is a characteristic of a negative sentence (Papeo & de Vega, 2020). Thus,

the observation of longer reaction times and lower accuracy for negative sentences than for affirmative ones suggests that reversing the representation takes additional time and is more difficult to process. Moreover, this process of selecting the appropriate representation might involve inhibition of the non-pertinent representation and goal-directed processing to select the appropriate representation and perform the task.

4.6 Conclusion

The present study provides evidence of an additional cost during auditory non-canonical sentences comprehension, including passives and negatives. This additional cost seems to be more critical if both passive and negative structures are combined. We showed that this cost was related to cognitive control mechanisms during the sentences-picture verification task reflecting a possible involvement of such executive control processes during complex sentence processing. In a general view, this study demonstrated that non-canonical sentences take more cognitive resources than canonical ones and supports the hypothesis of a close relationship between language comprehension and cognitive control processes. This study highlights that task demands will influence processes involved, which is crucial to understand language comprehension mechanisms. Finally, this relation between executive control mechanisms and language might open new perspectives for language impairment rehabilitation by cognitive control training.

En résumé

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la compréhension de phrases complexes de par leur structure syntaxique ou la présence ou non d'une négation. Nous faisons l'hypothèse que ce type de phrases impliquent davantage de ressources de contrôle cognitif comparativement à des phrases plus simples. Afin de tester cette hypothèse, nous avons évalué la compréhension de telles phrases ainsi que les capacités exécutives (d'inhibition, de mise à jour en mémoire de travail, de flexibilité, et de maintien actif d'un but) des participants. Nous nous attendions à une diminution des performances avec l'augmentation de la difficulté des phrases traitées ainsi qu'à une plus forte relation entre les performances de contrôle cognitif avec les phrases complexes qu'avec les phrases les plus simples. Les effets de la structure des phrases ainsi que du type de phrase supportent nos hypothèses. En effet, les phrases passives induisaient de moins bonnes performances que les actives, et les phrases négatives de moins bonnes performances que les affirmatives. De plus, il semblerait que la combinaison d'une structure passive avec la présence d'une négation augmente le coût de traitement et de compréhension du langage, suggérant le recrutement de davantage de ressources cognitives que pour des phrases plus simples. De manière intéressante, la mise en relation des performances de contrôle cognitif des participants avec celles lors de la tâche langagière montre la présence d'une relation étroite entre ces mécanismes. Plus spécifiquement, nous avons observé un lien fort entre les capacités de flexibilité cognitive des participants et leurs performances lors de la tâche de langage. Toutefois, cette relation ne semblait pas varier en fonction de la difficulté de la tâche de langage. L'effet observé de la congruence de l'image avec la phrase sur les performances et son interaction avec les variables manipulées lors de cette étude suggèrent que la demande de la tâche est importante à prendre en compte lorsque nous étudions la compréhension du langage. En effet, dans cette tâche une demande additionnelle de mise en correspondance des représentations sémantiques langagières et visuelles entraine en jeu. Ces observations rejoignent le postulat de Fernanda Feirreira selon lequel lorsqu'un but est associé à la compréhension, un traitement en profondeur est nécessaire alors qu'un traitement automatique de la parole ne suffit pas pour une compréhension efficace. Ainsi, ce type de situations implique un traitement en profondeur semble engager des ressources exécutives.

4.7 Perspective : Adaptation de la tâche en sEEG

Pour aller plus loin, nous avons adapté cette tâche en sEEG et l'avons proposé à un patient implanté dans les régions périsylviennes gauches (voir plus loin pour la méthode de sEEG). L'objectif de cette adaptation en sEEG est d'évaluer la dynamique des réseaux cérébraux à l'œuvre lors de la compréhension de phrases en lien avec leur complexité. En comparant l'activité de haute fréquence dans différentes régions clefs nous avons obtenus quelques résultats préliminaires encourageant.

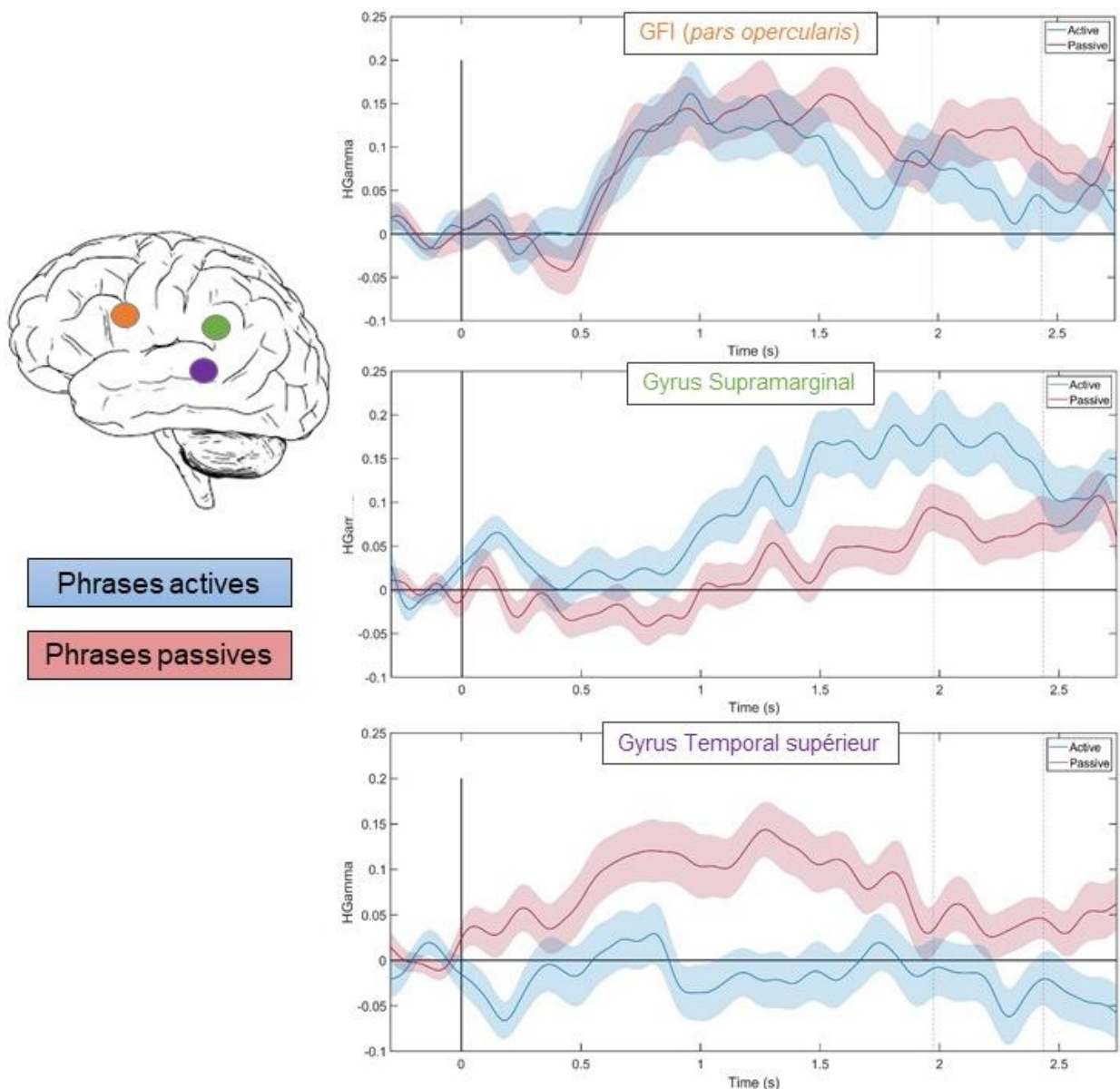


Figure 4.4.6 : Résultats préliminaires chez un patient pour la tâche de vérification d'images
Pour chacun de trois sites corticaux, les graphiques montrent les modulations d'activité en haute fréquence [50-150Hz] moyenne sur l'ensemble des essais (\pm erreur type) dans deux conditions : phrases actives (en bleu) et phrases passives (en rouge). L'amplitude est exprimée en proportion d'amplitude moyenne mesurée pendant toute la session d'enregistrement

Les résultats préliminaires semblent mettre en évidence un pattern d'activité intéressant selon la structure des phrases au niveau du gyrus supramarginal avec une activité de haute fréquence plus importante pendant les phrases actives que pendant les phrases passives. Ce pattern d'activité semble inversé par rapport à ce qui a pu être observé dans la littérature par Bahlmann et al. (2007) et Dapretto & Bookheimer (1999). En effet, dans ces études, les auteurs ont observé une augmentation de l'activité dans cette région lors du traitement de phrases syntaxiquement complexes comparativement à lors du traitement de phrases plus simples. Les auteurs interprétaient cette augmentation d'activité pour les phrases syntaxiquement complexes comme le reflet de la ré-analyses de ces phrases complexes. Le pattern que nous observons ne supporte pas une telle interprétation et nécessiterait d'être davantage investigué. Au niveau du gyrus temporal supérieur, nous observons cette fois une activité haute fréquence plus importante lors des phrases passives que lors des phrases actives. Il est possible que ce pattern reflète une augmentation de l'attention portée sur les phrases passives car plus complexes comme suggéré par Ray et al. (2008). Pour ce qui est de l'activité observée au niveau du *pars opercularis*, aucune différence ne semble apparaitre entre les conditions. Cependant, nous observons que l'activité dans cette région semble étroitement liée au traitement au cours de la phrase avec une augmentation de l'activité pendant la phrase puis une diminution une fois la phrase terminée. Cette activité pourrait refléter le traitement phonologique engagé pendant les phrases comme suggéré par Hagoort (2005, 2016 voir également (Xiang et al., 2010). Ces résultats restent préliminaires et nécessiteront d'être approfondis.

5

Chapitre 5 : Evaluation des mécanismes cérébraux de la compréhension du langage et du contrôle cognitif

Dans ce chapitre, tel que réalisé dans le chapitre précédent, nous souhaitons d'une part évaluer l'implication des informations sémantiques et syntaxiques lors de la compréhension et d'autre part évaluer l'implication des processus de contrôle cognitif, mais cette fois avec une approche d'électrophysiologie. Ainsi, nous nous intéressons aux réseaux cérébraux impliqués lors de la compréhension du langage ainsi qu'aux liens avec le contrôle cognitif. Dans une première étude (Etude 5), nous nous focaliserons sur le traitement de l'information sémantique et syntaxique de phrases en modalité auditive dans un protocole expérimental orthogonal classiquement utilisé en IRMf. Nous proposons d'évaluer une dissociation du traitement de ces deux types d'informations non seulement en termes spatial mais également en termes spectral. De même, dans une deuxième étude (Etude 6), nous avons cherché à évaluer cette dissociation avec d'autres types de stimuli auditifs (langue native vs langue non-native) et nous sommes centrés sur une région clef de certains modèles neurocognitifs de la compréhension : le gyrus frontal inférieur gauche. Enfin, nous présenterons une étude en cours dans laquelle nous évaluons le lien entre les mécanismes de contrôle attentionnel et l'écoute de phrases en nous centrant sur les modulations induites par

les processus de contrôle attentionnel dans un réseau spécialisé dans le traitement de la parole (Etude 7).

Aparté : Procédures expérimentale en sEEG

Les études présentées ci-après ont été réalisées avec la collaboration de patients présentant une épilepsie pharmaco-résistante au Centre Hospitalier Universitaire Grenoble Alpes (CHUGA) dans le service d'épilepsie dirigé par le Pr Philippe Kahane et Lorella Minotti. Ces patients sont implantés avec 8 à 18 électrodes profondes situées dans des structures cérébrales strictement liées aux hypothèses cliniques et indépendantes de nos études. Les études de recherches se déroulaient pendant la période d'évaluation pré-chirurgicale des patients durant laquelle leur activité cérébrale est monitorée en continue. Cette évaluation pré-chirurgicale invasive permet de localiser la zone épileptogène (ZE) dans le but de réaliser une ablation de cette ZE sans risque de résection en zone fonctionnelle. C'est pour cette raison qu'un mapping fonctionnel est également réalisée chez ces patients. Les études de recherche ne prenaient pas part à cette évaluation et étaient réalisées suite au consentement des patients.

1. Etude 5 : Traitement de l'information sémantique et syntaxique pendant la compréhension du langage oral : une approche spectrale en EEG intracrânien

L'objectif de cette étude était d'évaluer une possible distinction fonctionnelle en lien avec le traitement de l'information sémantique et syntaxique lors de la compréhension du langage oral au sein du réseau canonique du langage. Pour cela, nous avons collaboré avec 11 patients implantés avec des électrodes profondes lors d'une exploration pré-chirurgicale d'une épilepsie pharmaco-résistante. Nous avons proposé un protocole expérimental avec des stimuli auditifs divisés en quatre conditions orthogonales : des phrases, des jabberwockys, des listes de mots, et des listes de pseudo-mots. Ces conditions permettaient ainsi par comparaison deux à deux d'extraire un effet à prédominance sémantique ou à prédominance syntaxique. Etant donné la forte variabilité inter-individuelle des régions implantées nous avons adopté une approche en régions d'intérêt. Nous avons ainsi sélectionné des régions fronto-temporo-pariétales du réseau canonique du langage. Nous avons privilégié une approche spectrale dans nos analyses nous avons pour cela évalué les effets linguistiques dans quatre bandes de fréquences (alpha, beta, low-gamma et high-gamma). Nous faisons l'hypothèse que le manque de consensus dans la littérature concernant la sélectivité neurale en lien avec le traitement des informations sémantiques et syntaxiques pouvait être dû à une absence de caractérisation des traitements en termes d'activité spectral.

Cette étude est un article en préparation reformaté pour les besoins de ce manuscrit. Source : El Bouzaïdi Tiali, S., Vidal, J.R., Cousin, E., Kahane, P., Minotti, L., Lachaux, J-P., & Perrone-Bertolotti, M. Semantic and syntactic information processing during auditory language comprehension: A spectral stereo-EEG approach. (in prep)

Le matériel expérimental de cette étude est disponible sur la plateforme Open Science Framework (OSF). Source : https://osf.io/vmwah/?view_only=1cd4fc1b8a5744eb80f3f45895f6caa1

Semantic and syntactic information processing during auditory language comprehension: A spectral stereo-EEG approach

Abstract

No clear consensus has been observed in terms of brain functional dissociation of semantic and syntactic information processing. Recent studies proposed a functional dissociation at the spectral level in which semantic and syntactic processing were associated with different frequency activity. This study aimed at investigating such a functional dissociation in terms of spectral responses using auditory language-like stimuli. For this purpose, we collaborated with 11 patients with drug-resistant epilepsy and with deep electrode implantation. Patients were instructed to listen to four different types of auditory stimuli (in which semantic and syntactic information were manipulated): sentences, jabberwockys, word lists, and pseudoword lists. Results showed no clear dissociation between semantic and syntactic processing in the left language canonical network. In the temporo-parietal regions two different subnetworks have been observed in terms of specific spectral activity. Semantic information seems to be supported by high frequency activity in the temporal pole, while syntactic information processing seemed to be supported by low frequency activity in the middle temporal as well as the supramarginal gyri. Interestingly, a specific spectral functional dissociation in the pars triangularis was observed suggesting that a single region could support different functional processes reflected by distinct frequency activities. This result needs replication but provided evidence of the spectral functional processing of language mechanisms.

1.1 Introduction

During speech comprehension, various linguistic processes are hierarchically and incrementally recruited. Specifically, after the initial acoustic-phonological processing (speech perception), the analysis of structural relationship between words, required for sentence comprehension, is performed. A distinction between the syntactic structure (grammatical identity and word order in the phrase) and the semantic information (meaning) can be made. To fully understand a sentence, these two pieces of information must be used and integrated. Different hypotheses have been proposed regarding how semantic and syntactic information is processed during sentence comprehension (e.g., Fedorenko et al., 2010; Friederici, 2017; Hagoort, 2013). The most important discrepancies highlighted in the literature is related to the specific weight given to each of these type of information at the cognitive and neural levels. For instances, regarding brain representations some authors proposed neuroimaging evidence of a distinction between anatomo-functional processes involved in syntactic and semantic mechanisms, as well as in terms of spectral activity.

One of the first research to suggested a brain dissociation between these two types of information was the study of Depretto and Bookhaimer (1999). Using fMRI measures with a task presenting auditory sentences, they showed activity segregation in the left inferior frontal gyrus (IFG). More specifically, their results revealed that the *pars triangularis* presented a semantic processing selectivity while the *pars opercularis* was critically involved in syntactic processing. Similar results were observed by Friederici, Optiz and von Cramon (2000) using others semantic (abstract vs concrete word presentation) and syntactic (assessed with a grammatical categorization including nouns vs function words) tasks at the level of the left IFG. They also showed a functional activity differentiation between semantic and syntactic information processing in the temporal regions with the posterior middle and superior temporal gyrus more involved during semantic than during syntactic task. More recently, also using fMRI measures, Schell and collaborators (2017) presented to participants oral two-word phrases (e.g., “bleu boat”) containing more semantic (adjective-noun phrases, “bleu boat”) or more syntactic (determiner-noun phrases, “this boat”) information. Interestingly, the authors showed an IFG activity dissociation in terms of ventral and dorsal representation with higher activity during semantic processing in the dorsal part of the anterior IFG while left ventral-posterior parts of the IFG was more

involved for syntactic processing. Thus, authors observed a double dissociation between the two information types and their activated regions within the IFG

Nevertheless, some authors did not observe such dissociation in brain activation during syntactic and semantic processing (Fedorenko et al., 2010; Siegelman et al., 2019). For instance, using an experimental paradigm allowing the assessment of semantic and syntactic information processing in fMRI, Fedorenko et al. (2010) showed that each of the canonical language regions was similarly sensitive to semantic and syntactic information processing (also see, Humphries et al., 2006). In this experiment authors proposed the manipulation of the absence / presence of semantic and syntactic information in an orthogonal experimental design allowing a more ecological way to evaluate information processing dissociation (see Mazoyer et al., 1993 for the first proposition of such experimental protocol). This was possible by presenting Jabberwocky stimuli (from Lewis Carroll) that are sentences from which all content words are replaced by pseudo-words while closed-class words are kept. This way, Jabberwocky stimuli allow to evaluate syntactic structure processing without semantic information. (semantic-/syntax+). In such a type of experimental design 2X2 crossing conditions are proposed: presence/absence of semantic information (present in the Sentence and in a Word-list conditions, absent in the Jabberwocky and in the Pseudo-words-list conditions) with the presence/absence of syntactic information (present in the Sentence and Jabberwocky conditions, absent in the Word-list and Pseudo-word-list conditions). More recently the same research team used this orthogonal experimental design with a multi-voxel pattern analysis and showed that “pure lexico-semantic” information (Word-list condition) was represented more robustly than “pure syntactic” information (assessed by Jabberwocky condition) across different brain regions of the language network, including IFG and posterior temporal cortices. The authors suggested that given the goal of the language systems (constructing and decoding meanings) it makes sense that semantic information was more “robustly” represented in the brain. These results go against the Serial Syntax-First model (e.g., Friederici, 2011) in which it is postulated that syntactic information is processed first and is necessary for further semantic processing (e.g., Frazier, 1987; Friederici, 2002, 2011). This implied that the syntactic information is crucial for language comprehension. Nevertheless, results proposed by Siegelman, Mineroff, Blank, & Fedorenko (2019) give a more important place to the semantic information in sentence

comprehension processing. Indeed, their results suggested that the lexico-semantic information is an important source of information that can guide sentences understanding, in line with a more Interactive model of semantic and syntactic information interaction (MacDonald et al., 1994) and a larger brain representation (see Binder et al., 2009).

Pallier et al. (2011), used fMRI with a similar experimental design as proposed in Fedorenko et al. (2010) study and observed a specific syntactic effect in the IFG and in the posterior part of the superior temporal gyrus. They also observed specific semantic processing brain activity in the anterior superior temporal gyrus, the temporal pole, and the temporo-parietal junction. To characterize semantic and syntactic processing, Fedorenko and collaborators (2016) asked patients with intracranial recordings from the surface of the brain (ECOG) to read and listen to the same type of stimuli with a word by word presentation (i.e., sentences, jabberwockys, word-lists, and pseudo-word-lists) and recorded high frequency activity (70–170 Hz). The authors observed a monotonic increase in brain activity in language regions through the stimuli only for sentences and no specific pattern for semantic only or syntactic only conditions. They interpreted this result as an evidence that both semantic and syntactic processing involve the same brain network. By comparing written sentences to unconnected phrases in a similar experimental design, Matchin et al. (2019) observed an effect of syntactic processing in the posterior temporal gyrus suggesting that this region is critical for syntactic processing. Authors also observed higher brain activity in the anterior and posterior temporal region as well as in the left IFG during sentences than during jabberwockys suggesting an involvement of these regions in semantic processing. Discrepancies are observed in the brain networks at work during language comprehension and the distinction of semantic and syntactic processing does not seem to appear only in terms of brain representation.

In terms of brain dynamic, Friederici and collaborators (1993) observed an early left anterior negativity (ELAN) around 180ms after a syntactic violation during an auditory language comprehension task and a classic left negativity around 400ms after a semantic violation (N400) (see also Neville et al., 1991). This observation of an ELAN supports the *Syntax-First* approach according to which language comprehension mechanisms start with syntactic processing. Nevertheless, other authors propose that both syntactic and semantic information are processed in parallel (Hagoort et al., 1993;

Hagoort & Brown, 1994). A study by Hinojosa et al. (2004) supported this hypothesis. Indeed, in their study, participants performed either a visual perception task or a semantic categorization task with single visual words while their brain activity was recorded with scalp-EEG. The authors observed similar electrophysiological patterns with an early recognition potential (around 225ms after the stimuli presentation) for both the perception and the semantic tasks suggesting that lexico-semantic mechanisms also appear early. In a similar study, Martin-Loeches et al. (2001) also observed an early recognition potential in a semantic categorization task suggesting an early access to word meaning and supporting the view of a parallel processing of syntactic and semantic mechanisms during language comprehension. Thus, evidence for both early syntactic and semantic processing during language comprehension have been proposed in the literature.

In this context an alternative hypothesis could be proposed regarding the spectral brain activity to explain semantic and syntactic information processes during sentence comprehension. This alternative proposition suggests a dissociation between semantic and syntactic processing could be reflected by distinct frequency band activities (M. Bastiaansen & Hagoort, 2006). Indeed, as some hemodynamic results in the literature suggest an absence of functional segregation between semantic and syntactic processing, Bastiaansen and Hagoort (2015) tested whether these processes could be segregated in the frequency domain. To test this hypothesis, the authors asked participants to read correct sentences, sentences without meaning but with a syntactic structure (like the jabberwockys sentences previously described), word lists (containing meaning but no syntax) or sentences with a semantic or syntactic violation while recording their brain activity through EEG. Interestingly, by comparing sentences with and without semantic information the authors observed a semantic effect in terms of high frequency activity (gamma-band, 40-60Hz); and by comparing sentences with and without syntactic violation they observed a syntactic effect in terms of low frequency activity (10-20Hz) (see also Bastiaansen et al., 2010; Hald et al., 2006; Weiss et al., 2005). Moreover, syntactic processing has also been linked to delta frequency activity (4Hz). Indeed, Ding and collaborators (2016) manipulated different types of phrasal structures in the native language of participants or in another language. They observed a delta-band entrainment only when participants listened to stimuli in their native language suggesting that delta-band activity supports syntactic

processing (see also, Ding et al., 2017). Using the same procedure with magnetoencephalography (MEG) and MRI measures, Sheng and collaborators (2019) observed a regional dissociation for stimuli varying in their structure (words, phrases, sentences). More specifically, the authors observed that phrases and sentences stimuli induced entrainment in the left anterior temporal lobe and in the left IFG, while all type of linguistic items induces an entrainment in the left superior temporal gyrus. This entrainment was also observed in high frequency activity (> 70Hz) in an experiment of Ding and collaborators (2016) using electrocorticography (ECoG) measures. Indeed, in this experiment, authors observed an entrainment of high-gamma activity on phrase and sentence stimuli. Similarly, using ECoG, Nelson et al., (2017) observed high-gamma activity modulations in relation to the syntactic structure being processed. Results in terms of frequency activity suggest that segregation in terms of stimuli hierarchy (linguistic units) and linguistic mechanisms could be observed in spectral brain activity. It is possible that different frequency bands are involved in different speech processes at the same time.

The aim of the present study was to investigate the possible dissociation of syntactic and semantic mechanisms not only in terms of brain region segregation and specialization but also in terms of brain spectral activity. We collaborated with epileptic patients recorded with intracranial electrodes for therapeutic purposes, and measured high-frequency four different frequency band in line with high-gamma (50-150Hz), low-gamma (30-50 Hz), alpha-band (16-24Hz) and beta-band (8-12Hz). We used the orthogonal experimental design proposed by several studies (e.g., Friederici et al., 2000; Mazoyer et al., 1993; Pallier et al., 2011) involving processing of sentences, jabberwockys, word-lists and pseudo-word-lists during auditory stimulation and allowing to dissociate semantic and syntactic processing.

1.2 Method

1.2.1 Participants

Eleven patients with drug-resistant epilepsy participated in this study (1 woman and 10 men, mean age = 36.9; SD = 11.5) during their pre-surgical evaluation with stereotactic electroencephalography (sEEG) recording at the Grenoble-Alpes University Hospital. All patients gave written informed consent to participate in the present study. The study

was approved by the National Ethics Advisory Committee (CPP MAPCOG: N° Id RCB: 2017-A03248-45, local CHUGA number: 38RC17.357).

Table 5.1.1: Demographic and clinical information of patients included in the study

P	A iEEG	G	H	EZ LAT	EZ LOC	NCS
1	54	M	R	L	PARIETAL	17
2	28	M	R	L	TEMP	22
3	26	M	R	L	TEMP	49
4	44	F	R	L	TEMP	31
5	37	M	R	L	FRONTAL	9
6	25	M	R	L	TEMP	31
7	21	M	R	R	OCCIPITAL	3
8	31	M	R	L	MULT	24
9	46	M	L	L	TEMP	20
10	53	M	R	R	TEMP	21
11	41	M	R	L	INSULA	18

Abbreviation P: patient; AiEEG: age at the iEEG acquisition; G: Gender; H: handedness; EZ LAT: epileptic zone lateralization; EZ LOC: epileptic zone location; TEMP: temporal lobe; MULT: multilobe; NCS: number of cortical sites included.

1.2.2 Electrode implantation and positioning

Eleven to 15 semi-rigid, multilead electrodes were stereotactically implanted in each patient. Each electrode had a diameter of 0.8 mm and, depending on the target structure, consisted of 8–18 contact leads 2 mm wide and 1.5 mm apart (DIXI Medical, Besançon, France). Electrode implantation were strictly related to individual clinical hypothesis. A preoperative MRI and post-operative MRI or CT scan were co-registered to assess the locations of the electrode contacts for each patient using a coordinate system in relation to the anterior commissure / posterior commissure plane. Electrode contact positions were finally expressed in the Montreal Neurological Institute (MNI) coordinate system to allow group analyses after brain spatial normalization using Statistical Parametric Mapping 12 software (SPM12, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, University College London, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm). Visual inspection of the contact locations was also used to check whether each electrode contact was located in grey or white matter. Seven patients were implanted only in the

left hemisphere and 4 had a bilateral implantation. For this study we only included cortical sites recorded in the left hemisphere.

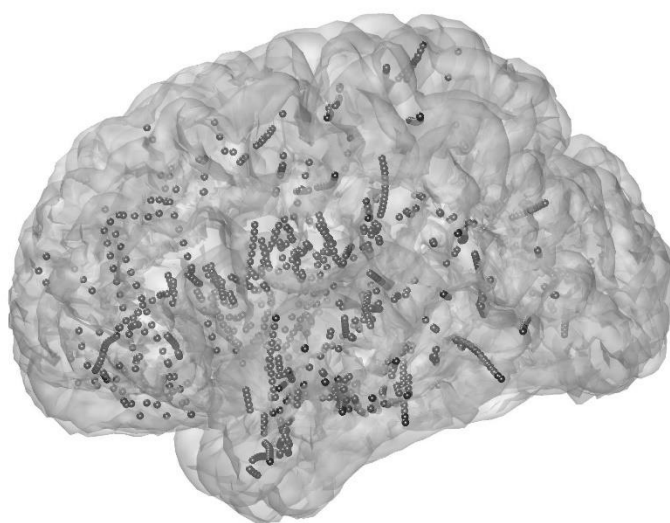


Figure 5.5.1: Anatomical coverage for the P1-P11 in the left hemisphere. A total of 1182 cortical sites were included

1.2.3 SEEG recordings

SEEG recordings were performed using a video-EEG monitoring system (Micromed, Treviso, Italy) that allowed to simultaneously record up to 256 monopolar contacts, so that a large range of mesial and cortical areas, as well as fissural cortices, was sampled for each patient. Sampling rate was 1024 Hz, with an acquisition band-pass filter between 0.1 and 200 Hz. Data were acquired using a referential montage with reference electrode chosen in the white matter. All other recording sites were chosen in the grey matter. For data analysis, we used a bipolar montage between adjacent contacts of the same electrode to improve sensitivity to local current generators. Coordinates of virtual bipolar contacts that were used to construct images (see Figure 5.5.1 above) were chosen to be at an equal distance of two successive contacts.

1.2.4 Language comprehension task and stimuli

The task used in the present study was adapted from Pallier et al. (2011) (see Figure 5.5.2). Stimuli were 240 auditory streams including 80 sentences (i.e., with semantic and syntactic information), 80 jabberworckys (i.e., with syntactic information and

without semantic information), 40 words lists (i.e., with semantic information and without syntactic information) and 40 list of pseudowords (i.e., without semantic and without syntactic information). All stimuli were controlled in terms of amplitude. The 80 sentences were taken from the study by Pallier, Devauchelle, and Dehaene (2011). From these 80 sentences, we generated the 80 jabberwockys by modifying the content words of the sentences with pseudowords while keeping a similar phonology for each last syllable. We then generated 40 sequences of words and 40 sequences of pseudowords by randomly selecting words and pseudowords from the sentences and jabberwockys. In addition, for each sentence, a comprehension question was created that induced a "yes/no" response.

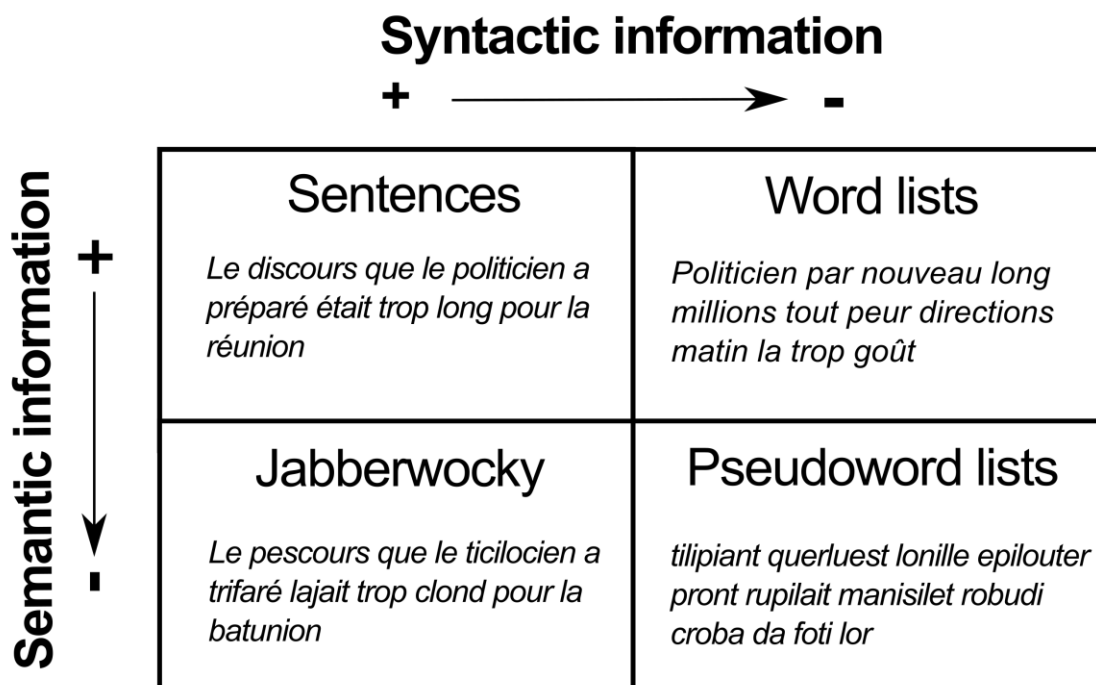


Figure 5.5.2: Trial examples for each of the four experimental conditions according to the semantic and syntactic information manipulation (Sentences, Word lists, jabberwocky and pseudoword lists). Items in the present study was adapted from Pallier et al. (2011)

During the language comprehension task patients were instructed to carefully listen to the auditory stimuli and to answer the question presented at the end of some trials. Typical trial started with a fixation cross during 500ms, followed by an auditory stimulus (a sentence, a jabberwocky, a list of words or a list of pseudowords), and then a grey background (interstimulus interval) for 1500ms. On 25% of sentence trials, following

the auditory stimulus, a written verification question was presented on the screen, in order to evaluate if the patients were performing the task correctly. Participants were instructed to give yes or no responses to the comprehension questions using two buttons. The question remained on the screen until the patient responded and was followed by a 500ms inter-stimulus interval. A total of 240 trials were randomly presented and a pause was proposed every 50 trials.

1.2.5 Preprocessing sEEG signal

All preprocesses and data analyses were performed using FieldTrip toolbox (Oostenveld et al., 2011) and custom scripts on Matlab (version 9.7.0, Matlab®, R2019b). Raw data were transformed into four time-series corresponding to alpha, beta, low-Gamma and high-Gamma frequency band amplitudes with the following procedure (Ossandon et al., 2011; Perrone-Bertolotti et al., 2012): Step 1: continuous sEEG signals were first bandpass-filtered in successive 2, 4 or 10 Hz wide frequency bands from 8Hz to 12Hz, 16Hz to 24Hz, 30Hz to 50Hz or 50Hz to 150Hz (for alpha, beta, low-gamma and high-gamma frequency bands respectively) using a zero-phase forward and reverse filter. Step 2: for each bandpass-filtered signal we computed the envelope using standard Hilbert transform (Le Van Quyen et al., 2001). Step 3: for each band this envelope signal was divided by its means across the entire recording session and multiplied by 100. This procedure yields instantaneous envelope values expressed in percentage (%) of the mean. Step 4: the envelope signals for each consecutive frequency bands were averaged together to provide one single time series (alpha activity, beta activity, low-gamma activity or high-gamma activity) across the entire session. Step 5: The obtained envelopes were epoched into data segments centered around each stimulus and baseline corrected (the baseline corresponded to the 450ms preceding the beginning of audio presentation).

1.2.6 Regions of interest (ROI)

We computed 14 regions of interest (ROI) allowing to reduce between patient implantation variability. ROIs were defined using Harvard-Oxford atlas (Desikan et al., 2006). The included ROI were: the anterior superior temporal gyrus (Ant STG), the superior posterior temporal gyrus (Post STG), the anterior middle temporal gyrus (Ant MTG), the posterior middle temporal gyrus (Post MTG), the supramarginal gyrus (SMG), the temporal pole, the *pars opercularis* (IFG Oper), the *pars triangularis* (IFG

Tri), and *the pars orbitalis* (IFG Orbi). The spatial distribution and the number of cortical sites included in each ROI in relation with the number of patients are shown in Figure 5.5.3. See below for the specific computation performed in order to avoid over representation of the activity of one patient who would have more contacts in an ROI.

REGIONS OF INTEREST (ROIs)

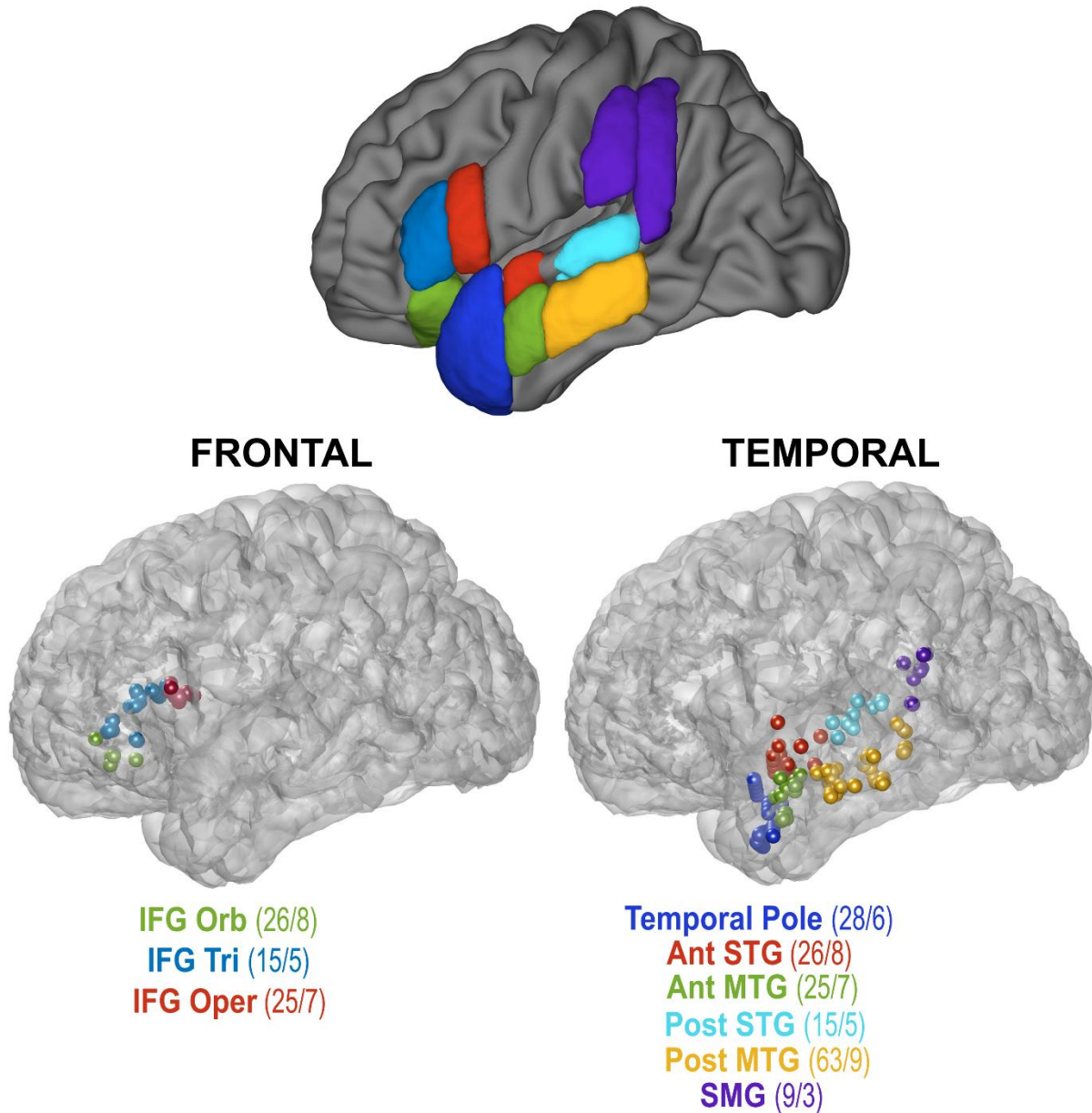


Figure 5.5.3: Spatial distribution of each of the region of interest including: the specific number of cortical sites / the number of patients

1.2.7 Amplitude Analysis

First, we checked whether all patients performed correctly the task. Average percentage of correct answer to verification questions were well above chance level ($M = 83.2\%$, $SD = 15.1\%$) meaning that patients performed the task correctly. For each trial and in each frequency band, we computed the mean amplitude during the auditory stimuli from 1000ms to 2000ms after the beginning of the presentation. We selected this time windows in order to avoid perception effect at the beginning of the audio stimuli and to be sure we had activity during stimuli processing. Mean amplitude was then Z-Scored for each channel using the baseline as reference. Z-scores allowed us to average single trials of each channels that were in the same ROI for each patient. This procedure was performed in order to avoid over representation of the activity of one patient who would have more contacts in an ROI. This step was necessary to be able to perform group analysis because patients presented an important variability not only in terms of implantation anatomical coverage but also in terms of number of channel per ROI. Consequently, we were able to obtain trial Z-score means over the channel for each patient in one ROI. If one patient presented more than one channel in a specific ROI an average of patient's channels was also computed.

We compared each language (sentences, jabberwockys, word-lists and pseudoword-lists) condition against the baseline condition using a t -test. Finally, we evaluated Semantic effects by comparing semantic (i.e., sentences and word-lists) to non-semantic conditions to (i.e., jabberwockys and pseudoword-lists) and Syntactic effects by comparing syntactic conditions (i.e., sentences and jabberwockys) to non-syntactic ones (i.e., word and pseudoword lists) using t -tests. The p value was corrected for multiple comparisons using Bonferroni procedure: as we had nine ROIs we divided the critical p value by nine obtaining $p = 0.0056$.

1.3 Results

1.3.1 Semantic effects

In the IFG we observed a positive amplitude in almost all of the three ROI in terms of comparison to the baseline for each condition and each of the four-frequency bands evaluated. This could suggest a significant activity in the IFG for all of the language conditions. An absence of such difference between conditions and the baseline was observed specifically in the *IFG Tri* for the beta frequency band as well as in the *IFG*

Oper for the low-gamma band. A difference between semantics and non-semantic conditions in the *pars triangularis* ROI in terms of low-gamma activity was observed as marginally significant with Bonferroni correction ($t = 2, p = 0.046$). This could suggest higher activity during semantic than during non-semantic stimuli processing (Figure 5.5.4).

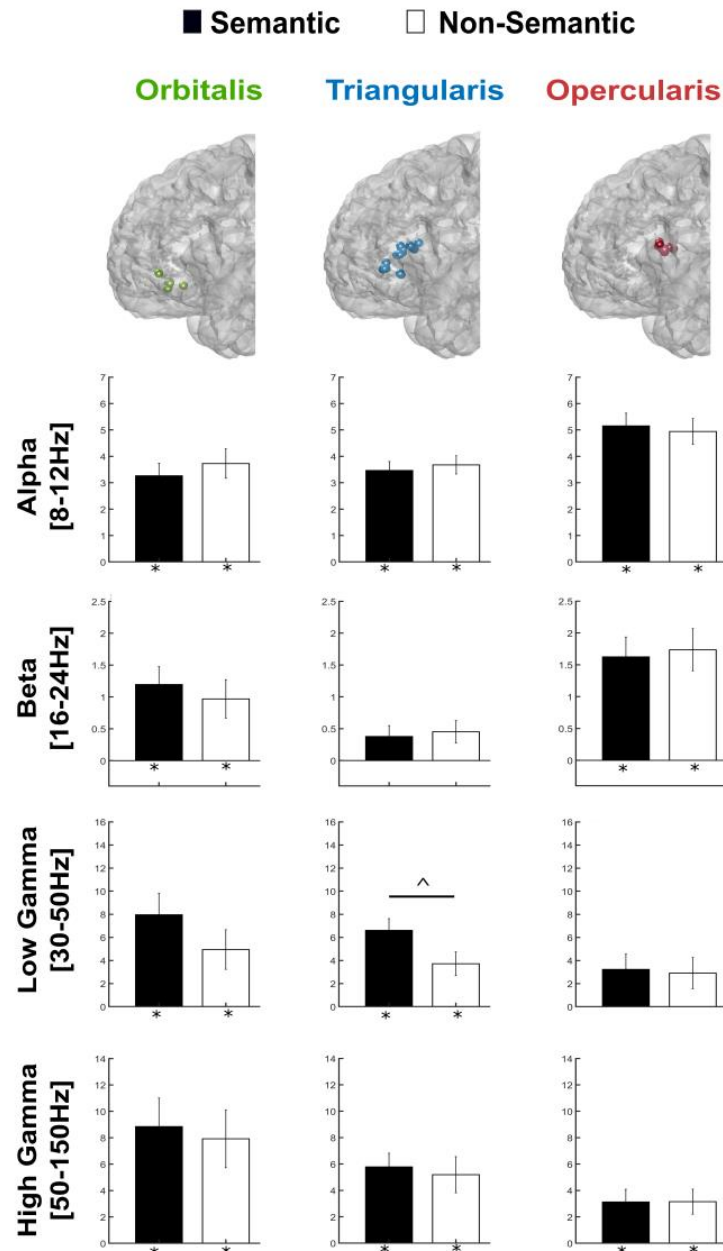


Figure 5.5.4: Semantic effect in each of the IFG ROI for each of the frequency band evaluated

Error bars represent the Standard Error of the Mean (SEM)

*^ depicts marginally significant differences; * depicts significant differences between the condition and the baseline*

At the level of the temporo-parietal ROIs and in terms of amplitude difference against the baseline we observed two different activity patterns. Indeed, the temporal pole, the post MTG, ant MTG, and the SMG presented a similar pattern of activity in the four-frequency band. This pattern was characterized by a positive amplitude for both semantic and non-semantic condition. The ant STG and the post STG showed a similar and specific pattern that was characterized by negative amplitude in the low frequency band including alpha and beta band while a positive amplitude was observed in high frequency band including low- and high-gamma band. This similar specific patterns in the STG could suggest a single functional unit in this anatomical region.

A semantic effect in the temporal pole for both low-gamma ($t = 2.21$, $p = 0.027$) and high-gamma ($t = 2.54$, $p = 0.011$) activity was observed as a marginally significant after the Bonferroni correction. This effect was characterized by a higher activity during semantic than during non-semantic stimuli processing (Figure 5.5.5). In a descriptive way, we observed that in this region the low-gamma band presented an interesting pattern showing an amplitude response increase for the stimuli that contained the most linguistic information (i.e., sentences > jabbercockys > word lists > pseudowords lists) (see Supplementary Figure 5.5.S1). The inverse pattern was observed in the post STG in which we observed a marginally significant effect in the high-gamma band after the Bonferroni correction ($t = -2.43$, $p = 0.015$) showing a larger amplitude response for non-semantic items (i.e., jabberwockys and pseudoword lists) than for semantic ones. In a descriptive manner, we also observed that this region showed a lower amplitude for stimuli that contained the most linguistic information specifically in the high-gamma band with the following specific pattern: sentences < jabberwockys < word-lists < pseudo-word lists, see Supplementary Figure 5.5.S1).

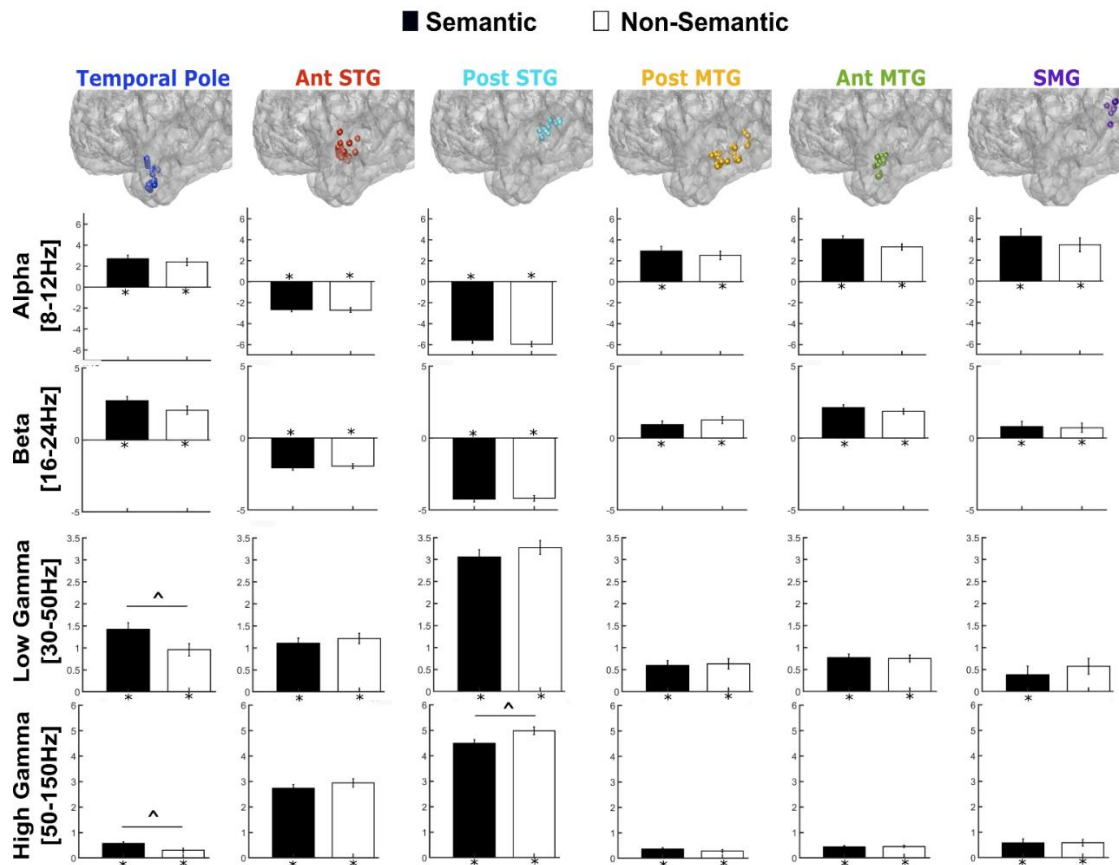


Figure 5.5.5: Semantic effect in each of the temporo-parietal ROI for each of the frequency band explored

Error bars represent the Standard Error of the Mean (SEM)

*^ depicts marginally significant differences; * depicts significant differences between the condition and the baseline*

1.3.2 Syntactic effect

The IFG showed a positive amplitude response in almost all of the three ROIs in terms of comparison to the baseline for each of the four-frequency bands assessed. This could suggest a significant activity in the IFG for all of the language conditions. An absence of such difference between condition and the baseline was only observed for the non-syntactic condition (i.e., word and pseudoword lists) in the IFG Tri for the beta band and in the IFG Oper in the low-gamma band. In line with this absence of difference in these two regions, a pattern of syntactic-like effect was observed. Indeed, in these two cases only the syntactic condition (i.e., sentences and jabberwockys) presented a significant difference compared to the baseline (Figure 5.5.6). Nevertheless, this pattern is not observed when we compared both syntactic and non-syntactic conditions. A marginal uncorrected effect of syntax was observed in the IFG

Oper in the beta frequency band ($t = 1.9, p = 0.058$) with a higher beta activity for syntactic than for non-syntactic items (Figure 5.5.6).

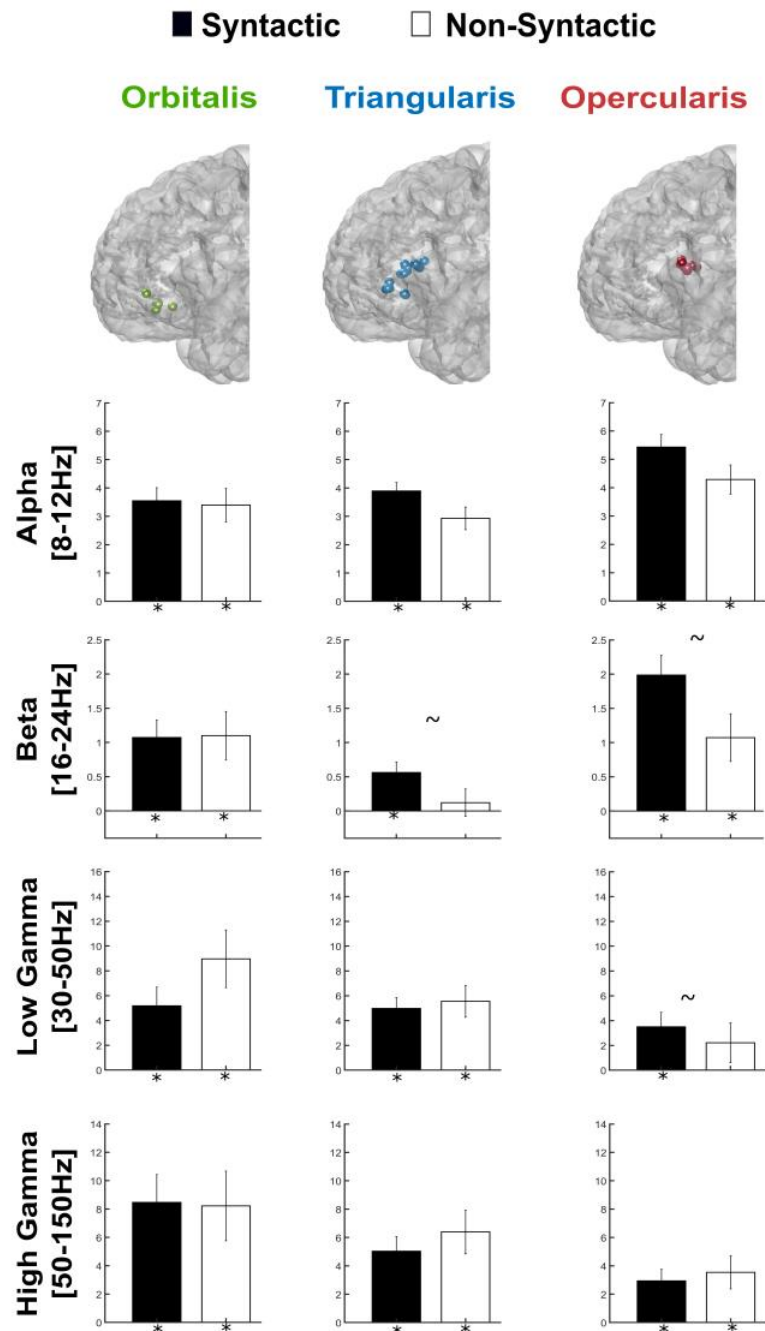


Figure 5.5.6: Syntactic effect in each of the IFG ROI for each of the frequency band explored

Error bars represent the Standard Error of the Mean (SEM)

*~ depicts patterns in line with the effect of interest; * depicts significant differences between the condition and the baseline*

At the level of the temporo-parietal ROIs and in terms of amplitude difference against the baseline, as for semantic effect, we observed two different amplitude patterns. The

first pattern included: the temporal pole, the post MTG, ant MTG and the SMG for which we observed a positive activity in the four-frequency bands. This pattern was characterized by a positive amplitude response for both syntactic and non-syntactic conditions. The second pattern includes: the ant STG and the post STG for which we observed a negative amplitude response in the low frequency band (i.e., in alpha and beta bands) while a positive amplitude response was observed in high frequency bands including (low- and high-gamma bands). In the post STG, in terms of high-gamma activity, we observed a significant effect of syntactic information ($t = -3.05$, $p < .0056$) highlighting a higher activity for the non-syntactic condition compared to the syntactic one (Figure 5.5.7). Results also revealed a significant syntactic effect in the post MTG for both beta ($t = 2.95$, $p < .0056$) and low-gamma band ($t = 2.81$, $p < .0056$) activity with a larger amplitude response during syntactic item processing (i.e., sentences and jabberwockys) than during non-syntactic ones (i.e., word and pseudoword lists) (Figure 5.5.7). In the ant MTG, analyses revealed a marginally significant syntactic effect in the beta frequency band ($t = 2.15$, $p = 0.032$). This effect suggested a higher beta activity during syntactic stimuli processing than during non-syntactic ones. In the SMG, analyses revealed a significant syntactic effect in both beta ($t = 2.97$, $p < .0056$) and low-gamma bands ($t = 2.93$, $p < .0056$) showing a higher activity during syntactic than during non-syntactic item processing. Interestingly, beta and low-gamma activity was not different from the baseline during non-syntactic stimuli ($t = -0.71$, $p = 0.48$, and $t = -0.15$, $p = 0.88$, respectively) but was during syntactic ones ($t = 3.53$, $p < .0056$, and $t = 3.89$, $p < .0056$, respectively) (Figure 5.5.7).

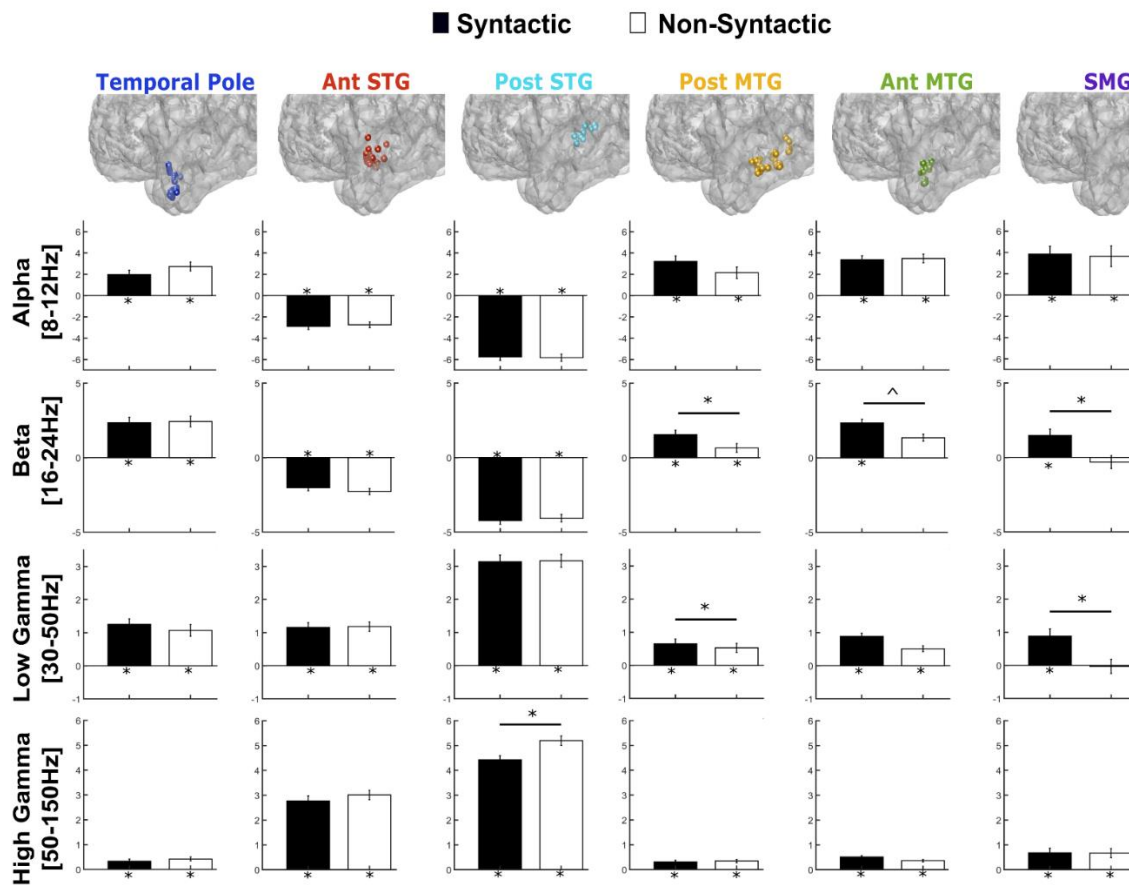


Figure 5.5.7: Syntactic effect in each of the temporo-parietal ROI for each of the frequency band explored

Error bars represent the Standard Error of the Mean (SEM)

*^ depicts marginally significant differences; * depicts significant differences between the condition and the baseline*

1.4 Discussion

This study aimed at evaluating the brain segregation of semantic and syntactic mechanisms during language comprehension on a spatial and frequency level. To do so, we used a well-known experimental paradigm that involves processing normal sentences, jaberwockys, word lists, and pseudoword lists, using continue auditory stimuli.

First, it is important to highlight that the majority of the regions explored in the canonical language network in the present study (including here frontal and temporo-parietal regions) presented a similar pattern of activation. Indeed, the more representative pattern in all of the regions and in terms of frequency band assessed showed a similar implication for semantic and syntactic information as recently suggested by Siegelman et al., (2019) using fMRI measures.

Furthermore, when we look specifically at the frontal and tempo-parietal regions we observe a similar pattern of implication of these regions in terms of spectral activity regardless of the linguistic effect. Indeed, frontal regions presented in all of the frequency band an amplitude increase for both semantic and syntactic processing. We only showed a tendencial pattern of specific functional dissociation in the inferior frontal gyrus (IFG) for the *pars traingularis* that seems to be dependent of the frequency band. In fact, we showed a preferential semantic information processing in the low-gamma band while a preferential syntactic information processing in the beta band. Importantly and even if this result need to be replicated (because only marginal effects were observed here), this observation suggests that one region can support dissociated processes at the spectral level. Several studies have linked the *pars triangularis* to semantic processing (e.g., Liuzzi et al., 2017; Zaccarella et al., 2017). Our results suggest that both semantic and syntactic processes can occur in the same region and at the same time but in different frequency bands. Such dissociation of linguistic processing at the spectral level has already been observed in EEG and MEG studies (e.g., Bastiaansen et al., 2010; Bastiaansen & Hagoort, 2015; Hald et al., 2006).

In line with the temporo-parietal regions assessed we showed that these regions presented in both semantic and syntactic information two different patterns in terms of spectral activity. Specifically, we showed that the superior temporal gyrus -STG- (in both the anterior and the posterior subregions) presented a specific pattern highlighted by an amplitude decrease in the lower frequencies and an amplitude increase in the higher frequency bands. Conversely, the others temporo-parietal regions (temporal pole, anterior and posterior middle temporal gyrus -MTG- and the supramarginal gyrus -SMG) presented a similar amplitude increase in all of the frequency bands. This could suggest two different functional subnetworks in terms of spectral properties. This is relatively supported by the effect observed in high frequency activity in the STG and specifically in the posterior STG. Interestingly, the effect observed in the posterior STG in terms of high-gamma activity highlights that this region is more involved when less linguistic information was provided regardless of the assessed effect (semantic of syntactic, see Supplementary Figure 5.5.S1). This could be related with results proposed by Brown et al. (2012) that showed a similar effect comparing forward and reverse speech in an ECoG study with a larger high-gamma amplitude in the posterior STG for reverse speech than for forward speech. These effects might be explained by

the increase in attentional demands when less linguistic information is available. In fact, it has been suggested that high-gamma activity in the STG increased with selective attention for auditory stimuli (Ray et al., 2008; see also Perrone-Bertolotti et al., 2012). Hence, it is possible in our task that patients' auditory attention increased when less linguistic information was available in order better detect possible apparition of such linguistic information.

The temporal pole seems to present a more important activity for semantic information in high frequency bands (including low- and high-gamma bands). Indeed, a marginal semantic effect was observed with a more important activity on the high frequency bands for the semantic than for non-semantic conditions. This in line with the role of the anterior temporal lobe described in the literature. Indeed, the temporal pole has been shown to play a role in semantic processing and language comprehension in neuroimaging (Noppeney & Price, 2002; Pallier et al., 2011; Vandenberghe et al., 2002), MEG (Matar et al., 2021) and neuropsychological (Patterson et al., 2007; Tsapkini et al., 2011) studies.

Conversely, a syntactic effect was observed specifically in the SMG and in the posterior MTG only in beta and low-gamma bands. The SMG syntactic effect is observed in previous fMRI studies (Bahlmann et al., 2007; Dapretto & Bookheimer, 1999) in which an increased activation was observed in this region for syntactically complex sentences compared to syntactically simpler ones. It is important to note that the effect observed in our study is induced not only by the increased activity during the syntactic information processing but also by the absence of the activity during the non-syntactic condition (absence of difference of non-syntactic condition against the baseline) in these frequency bands suggest that this region is not engaged if non-syntactic information is presented.

The syntactic effects observed in the posterior MTG for the beta and low-gamma frequencies are in line with findings in the literature showing an involvement of this region during syntactic processing (Ben-Shachar et al., 2004; Bornkessel et al., 2005; Brown et al., 2012; Kinno et al., 2008; Matar et al., 2021; see L. Meyer & Friederici, 2016 for a review). More specifically, several authors suggested that the posterior MTG plays a hub role for hierarchical lexical-syntactic processing (Matchin & Hickok, 2020). In line with the syntactic effect observed in the beta frequency band, Bastiaanse et al.

(2010) also observed an increase in beta oscillations during correct sentence processing as compared to sentences containing a syntactic violation (see also Bastiaansen & Hagoort, 2015). Hence, the posterior MTG seems to play an important part in syntactic processing as reflected by beta and low-gamma frequency activity.

1.5 Conclusion

We showed that the majority of canonical language regions included in the present study exhibited a pattern of spectral activity suggesting an absence of semantic and syntactic segregation. Indeed, these regions showed in a general view similar activity for both semantic and syntactic auditory information. Nevertheless, interestingly, in the frontal regions a functional specificity was suggested in terms of spectral activity in the *pars triangularis* with a syntactic-like effect in terms of beta activity and a semantic-like effect in terms of low-gamma activity. This effect, which needs to be replicated, opens new perspectives in language processing. Finally, results showed a temporo-parietal dissociation in two different functional subnetworks. The first involved the superior temporal gyrus (in both anterior and posterior regions) that showed a specific pattern highlighted by an amplitude decrease in the lower frequencies and an amplitude increase in the higher frequency bands. The second one involved temporo-parietal regions that exhibited an increase in amplitude response in all of the frequency bands explored regardless of the semantic or syntactic information. The syntactic effect observed in the posterior middle temporal gyrus and in the supramarginal gyrus in terms of beta and low-gamma amplitude suggests an involvement of these regions during syntactic processing. Conversely the temporal pole seems to be a more important for semantic information processing in terms of low-gamma activity. Even if we need to replicated these results with larger sample, they show that the spectral activity is an essential component of language processing (and cognition in general) and allowed to define functional specificity in the canonical language network.

Supplementary Material

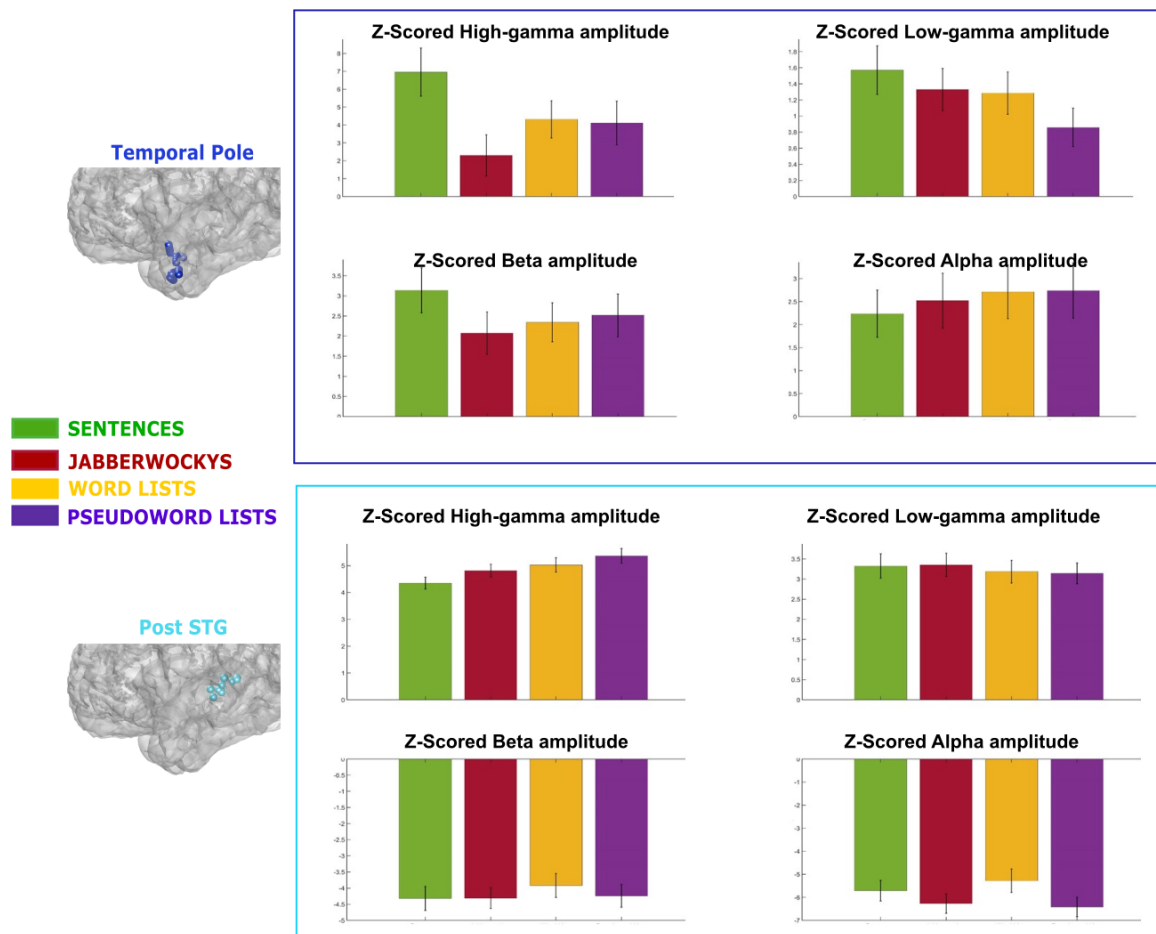


Figure 5.5.S1: Z-Score amplitude responses for each language condition and each frequency band assessed in the temporal pole and Post STG

En résumé

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés au traitement sémantique et syntaxique lors de la compréhension du langage oral en adaptant un protocole expérimental classiquement utilisé en IRMf. Nous faisons l'hypothèse d'une distinction de ces processus au niveau spatial mais également spectral. Afin de tester cette hypothèse, nous nous sommes focalisés sur différentes régions d'intérêt, incluant des régions fronto-temporo-pariétales du réseau canonique du langage. Nous avons ainsi cherché à caractériser le traitement de ces types d'informations en termes d'activité fréquentielle par l'analyse de quatre bandes de fréquences. D'un point de vue général, les résultats semblent indiquer une absence de dissociation fonctionnelle pour le traitement de l'information sémantiques et de l'information syntaxiques dans les régions évaluées et ce dans les différentes bandes de fréquences explorées. Des patterns d'activité spécifiques se sont distingués dans deux sous-réseaux. Le premier comprenait les portions antérieures et postérieures du gyrus temporal supérieur et présentait un pattern d'augmentation d'activité de haute fréquence (i.e., low- et high-gamma) et de désactivation dans les basses fréquences (i.e., alpha et beta). Le second impliquait des régions temporo-pariétales montrant une augmentation de l'activité dans l'ensemble des bandes de fréquences. L'observation d'un traitement davantage syntaxique au niveau du gyrus temporal moyen postérieur et du gyrus supramarginal corrobore les résultats qui ont pu être observés dans la littérature récente (en utilisant l'IRMf et la MEG). De la même manière, l'effet sémantique au niveau du pôle temporal semble cohérent avec les observations de la littérature montrant une implication de cette région dans le traitement sémantique. Enfin, nous avons observé un pattern de dissociation de traitement linguistique au sein d'une même région frontale (pars triangularis) au niveau spectral. En effet, un pattern suggérant un traitement syntaxique dans la bande de fréquence beta était observé tandis qu'un pattern de traitement sémantique était observé dans la bande de fréquence low-gamma. Ce résultat suggère qu'au sein d'une même région plusieurs traitements linguistiques pourraient avoir lieu en parallèle dans différentes bandes de fréquences.

Aparté : Limites de cette étude

Dans cette étude, nous avons été confrontés à plusieurs limites qui ont grandement modifié nos objectifs initiaux concernant l'évaluation des processus de compréhension du langage. En effet, nous avons pour objectif non seulement de réaliser des analyses spectrales mais également d'évaluer la dynamique cérébrale au cours du traitement des différents stimuli comportant ou non de l'information linguistique (imagerie spectral dynamique, Vidal et al., 2011). Notamment, nous avons des attentes en termes d'activité de hautes fréquences spatiales étant donné les précédentes études de la littérature et également en lien avec l'expertise notre équipe de recherche. De fait, nous nous attendions notamment à pouvoir mettre en évidence des patterns d'activité temporelle distinct en fonction du type de stimulus traité et de la région cérébrale évaluée. Afin de tester de telles hypothèses, nous avons donc comparé l'enveloppe de haute fréquence au niveau temporel. De manière surprenante, et pour l'ensemble des patients, il s'est avéré que seuls les contacts implantés dans les régions auditives primaires et secondaires montraient une activité supérieure à la baseline sans différence entre conditions (voir Figure A1 en Annexes). Cette observation a levé un certain nombre de questions. Tout d'abord, nous nous sommes demandés si cette absence d'activité de haute fréquence n'était pas une conséquence d'un manque d'engagement des participants dans la tâche. En effet, l'activité de haute fréquence est connue pour être modulée lorsqu'une certaine demande cognitive est présente ou qu'une demande attentionnelle forte est réalisée. Pour répondre à ce questionnement, nous avons modifié légèrement le protocole expérimental de cette étude en présentant un mot ou pseudo-mot visuellement après chaque stimulus auditif et avons demandé à chaque essai de cliquer sur un bouton selon si le mot ou pseudo était présent dans ce qui venait d'être écouté. Cette modification n'a induit aucun changement au niveau du signal de haute fréquence. Les patients semblaient donc engagés dans la tâche et distinguaient les différents stimuli, comme indiqué par leurs performances comportementales, mais cela ne se reflétait pas à travers l'activité de haute fréquence. Nous nous sommes alors demandés comment, au niveau cérébral, pourrait se distinguer le traitement des différents types de stimuli présentés. Nous nous sommes alors penchés sur les différentes bandes de fréquences et sur le regroupement en régions d'intérêt présentées dans cette étude. Toutefois, l'absence d'activité de haute fréquence continuant de nous interpeler, nous nous sommes demandés si cela ne provenait pas de la présentation aléatoire des stimuli, qui pourrait induire une trop forte variabilité de traitement. Nous avons alors testé sur un patient la réalisation de la même tâche en bloc (i.e., présentation des conditions séparément dans des blocs d'essais distincts) et avons évalué de nouveau l'activité de haute fréquence. Cependant, le pattern observé initialement est resté inchangé. Ainsi, nous supposons que la tâche ne requiert pas une implication suffisante pour engager une activité de haute fréquence ou que cette absence de réponse de haute fréquence soit une conséquence du traitement de phrases continues (plutôt que mot-à-mot).

2. Etude 6 : Spécification de l'activité oscillatoire du gyrus frontal inférieur gauche lors de la compréhension du langage

L'objectif de cette étude était d'évaluer les processus de traitement du langage au niveau spectral dans le gyrus frontal inférieur gauche. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux trois sous régions décrites dans la littérature : *pars orbitalis*, *pars triangularis*, et *pars opercularis*. Au niveau fréquentiel, nous nous sommes focalisés sur les bandes alpha (8-12Hz), beta (16-24Hz), low-gamma (30-50Hz), et high-gamma (50-150Hz). Afin d'évaluer les processus de compréhension du langage, nous avons demandé à des patients implantés présentant une épilepsie pharmaco-résistante d'écouter des phrases de leur langue (français) ou d'une langue étrangère non connue (suomi).

Cette étude est un article en préparation reformaté pour les besoins de ce manuscrit.
Source : El Bouzaïdi Tiali, S., Vidal, J.R., Minotti, L., Cousin, E., Lachaux, J-P., Kahane, P., & Perrone-Bertolotti, M. Spectral signatures of specific auditory language processing in the left inferior frontal cortex. (in prep)

Spectral signatures of specific auditory language processing in the left inferior frontal cortex

Abstract

The functional role in language processing of the classical Broca's area located in the inferior Frontal Gyrus (IFG), especially its involvement in semantic processing, remains highly ambiguous despite decades of investigation. Contradictory findings from previous hemodynamic studies on the sensitivity for language semantic information in either one of its three composing cortical sub-regions (pars opercularis, pars triangularis and pars orbitalis) remain unexplained. In this study we investigated specific spectral neural responses in these three IFG sub-regions from human intracerebral recordings during native and non-native auditory language processing. We found specific spectral signatures in the alpha band (8-12Hz) for semantic processing in both pars triangularis and pars opercularis, which was absent in pars orbitalis. Moreover, non-native language elicited strong spectral neural responses in the gamma band (>30Hz). These responses were selective in frequency within the gamma band (low vs high) across the three regions, and suggest that these networks are also actively mobilized by attentional resources.

2.1 Introduction

The specific role of the inferior frontal gyrus (IFG) during language production has been extensively explored, its earliest study tracing back more than a century ago (Broca, 1861). The study of its functional role in language comprehension is more recent (Caplan et al., 2000; Grodzinsky, 2000). PET and fMRI evidence suggested a functional dissociation between semantic and syntactic information processing in the left IFG (e.g., (Dapretto & Bookheimer, 1999; Friederici et al., 2000; Humphries et al., 2006; Mazoyer et al., 1993; Vandenberghe et al., 2002; Vigneau et al., 2006). More specifically, these results revealed that the *pars triangularis* presented a selective involvement in semantic processing while the *pars opercularis* was critically mobilized in syntactic processing. However, others failed to observe such a dissociation in brain activations during syntactic and semantic processing (Fedorenko et al., 2010; Siegelman et al., 2019).

Because hemodynamic evidence is not unanimous regarding such functional brain segregation, several authors investigated this question with electrophysiology, measuring spectral neural activity with electroencephalography (EEG). Indeed, it is possible that information processing varies in terms of spectral neural dynamics within specific brain regions depending on the specific linguistic material/units used (e.g. Lewis & Bastiaansen, 2015; Martorell et al., 2020). For instances, Bastiaansen and Hagoort (2015) observed a semantic information effect in the high frequency activity (gamma-band, 40-60Hz) and a syntactic effect in the low frequency activity (10-20Hz) (see also Bastiaansen et al., 2010; Hald et al., 2006; Weiss et al., 2005). Frequency-specific neural responses could mirror functional segregation as a function of stimuli hierarchy (i.e. words, sentences) and linguistic mechanisms. For example, spectral mechanisms could explain the parallel processing of semantic and syntactic information during sentence comprehension that match with the unification mechanisms proposed in the MUC model (Hagoort, 2005, 2013). In other words, spectral frequency-specific brain processing might serve the crucial role of integrating speech units, like as words into sentences, within different temporal scales, thereby explaining discrepancies in previous functional anatomical results.

In line with such a proposition, it has been shown that alpha-band frequency activity is involved in semantic processing in relation with the declarative memory information retrieval (M. Bastiaansen et al., 2005, 2008; Hagoort et al., 2004; Klimesch,

1999) as well as during attentional processes during speech. Indeed, Peña & Melloni (2012) compared backwards and forward utterances and showed an alpha power suppression during backward utterances in posterior regions, in line with the higher attentional demands of such items. Higher frequency bands (> 30Hz) are suggested to be involved in semantic/syntactic unification. Indeed, it is suggested that syntactic unification is reflected by an increase in beta power during syntactically correct sentences and sentences as compared to sentences containing a syntactic violation (M. Bastiaansen et al., 2010; Kielar et al., 2014; Pérez et al., 2012). Semantic unification was suggested to be reflected by gamma power modulations. Indeed, several studies showed gamma power increases during correct sentences and gamma power decreases during sentences with semantic violations (M. Bastiaansen et al., 2010; Hald et al., 2006; Weiss et al., 2005). However, an opposite result was observed by Hagoort et al (2004; see Herrmann et al., 2004 for specific view of processes supported by gamma oscillations). It is important to highlight that the majority of studies on brain oscillations during language comprehension used semantic/syntactic violation paradigms and thus studies without such experimental manipulation through the use of linguistic violations are rare. Moreover, violation/error detections triggered by sentences containing violations might involve additional cognitive mechanisms that are not necessarily part of language processing in normal communication and that might bias our understanding of cognitive processes at work during language comprehension (Arnal et al., 2011).

In the present study we were interested in specifying the role of the inferior frontal gyrus in language processing with long sample of speech without violations and its spectral signatures of functional information segregation. To do this, we collaborated with patients with refractory epilepsy during their presurgical SEEG exploration. Patients performed an auditory perception task in which we evaluated the inferior frontal gyrus implication during native (French) and nonnative (Suomi) utterances and evaluated amplitude modification on frequency bands of interest.

2.2 Method

2.2.1 Participants

Fifteen patients with drug-resistant epilepsy implanted with intracranial electrodes participated in this study during their pre-surgical evaluation with stereotactic

electroencephalography (sEEG) recording at the Grenoble-Alpes University Hospital (see Table 1 for demographic information). Patients provided written informed consent and the study has been approved by the National French Ethical Committee (CPP Sud-Est V n° 09-CHUG-12).

Table 5.6.1: Demographic and clinical information of patients included in the study

P	Age	G	H	EZ LAT	EZ LOC	NCS
1	54	M	R	L	PARIETAL	6
2	28	M	R	L	TEMP	1
3	23	M	L	L	TEMP	3
4	39	F	L	L	TEMP	5
5	37	M	R	L	MULT	9
6	27	F	R	L	MULT	7
7	34	F	R	L	INSULA	3
8	40	F	R	L	TEMP	4
9	46	M	L	L	TEMP	5
10	15	M	L	L	INSULA	5
11	21	F	R	L	TEMP	5
12	26	F	R	L	FRONTAL	3
13	24	F	L	R	PARIETAL	2
14	32	F	R	L	MULT	14
15	41	M	R	L	INSULA	9

Abbreviation P: patient; Age: age at the iEEG acquisition; G: Gender; H: handedness; EZ LAT: epileptic zone lateralization; EZ LOC: epileptic zone location; TEMP: temporal lobe; MULT: multilobe; NCS: number of cortical sites included.

2.2.2 Electrode implantation

Each patient was stereotactically implanted with 11 to 15 semi-rigid, multilead electrodes. Each electrode had a diameter of 0.8 mm and consisted of 8–18 contact leads 2 mm wide and 1.5 mm apart (DIXI Medical, Besançon, France). Electrode implantation were strictly related to individual clinical hypotheses. Co-registration of a preoperative MRI and post-operative MRI or CT scan were performed to assess the locations of the electrode contacts for each patient using a coordinate system in relation to the anterior commissure / posterior commissure plane. In order to allow

group analyses after brain spatial normalization, electrode contact positions were ultimately expressed in the Montreal Neurological Institute (MNI) coordinate system using Statistical Parametric Mapping 12 software (SPM12, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, University College London, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm). Visual inspection of contact locations was used to check whether electrode contacts were located in grey or white matter.

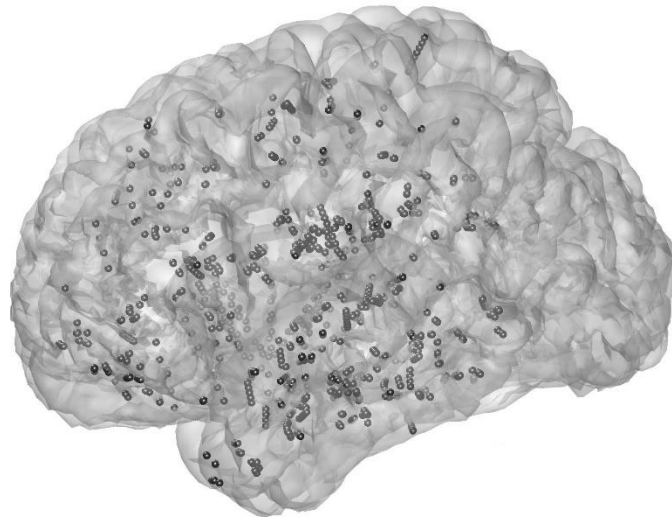


Figure 5.6.1: Anatomical coverage for the P1-P15 in the left hemisphere. A total of 1257 cortical sites were included

2.2.3 SEEG recordings

SEEG recordings were performed using a video-EEG monitoring system (Micromed, Treviso, Italy) that allowed to simultaneously record up to 256 monopolar contacts. The sampling rate was set to 1024 Hz with an acquisition band-pass filter between 0.1 and 200 Hz. Referential montage with chosen reference electrodes in the white matter. All other recording sites were chosen in the grey matter was used to acquire data. For data analysis, a bipolar montage between adjacent contacts of the same electrode was used to improve sensitivity to local current generators. Coordinates of virtual bipolar contacts used to construct images (see Figure 5.6.1 above) were considered to be at an equal distance of two successive contacts.

2.2.4 Region of interest

Three regions of interest (ROIs) in the inferior frontal cortex were created: *pars orbitalis*; *pars opercularis* and *pars triangularis*. Region labelization was performed using AICHA atlas (Joliot et al., 2015). Were included in the *pars orbitalis*: a total of 29 cortical sites from 9 patients; in the *pars opercularis*: a total of 22 cortical sites from 8 patients and in the *pars triangularis*: 30 cortical sites from 8 patients (see Supplementary Table 1 for details of patient's cortical site distributions in each ROI).

2.2.5 Cognitive task and procedure

The experimental procedure took place in patients' hospital room. The task was presented via the Presentation stimulus delivery software (Neurobehavioral Systems®).

2.2.5.1 Auditory perception task

This task was constructed as a functional auditory localizer (called in short AUDI) and was adapted from Belin et al. (2000) and partially used in our team in a previous study, see Perrone-Bertolotti et al. (2012). Participants listened to sounds of several auditory categories with the instruction that three of them would be presented again at the end of the task together with three novel sounds and that they should be able to detect previously played items. Auditory stimuli were: speech and speech-like categories; categories including nonspeech-like human sound, environment sound, animals and instrumental music. For the specific question of the present study we only focused on two speech-like categories: native language (French) and non-native language (Suomi). Participants were instructed to close their eyes while listening to three stimuli of each category lasting 12 seconds each, along with three 12 seconds intervals with no stimulation, serving as a baseline (i.e., Silence). Consecutive stimuli were separated by a 3 seconds silent interval. The sequence was pseudorandomized to ensure that two sounds of the same category did not follow each other. Sound sequences were delivered binaurally via earphones. All acoustic signals had the same intensity, quantified by their root mean square, set at a comfortable sound level. In the context of this experiment, the non-native Suomi speech was not familiar nor understood by any of the patients.

2.3 Analysis

All preprocesses and data analyses were performed using FieldTrip toolbox (Oostenveld et al., 2011) and custom scripts on Matlab (version 9.7.0, Matlab®, R2019b).

2.3.1 Preprocessing sEEG signal

Raw data were transformed into four time-series corresponding to alpha, beta, low-gamma, and high-gamma frequency band amplitudes with the following procedure (Ossandon et al., 2011; Perrone-Bertolotti et al., 2012): Step 1: continuous sEEG signals were first bandpass-filtered in successive 2 or 10 Hz wide frequency bands from [8Hz to 12Hz], [16Hz to 24Hz], [30 to 50Hz], or [50Hz to 150Hz] (for alpha, beta and high-gamma frequency bands respectively) using a zero-phase forward and reverse filter. Step 2: for each bandpass-filtered signal we computed the envelope using standard Hilbert transform (Le Van Quyen et al., 2001). Step 3: for each band this envelope signal was divided by its means across the entire recording session and multiplied by 100. This procedure yields instantaneous amplitude envelope values expressed in percentage (%) of the mean. Step 4: the envelope signals for each consecutive frequency bands were averaged together to provide one single time series (alpha, beta, low-gamma, or high-gamma activity) across the entire session. Step 5: The obtained envelopes were epoched into data segments centered around each stimulus and baseline corrected (the baseline for preprocessing corresponded to the 1500ms preceding the beginning of audio presentation).

2.3.2 Statistical analyses

As previously mentioned, the aim of this task in the present study was to map functional regions in line with speech and speech-like item processing. To do so, we segmented the three 12 second stream into 20 trials for each condition (French utterance/native condition and Soumi utterance/ non-native condition), obtaining 60 trials per condition. We then calculated the mean power of each of these trials and compared the mean power between the native and non-native conditions as well as between each condition and the baseline (i.e., silence) using *t*-tests for alpha, beta, low-gamma, and high gamma frequency bands. P-values were Bonferroni corrected for the number of regions and frequency bands tested, resulting in a significant threshold of 0.0056. We

also compared each condition to baseline activity (silence condition) using one-sample *t*-tests.

2.4 Results

2.4.1 Pars orbitaris

Analysis revealed a significant difference ($t = -4.38, p < .0056$) between the two language conditions in the low-gamma frequency band showing a larger amplitude response during non-native stimuli than during native ones. No significant difference between native and non-native speech utterance was observed for the other three frequency bands explored. Nevertheless, we observed a significant difference between each speech condition (native and non-native) and the baseline condition ($t = 3.32, p < .0056$, and $t = 5.83, p < .0056$, for comparison of native and non-native conditions to silence baseline respectively) in the high-gamma-band, suggesting an increase in high-gamma amplitude in this region for both conditions compared to silence (see Figure 5.6.2).

2.4.2 Pars triangularis

A significant difference between native and non-native speech condition in the alpha, low-gamma, and high-gamma frequency bands was observed. For the alpha-band we observed a larger amplitude response for natives than for non-native speech utterances ($t = 3.03, p < .0056$). This effect is characterized by a significant increasing of the alpha amplitude during native utterances ($t = 3.47, p < .0056$) but no significant power modulation for the non-native speech utterances. The inverse pattern of result was observed in the low-gamma ($t = -7.96, p < .0056$) and high-gamma-band ($t = -7.69, p < .0056$) showing a larger response for non-native speech than for native speech condition. Indeed, only non-native utterance induced an increase of high-gamma amplitude compared to the baseline ($t = 13.55, p < .0056$) (see Figure 5.6.2).

2.4.3 Pars opercularis

Native and non-native speech conditions induced significant differences in three of the four frequency bands. A significant difference between native and non-native speech condition was observed in the alpha-band, with a larger response for native than for non-native speech utterances ($t = 5.17, p < .0056$). Importantly, this difference is characterized by a significant increase in alpha band amplitude during native speech

utterances ($t = 4.37, p < .0056$) and a significant alpha amplitude decrease during non-native speech utterances ($t = -2.83; p < .0056$). A similar pattern of results was observed in beta-band with a significant difference between native and non-native speech utterances ($t = 7.98, p < .0056$). This difference was characterized by a significant beta amplitude increase during native speech utterances ($t = 4.21, p < .0056$) and a significant beta amplitude decrease during non-native speech utterances ($t = -7.63, p < .0056$). In low-gamma responses no significant difference between condition or against baseline was observed. Finally, a significant difference in the opposite direction of the one shown in the lower frequency-bands was observed in high-gamma responses, during non-native speech utterances as compared to during native ones ($t = -7.49, p < .0056$). This high-gamma band response was characterized by only a significant amplitude modulation for non-native utterances compared to baseline activity ($t = 2.88, p < .0056$). Low-gamma responses in the *pars opercularis* did not differ from the baseline (See Figure 5.6.2).

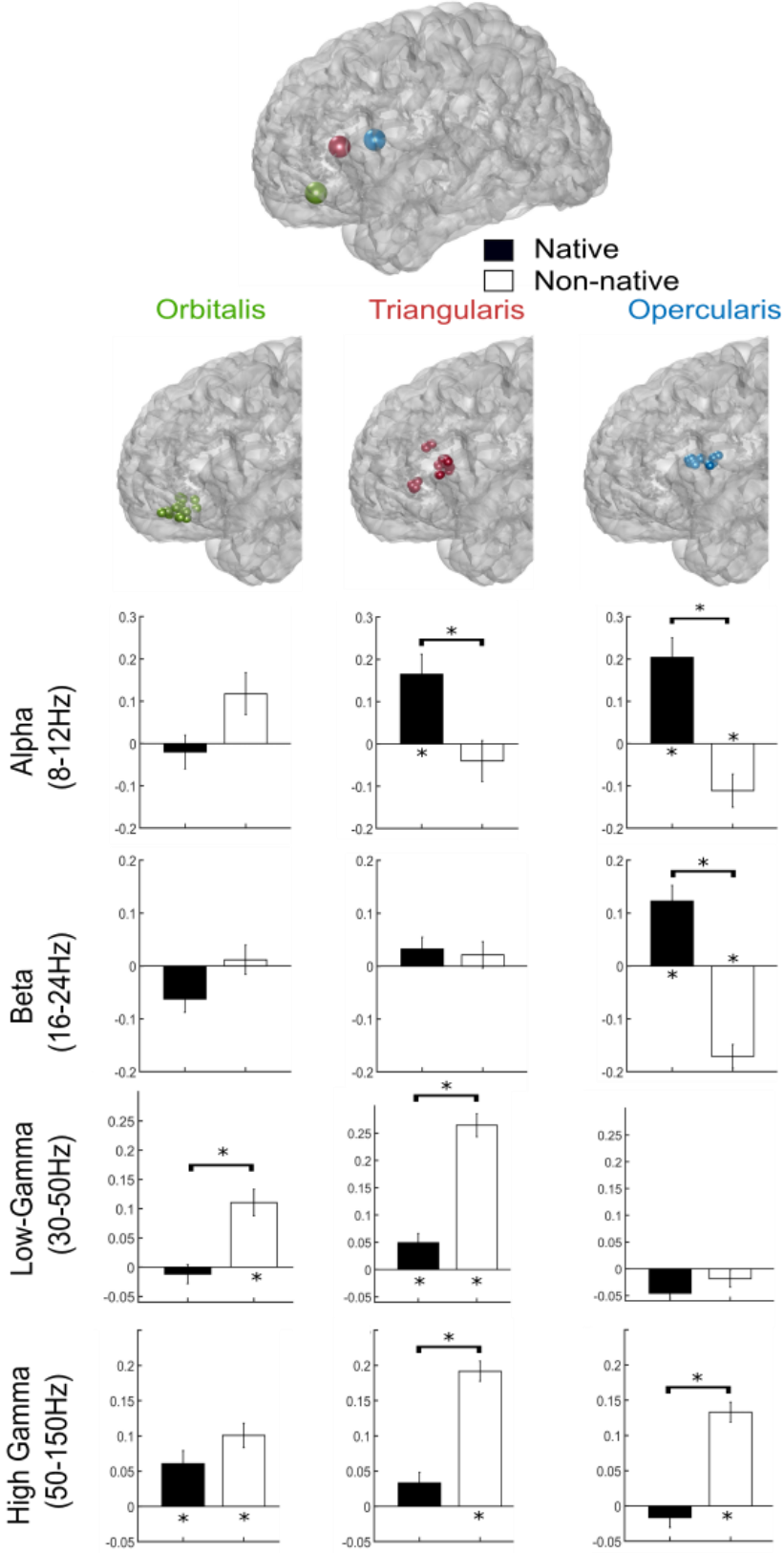


Figure 5.6.2: ROIs evaluated in the left inferior frontal gyrus (LIFG) including: the pars orbitalis (in green) the pars triangularis (in red) and the pars opercularis (in bleu)

For each ROI single cortical sites were included in the ROI. Significant amplitude modulation in each of the frequency-band explored (alpha, beta, low-gamma and high-gamma bands) for the native (French, in black) and the non-native (Suomi, in white) speech utterance conditions are presented.

2.5 Discussion

The aim of this study was to evaluate spectral mechanisms at work during language processing in the left inferior frontal gyrus (IFG). We specifically did not include violations in our stimuli in order to avoid inclusion of additional processes related to violation/error detection. Therefore, spectral activity in the alpha, beta, low-gamma and high-gamma frequencies were compared during processing of native and non-native utterances (French and Suomi utterances, respectively).

First of all, results observed in the *pars orbitalis* suggest an activity in this region that is not specific to meaning. Indeed, the absence of difference between the native and non-native conditions for the high frequency activity suggests that this region is active during processing but is not specific to the integration of meaningful linguistic information. Moreover, the larger low-gamma frequency activity observed in this region during non-native stimuli compared as during native ones is in line with this interpretation of a non-specificity of this region. The observation of a similar pattern of results in the *pars triangularis* for high frequency bands (low- and high-gamma) and in the *pars opercularis* for the high-gamma band with increased activity in these frequency bands for non-native stimuli suggests that high frequency activity in these is not linked to unification of linguistic (semantic or syntactic) information as suggested by some authors (Hald et al., 2006; Peña & Melloni, 2012; Rommers et al., 2013). In fact, in these studies, the authors showed an increase in gamma activity for highly predictable words in sentences compared to activity for words that are less predictable or anomalous, or a similar increase in gamma activity for native compared to non-native stimuli processing. Also, these results do not fit the explanation in terms of match between bottom-up information and pre-activated representations as suggested by Lewis et al. (2015). In fact, according to this view, gamma activity reflects predictability in sentence processing and matching between top-down prediction and bottom-up evidence which is not in line with our findings either as the non-native condition is highly unpredictable as compared to the native one. The difference of these findings can be explained by the local brain networks' anatomical localization. Indeed, we measured low- and high-gamma activity specifically in the IFG while effects showing increases in gamma activity observed in several studies described above show this increase in more posterior regions (e.g., Peña & Melloni, 2012). Moreover, this explanation is in line with the findings of Hagoort and collaborators (2004) who

observed a gamma increase when encountering a world knowledge violation located around the left IFG. This result highlights the importance of the activity localization. This explanation is corroborated by the observation in our study of a different pattern of high-gamma activity in the *pars orbitalis*. Indeed, the *pars orbitalis* seems to exhibit a different effect than the other IFG regions. The difference we observe in low- and high-gamma activity in the *pars opercularis* and *pars triangularis* with higher activity during non-native stimuli can be explained in terms of information decoding and attentional processing (Ray et al., 2008; see also Perrone-Bertolotti et al., 2012).

Regarding the effect observed in the *pars opercularis*, the increased beta response during native stimuli and the response decrease during non-native ones corroborate findings showing an involvement of this region for syntactic processing (Dapretto & Bookheimer, 1999; Zaccarella & Friederici, 2015). This result also supports the hypothesis that beta spectral responses can support syntactic unification. The observation of the increase in alpha activity during native stimuli in the *pars triangularis* and *pars opercularis* is in line with a role of alpha oscillations in storage of syntactic phrases (Haarmann & Cameron, 2005). In fact, in this study, stimuli were short messages of 2-3 sentences, and lasted around 12 seconds. In order to correctly understand the stimuli, patients had to store the different phrases into working memory which might have been reflected by the increase in alpha frequency activity for native stimuli but not for non-native ones. Most importantly, our results revealed distinct effects in different frequency ranges (alpha-beta and low- and high-gamma frequency activities) in the same regions (*pars opercularis* and *pars triangularis*). Such a dissociation could be the reflection of bottom-up and top-down processing occurring in parallel and from distinct regions. This type of interactions has been observed among monkeys with visual tasks (Buschman & Miller, 2007) in which the authors show top-down synchronization in the low frequency and frontal regions and bottom-up synchronization in higher frequency in sensory regions. This pattern could also apply in humans for the auditory and language processing with top-down control in the low-frequency and bottom-up activity synchronization from more sensory temporal regions (Arnal et al., 2011). Such hypothesis remains to be investigated.

2.6 Supplementary material

Table 5.6.S1: MNI coordinates of each cortical site included for each of the three frontal ROIs

Frontal_Inf_Orb_L				Frontal_Inf_Tri_L				Frontal_Inf_Oper_L			
P	X	Y	Z	P	X	Y	Z	P	X	Y	Z
3	-38,609	37,266	-13,283	1	-37,825	20,915	10,751	2	-51,215	17,831	15,543
3	-42,089	37,157	-13,219	1	-41,428	21,559	11,175	4	-46,942	7,042	13,129
3	-45,557	37,047	-13,159	1	-45,009	22,269	11,807	4	-50,886	6,99	13,242
4	-44,462	40,566	-11,618	1	-48,526	23,047	12,52	5	-59,62	6,729	16,019
4	-40,575	40,686	-11,372	1	-52,018	23,857	13,196	5	-56,08	6,733	16,05
4	-36,75	40,757	-11,044	1	-33,716	23,06	15,133	7	-58,936	6,215	15,918
5	-33,169	40,669	-16,248	5	-46,513	32,834	21,176	9	-54,743	15,941	12,35
5	-36,653	40,46	-16,191	5	-43,019	32,948	21,388	9	-51,062	16,068	12,522
5	-40,155	40,231	-16,126	6	-46,254	39,759	1,252	9	-47,348	16,225	12,67
5	-43,676	40,012	-16,06	6	-42,366	39,871	1,315	9	-36,032	16,617	13,244
5	-47,164	39,802	-15,959	6	-38,408	39,961	1,408	9	-58,57	4,537	17,125
6	-41,839	36,879	-16,623	7	-51,03	26,378	6,603	10	-46,933	18,465	13,136
6	-37,944	37,324	-16,483	7	-54,539	26,002	6,861	10	-50,491	19,163	14,873
6	-34,008	37,594	-16,352	8	-48,455	29,921	23,294	12	-38,906	12,571	15,379
6	-30,073	37,77	-16,207	8	-44,723	30,114	23,508	12	-52,911	13,166	15,545
8	-38,702	40,165	-9,781	10	-41,805	37,106	3,138	12	-49,507	13,025	15,623
8	-42,414	39,895	-9,664	10	-45,911	37,193	3,19	14	-59,886	8,454	11,874
10	-46,429	42,101	-10,961	11	-53,356	22,233	13,882	14	-56,432	8,633	12,217
13	-39,681	49,248	-13,689	11	-49,457	22,836	14,216	14	-52,969	8,841	12,577
13	-47,668	49,218	-13,56	11	-45,801	23,474	14,708	14	-49,555	9,084	12,967
14	-25,077	31,887	-11,303	11	-38,614	24,618	14,942	14	-39,101	9,675	14,004
14	-26,067	32,842	-6,741	11	-42,244	24,057	15,027	15	-55,039	6,912	13,613
14	-41,43	39,013	-6,256	14	-52,144	26,409	11,43				
14	-37,985	39,337	-6,096	14	-48,674	26,557	11,677				
14	-34,501	39,635	-5,925	14	-45,178	26,719	11,923				
14	-24,092	40,484	-5,39	15	-39,275	38,997	-0,682				
15	-31,586	45,475	-14,638	15	-42,926	38,528	-0,364				
15	-35,157	45,947	-13,776	15	-46,607	38,069	0,018				
15	-38,762	46,421	-12,872	15	-37,022	21,484	8,708				
				15	-50,18	24,014	13,243				

En résumé

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux mécanismes cérébraux supportant la compréhension du langage au niveau du gyrus frontal inférieur gauche. Plus spécifiquement, nous nous sommes focalisés sur l'activité spectrale dans différentes régions du GFI gauche afin d'évaluer s'il apparaissait une distinction spatiale et fréquentielle du traitement langagier dans cette région. Pour cela, nous avons mesuré l'activité cérébrale de patients implantés présentant une épilepsie pharmaco-résistante lorsqu'ils écoutaient des phrases dans leur langue native ou dans une langue non-native inconnue. L'analyse par bande de fréquence et par région d'intérêt a permis de mettre en évidence une distinction du traitement linguistique au niveau spatial et fréquentiel. En effet, les résultats semblent montrer que l'intégration des informations linguistiques lors du traitement du langage natif est supportée par une activité de basse fréquence au niveau du *pars triangularis* et *pars opercularis*. Le traitement du langage non-natif, quant à lui, engendrait une activité de haute fréquence (low- et high-gamma) dans l'ensemble des trois sous-régions du GFI. Cette activité de haute fréquence reflèterait un plus fort recrutement de processus attentionnels lors du traitement de stimuli n'ayant pas de sens.

3. Etude 7 : Dynamique cérébrale de l'interaction du langage et du contrôle attentionnel : étude en cours

Cette étude est en cours, c'est pourquoi nous n'en présenterons ici que les grandes lignes (l'introduction, les méthodes et analyses sont disponibles dans en Annexe 2).

L'objectif de cette étude est de caractériser la dynamique fonctionnelle d'un réseau spécialisé dans le traitement du langage oral par rapport au traitement d'autres types de stimuli auditifs. Plus spécifiquement, nous nous focalisons ici sur comment ce réseau spécialisé dans le traitement du langage se comporte lors de traitements langagiers et non-langagiers modulés par le contrôle attentionnel. Cette étude nous permettra ainsi d'évaluer le lien entre le langage et le contrôle cognitif au niveau cérébral et nous permettra de caractériser ces interactions en termes de dynamique cérébrale.

Nous avons identifié des réseaux spécifiques au traitement du langage natif (i.e., français), au traitement d'une langue étrangère non connue (i.e., suomi), et au traitement de listes stéréotypées (i.e., récitation de l'alphabet et de suites de chiffres) au niveau de leur activité de haute fréquence (Figure 5.7.1). Ainsi, nous avons mis en évidence des sites corticaux qui répondent de manière sélective des conditions.

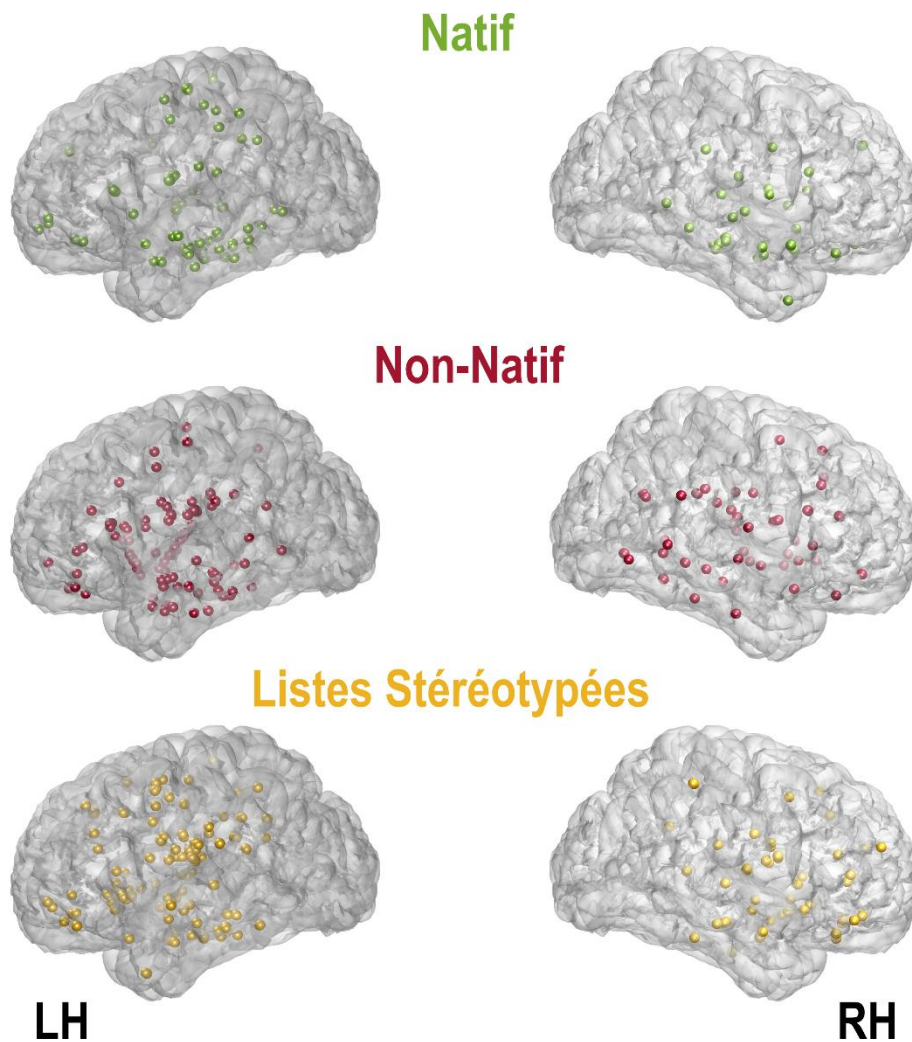


Figure 5.7.1 : Représentations spatiales des réseaux spécifiques pour chaque condition de stimuli auditif évaluées

Nous avons par la suite évalué la dynamique cérébrale sur deux tâches attentionnelles (une verbale et une non-verbale voir Annexe 2 pour une description des protocoles) pour chaque site cortical des réseaux précédemment identifiées. Cela nous a permis d'obtenir pour chaque réseau spécifique (au langage natif, au langage non-natif, et aux listes stéréotypées) les sites corticaux impliqués lors de processus attentionnels dans une tâche impliquant du langage et une tâche n'impliquant pas de langage (Figure 5.7.2). Cette analyse des mêmes sites corticaux dans différentes tâches permet ainsi d'évaluer les différentes implications des processus attentionnels dans chacun des réseaux spécialisés. Notamment, nous observons une prédominance de sites corticaux au niveau temporal gauche en lien avec la voie ventrale pour le réseau spécifique au traitement du langage natif. Inversement pour le réseau spécifique de listes stéréotypées une implication plus importante des régions frontales est observée.

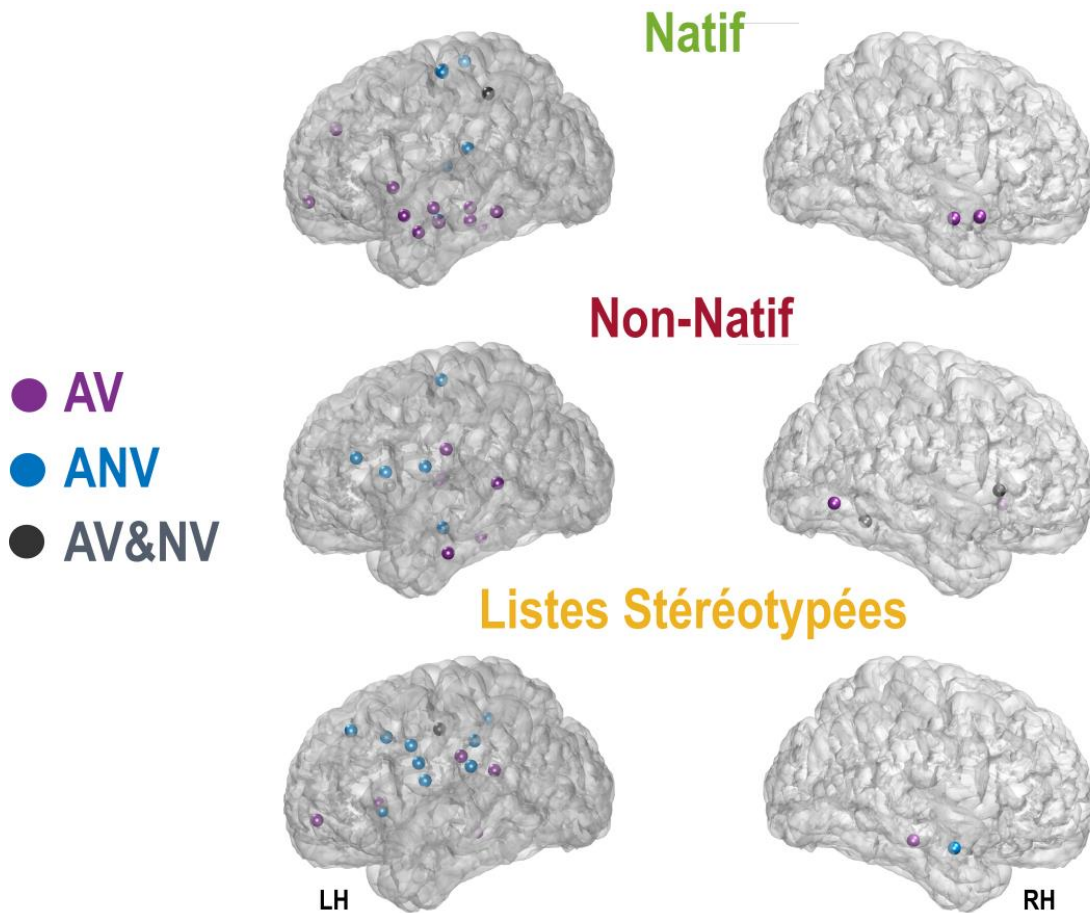


Figure 5.7.2 : Sites corticaux de chacun des réseaux spécifiques et leur réponse en lien avec les modulations attentionnelles lors d'une tâche verbale (AV en violet), d'une tâche non verbale (ANV en bleu) ou des deux (AV&NV en noir)

En ce qui concerne l'activité dynamique de haute fréquence au cours des tâches attentionnelles, nous observons que les sites corticaux au niveau temporal présentent une activité sélective pour l'information verbale attendue (condition Attention + de la tâche d'AV) avec une différence entre les deux conditions d'attention plutôt tardive (Figure 5.7.3). Les sites corticaux en lien avec la modulation attentionnelle non-verbale (i.e., dans la tâche d'ANV) montrent une activité précoce pour les deux modalités avec une réponse soutenue pour la condition nécessitant davantage d'attention (i.e., Attention +) (Figure 5.7.3).

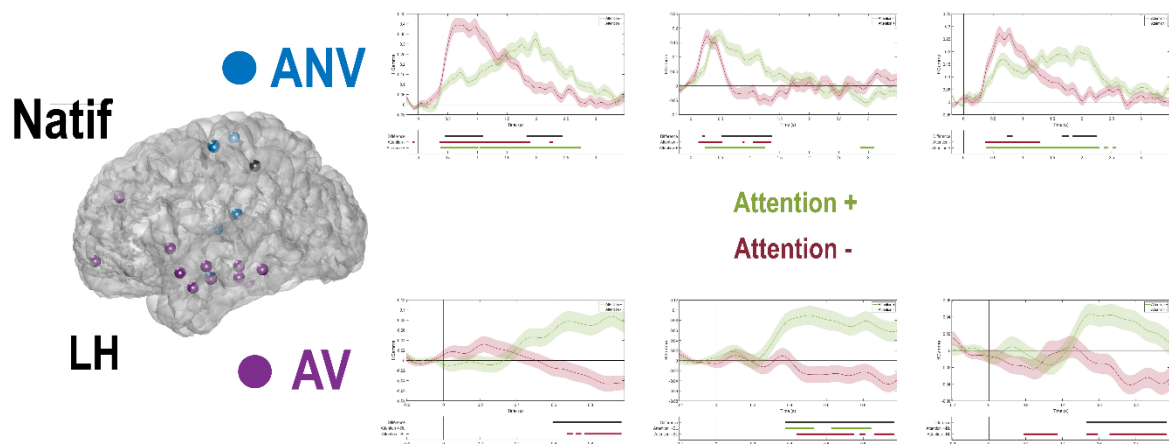


Figure 5.7.3 : Décours temporel de l'activité de haute fréquence pour les sites corticaux du réseau sélectif au langage natif pour les tâches attentionnelles verbales (AV) et non-verbales (ANV). Trois sites corticaux différents sont présentés

Ces résultats sont très préliminaires et nécessitent d'être interprétés avec précautions d'autant plus qu'il s'agit pour le moment de résultats descriptifs en ce qui concerne les comparaisons entre les réseaux spécifiques identifiés. Nous réfléchissons actuellement à certaines mesures qui nous permettraient de comparer ces réseaux de manière pertinente.

En résumé

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la dissociation fonctionnelle des réseaux cérébraux sous-tendant le traitement des informations sémantiques et syntaxiques lors de la compréhension du langage oral. Au vu de la littérature, nous nous attendions à une dissociation à la fois au niveau spatial et fréquentiel. Les résultats de l'Etude 5 montrent que les régions du réseau canonique du langage semblent présenter une activation semblable pour le traitement de l'information sémantique et syntaxique. En effet, nous n'avons pas observé de pattern fort de distinction de ces traitements mais plutôt des patterns légers, des tendances suggérant certaines différences de traitement. Toutefois, les Etudes 5 et 6 semblent toutes deux montrer qu'une certaine distinction des traitements cognitifs apparaît au niveau spectral lors de la compréhension du langage oral, notamment au niveau de gyrus frontal inférieur gauche. Ces observations suggèrent que des traitements linguistiques et/ou non-linguistiques distincts peuvent apparaître au même moment dans une même région mais seraient soutenus par des traitements dans différentes bandes de fréquence. Ces résultats nécessitent d'être répliqués mais ouvrent à de nouvelles perspectives afin d'appréhender les bases neurales de la compréhension du langage oral. Enfin, nous avons présenté les premiers pas d'une étude, sur des données rétrospectives acquises dans notre équipe, visant à caractériser l'implication des traitements attentionnels dans des réseaux spécifiques au traitement du langage ou d'autres stimuli auditifs (Etude 7). Cette nouvelle approche nécessite d'être approfondie et semble pouvoir être pertinente à l'évaluation de l'interaction entre les mécanismes de compréhension du langage et ceux de contrôle cognitif, au cœur de cette thèse.

6

Chapitre 6 : Discussion générale et perspectives

Cette thèse avait pour objectif d'évaluer les liens et les interactions entre la compréhension du langage oral et le contrôle cognitif ainsi que d'évaluer les processus de traitement de l'information sémantique et syntaxique dans la compréhension et dans les interactions précédemment décrites. Nous avons pour ce faire mis au point plusieurs paradigmes expérimentaux permettant d'évaluer la compréhension du langage ainsi que différents types d'interactions avec le contrôle cognitif, et ce tout en manipulant le traitement des informations sémantiques et syntaxiques. Pour aborder nos questions nous avons proposé des mesures comportementales et des mesures d'électrophysiologie.

Dans ce chapitre, nous résumerons dans un premier temps les principaux résultats obtenus dans les différentes études au regard de la littérature. Nous discuterons également nos résultats en lien avec les différents choix méthodologiques et expérimentaux que nous avons réalisés. Ceci nous mènera tout naturellement à aborder les différentes limites de nos études et de certains choix expérimentaux. Nous aborderons tout particulièrement les implications des mesures *online* et *offline* de la compréhension du langage en termes de mécanismes sous-jacents à la compréhension. Nous aborderons la question de la population évaluée dans les différentes études de ce travail et leur impact possible sur l'étude des processus d'intérêt. Nous aborderons également les différents types de manipulation des informations linguistiques lors de l'étude de la compréhension en lien avec son aspect

écologique. Avant de conclure ce travail, nous aborderons les limites théoriques ainsi que les perspectives et ouvertures possibles de ce travail.

Résumé et discussion générale des principaux résultats

Dans ce travail, nous avons mis en évidence différents types de relation entre les mécanismes de compréhension du langage et les processus de contrôle cognitif. Cette relation semble être sujette à la tâche spécifiquement demandée ainsi qu'aux manipulations psycholinguistiques utilisées. Tout d'abord, nous avons manipulé le traitement linguistique à l'aide d'ambiguïtés lexicales par l'utilisation d'homophones (Etude 1 et 2). Par la suite nous avons manipulé le traitement linguistique par le biais d'ambiguïtés ou de difficultés syntaxiques (Etude 3 et 4). Les résultats avec des approches corrélationnelles semblent montrer un lien entre la compréhension et différentes composantes du contrôle cognitif. Par exemple, nous avons pu observer un lien entre les performances d'inhibition et le traitement de l'ambiguïté lexicale (Etude 1) qui de plus semble peu modifié par la présence du bruit. Cette relation signalerait que plus les individus ont des bonnes capacités de contrôle cognitif meilleures sont leurs performances de résolution de l'ambiguïté linguistique. Nous avons également observé un lien entre la difficulté syntaxique et le contrôle cognitif (Etude 4). Plus spécifiquement, nous avons observé une relation entre la flexibilité cognitive, la mise à jour en mémoire de travail et la compréhension de phrases non-canoniques (Etude 4). Ces observations corrélationnelles, bien qu'indirectes, témoignent d'une relation entre les processus de contrôle cognitif et de compréhension du langage. Plus spécifiquement, ces résultats reflètent de meilleures performances de compréhension de phrases chez les individus présentant de meilleures performances de contrôle cognitif. Ainsi, il semblerait que face à des situations de compréhension plus complexes, ou moins canoniques, les individus ayant de meilleures capacités exécutives présentent de meilleures performances de compréhension. Ceci pourrait donc se traduire par un moindre coup cognitif lors de situations de compréhension de langage complexes/non-canoniques ou aversives chez les individus avec des meilleures capacités de contrôle. Ces résultats corrélationnels sont soutenus et en partie corroborés par les études de ce travail mesurant la relation directe de ces liens (i.e., à l'aide des paradigmes de double tâche ou avec des essais entrelacées). En effet, nous avons tout d'abord mis en évidence l'impact d'une ambiguïté lexicale par la présentation d'un homophone sur les

performances de contrôle cognitif (mesurées avec une tâche non verbale) (Etude 2). Cette étude se basait sur un postulat fort qu'était celui de d'une relation bidirectionnelle entre les mécanismes de compréhension de langage et ceux de contrôle cognitif. Dans la littérature, les études portant sur ces deux mécanismes cognitifs se sont principalement intéressées à l'effet des processus exécutifs sur ceux de compréhension du langage (e.g., Kane et al., 2007; Thothathiri et al., 2018). Ainsi, cet impact d'un traitement langagier complexe (activation de multiples sens et sélection du sens pertinent) sur un traitement exécutif (inhibition d'informations non pertinentes) semble être un argument en faveur d'une relation bidirectionnelle. Plus spécifiquement, dans notre étude, nous avons observé un effet de facilitation de la complexité linguistique (ici le sens de l'homophone le moins fréquent -donc la condition langagière la plus complexe- voir également Mirman & Britt, 2014) sur les processus d'inhibition. Ces résultats suggèreraient que la mobilisation des mécanismes d'inhibition lexico-sémantique en lien avec la présence d'une ambiguïté lexicale, induirait une pré-activation des mécanismes d'inhibition plus généraux qui seraient partagés avec les processus d'inhibition nécessaires lors de la tâche de Flanker réalisée de manière concomitante. Autrement dit, il se pourrait que les mécanismes mobilisés pour permettre l'accès au sens non-dominant d'un homophone nécessitent la mobilisation de processus de contrôle inhibiteur qui seraient partagés avec ceux mobilisés pour l'inhibition de l'information non pertinente lors des essais incongruents de la tâche de Flanker. Ainsi, étant donné que la tâche concomitante, la tâche de Flanker, est une tâche non-verbale nous pourrions faire l'hypothèse de la mobilisation d'un mécanisme inhibiteur domaine-général. Ce type de mécanismes de pré-activation ou de mobilisation des ressources de contrôle inhibiteur domaine-général partagé entre deux tâches ont été observés dans la littérature mais dans le sens opposé : de la tâche de contrôle vers la tâche de langage. Spécifiquement, Hsu et collaborateurs (Hsu et al., 2020; Hsu & Novick, 2016) ont montré un meilleur traitement *online* de phrases qui présentaient une ambiguïté syntaxique temporaire lorsqu'elles étaient précédées d'une mobilisation de processus de contrôle cognitif et notamment d'essais avec un fort coup d'inhibition (ici des essais incongruents d'une tâche Stroop ou de Flanker). Cependant, nous avons essayé de répliquer les résultats obtenus par Hsu et Novick (2016) en lien avec l'ambiguïté syntaxique transitoire (Etude 3) sans succès. Cette étude ne nous a pas permis de caractériser davantage la potentielle implication de processus de contrôle sur les mécanismes de compréhension.

Ainsi, les résultats obtenus ouvrent davantage la question du partage de ressources cognitives entre les mécanismes de compréhension du langage et de contrôle cognitif et de la direction des interactions. Les résultats corrélacionnels observés dans les études 1 et 4 révèlent deux points importants. D'une part, ces deux études montrent une relation générale entre les performances de contrôle cognitif et les performances de compréhension du langage suggérant que de meilleures capacités de contrôle exécutif seraient liées à de meilleures capacités de traitement du langage. D'autre part, l'observation de corrélacions spécifiques entre certaines mesures exécutives comme entre la mesure d'inhibition et le traitement de la parole dans la parole, le traitement de phrases non-canoniques et la mise à jour en mémoire de travail, suggèrent que certains processus de traitement du langage engagé sont spécifiques aux demandes de la tâche et au but en cours. Ces résultats sont cohérents avec une étude récente de Kuzmina et Weekes (2017) portant sur la relation entre les performances de contrôle cognitif verbal et non-verbal et les performances dans différentes tâches neuropsychologiques évaluant les capacités langagières chez des patients atteints d'aphasie fluente et non-fluente. Dans cette étude, les auteurs ont montré que les patients atteints d'aphasie dite non-fluente (caractérisée notamment par des difficultés à assembler et organiser des éléments linguistiques) avaient de moins bonnes performances dans une tâche de flexibilité mentale nécessitant la manipulation de représentations mentales comparativement à des patients atteints d'aphasie fluente ou à des participants contrôle sains. De plus, les patients atteints d'aphasie non-fluente étaient davantage impactés par les demandes attentionnelles des tâches et leurs performances verbales et non-verbales étaient davantage corrélées. Ces résultats sont en lien avec ceux que nous observons dans l'Etude 4 à travers la corrélation positive entre les performances de flexibilité des participants et leurs performances dans la tâche de compréhension de langage et celles de mise à jour en mémoire de travail. En effet, ces résultats révèlent tous deux une relation entre des processus exécutifs de flexibilité et des processus de compréhension du langage. Ils suggèrent que les mécanismes de compréhension du langage partagent, en partie, des ressources avec les mécanismes de contrôle cognitif. On peut ainsi supposer que cette implication du contrôle exécutif apparaîtrait lors de la nécessité de manipuler les différents éléments d'une phrase afin d'y donner un sens (i.e. dans des processus d'unification). Dans leur étude, Kuzmina et Weekes (2016) ont également testé les patients atteints d'aphasie sur une tâche Flanker (tâche que nous avons également

utilisée) ont observé une corrélation positive des performances à cette tâche avec celles de compréhension. Les auteurs interprètent cette corrélation comme le fait que les patients se reposent davantage sur des mécanismes de contrôle cognitif lorsque la compréhension du langage est difficile. Ce résultat et ce postulat fait également écho avec l'Etude 1 proposée dans ce travail. En effet, dans cette étude nous avons observé que les participants ayant de meilleures capacités de contrôle cognitif étaient moins impactés par une ambiguïté lexicale et par la présence de flux de parole distracteurs (voir également Perrone-Bertolotti et al., 2017).

Les résultats observés dans nos études semblent en accord avec le postulat du *Good-Enough model* de Fernanda Ferreira selon lequel les processus engagés dans la compréhension du langage vont dépendre de l'objectif lié à cette compréhension. En effet, l'observation d'une relation entre les capacités de maintien actif d'un but/d'attention soutenu et le traitement de l'ambiguïté lexicale dans l'Etude 1 reflète le besoin actif des processus de compréhension afin de ne pas être trop impacté par la présence d'une telle ambiguïté. De même, la relation entre les performances de flexibilité et la capacité des participants à vérifier la correspondance entre une phrase écoutée et une image, reflète la nécessité de manipuler les représentations mentales créées lors de la compréhension afin de vérifier sa correspondance avec l'image. Au niveau cérébral, nous avons également observé cet engagement de ressources attentionnelles dans l'Etude 5 à travers une activité de haute fréquence plus forte au niveau de la partie postérieure du gyrus temporal supérieur pendant la présentation de stimuli ne comportant pas ou peu d'informations linguistiques (e.g. listes de pseudo-mots) que pendant les stimuli comportant toutes les informations linguistiques (i.e., phrases). Cette observation va de pair avec celle de l'Etude 6 dans laquelle nous avons mis en évidence une activité haute fréquence plus importante au niveau du gyrus frontal inférieur, notamment dans la *pars opercularis* et de la *pars triangularis* lors de l'écoute de phrases d'une langue non-native (ici le Suomi, pour laquelle aucune information sémantique n'est intégrée) que lors de l'écoute de phrases d'une langue native (ici le Français) dans laquelle une intégration peut être réalisée. D'après les résultats reportés dans cette thèse, il serait ainsi important de considérer l'engagement des mécanismes de contrôle cognitif comme intervenant plus ou moins lors de la compréhension du langage en fonction du but associé à la compréhension et de la difficulté intrinsèque de ce traitement (difficulté induite par l'information linguistique ou

par l'information contextuelle). La conceptualisation des mécanismes de contrôle cognitif comme des processus contrôlés en opposition aux processus automatiques ne facilite pas une telle approche puisque ces mécanismes exécutifs sont souvent considérés comme étant engagés ou non sans entre deux (tout-ou-rien). C'est pourquoi la proposition d'une implication du contrôle cognitif dans un traitement si rapide comme celui de la compréhension langage oral (souvent conçu comme automatique) semble être apparue tardivement dans la littérature. Selon l'hypothèse du *conflict-monitoring* proposée par Botvinick et al. (2001), le *conflict-monitoring* serait un mécanisme qui évaluerait en permanence la quantité de conflit apparaissant dans nos processus cognitifs et enverrait cette information aux mécanismes de contrôle cognitif qui s'activeraient en cas de conflit trop fort. Dans cette perspective, il serait tout à fait possible de faire l'hypothèse que l'engagement des mécanismes de contrôle cognitif soit systématique (et adapté à la quantité de conflit perçu) et que cet engagement ne devienne conscient et/ou volontaire seulement si le conflit dépassait un certain seuil. Une approche semblable a été observée dans une étude que nous avons réalisée dans notre équipe et qui montre que certaines régions frontales, ici spécifiquement le cortex ventrolatéral préfrontal, jouerait un rôle de « gardien » et permettrait ainsi un filtre de l'information pertinente pour la tâche en cours (Perrone-Bertolotti et al., 2020). Ce filtre (de haut niveau donc après un filtrage perceptif) permettrait ainsi l'accès de l'information pertinente pour la tâche dans le réseau spécialisé qui soutient le traitement de cette tâche (ici en l'occurrence le réseau spécialisé pour le langage).

Il est également possible que l'implication des processus de contrôle cognitif varie en fonction du type de traitement linguistique en cours. Par exemple, différents processus de contrôle cognitif pourraient être à l'œuvre lors d'une sélection sémantique et lors d'une résolution d'ambiguïté syntaxique. C'est pourquoi nous avons également voulu dans cette thèse évaluer le traitement spécifique de ces deux types d'informations et dissocier les réseaux cérébraux spécialisés dans ces traitements ainsi qu'évaluer le lien avec le contrôle cognitif. En effet, l'objectif initial de cette évaluation était d'établir une caractérisation des processus de traitement sémantique et syntaxique au niveau neural afin de pouvoir ensuite évaluer l'interaction de ces mécanismes cérébraux avec ceux de contrôle cognitif. Nous aurions aimé évaluer d'une part la spécificité des réseaux sémantiques et syntaxiques et évaluer leur

interaction avec le réseau fronto-pariétal impliqué dans le contrôle. Nous avons voulu réaliser cela en utilisant des items au plus proche des conditions écologiques de compréhension de phrases, à savoir sans l'utilisation de situations de violations sémantiques ou syntaxiques ou l'utilisation classique de présentation mot-par-mot (e.g., M. Bastiaansen & Hagoort, 2015; Fedorenko et al., 2016; Matchin et al., 2019; M. J. Nelson et al., 2017; Pallier et al., 2011). Cependant, les difficultés rencontrées dans la caractérisation des processus langagiers ne nous ont pas permis de tester pleinement nos objectifs. Nous avons cependant pu évaluer l'implication de ces deux types d'informations au sein du réseau canonique de la compréhension du langage. Nous avons ainsi pu faire des apports au niveau du débat présent dans la littérature (depuis quelques années) sur la distinction fonctionnelle de ces deux types d'informations en utilisant pour la première fois un protocole expérimental orthogonal en modalité auditive continue (de phrases et non de mots isolés présentés à la suite). Comme dit plus haut, le choix du type de présentation était également contraint par notre souhait de réaliser une tâche qui soit plus proche de la réalité de la compréhension orale. Nous avons réalisé cela avec une approche originale qui vise à évaluer l'hypothèse d'une possible distinction non seulement au niveau anatomique/spatial mais également en termes d'activité spectrale, et ce par le biais de l'analyse de différentes bandes de fréquences impliquées dans le traitement du langage. Nos résultats montrent tout d'abord que toutes les régions du réseau canonique que nous avons évaluées présentent un pattern similaire de réponse aux deux types d'informations sémantiques et syntaxiques. Cela va dans le sens d'une absence générale de spécificité ou de distinction fonctionnelle au sein de ce réseau (voir Siegelman et al., 2019). Ce pattern général présente toutefois quelques spécificités et quelques distinctions au niveau du gyrus temporal supérieur, du gyrus temporal moyen et du gyrus supramarginal en lien avec des résultats de la littérature (Matchin et al., 2019; Pallier et al., 2011; Schell et al., 2017) et permettant de les compléter et les caractériser en lien avec l'information spectrale. Un résultat intéressant, bien que nécessitant une réplication, est celui observé au niveau du gyrus frontal inférieur pour lequel nous avons observé une dissociation fonctionnelle en termes de bande de fréquence évaluée et allant à l'encontre de modèles actuels de la littérature tel que celui de Angela Friederici (2011, 2017) ou celui de Peter Hagoort (Hagoort, 2005, 2013, 2016). Ces résultats semblent montrer l'intérêt de prendre en compte les informations spectrales lors du traitement de l'information linguistique.

Ainsi, au niveau fréquentiel, nous avons pu observer de manière générale que l'activité beta semblait particulièrement impliquée dans le traitement syntaxique (au niveau temporel et frontal). De manière intéressante, nous avons observé une distinction des traitements engagés en même temps au sein de mêmes régions : le *pars triangularis* dans l'Etude 5 à travers un pattern d'effet syntaxique en fréquence beta et un pattern d'effet sémantique en low-gamma ; et le *pars opercularis* dans l'Etude 6 à travers un traitement linguistique en fréquence beta et un traitement qui semble non-linguistique en high-gamma et notamment impliqué dans des processus attentionnels. Ces résultats suggèrent que des traitements distincts (ici sémantiques et syntaxiques) peuvent être réalisés en parallèle dans une même région et seraient soutenus par des activités spectrales différentes. Une autre interprétation probable de ces résultats pourrait être en lien avec une distinction spectrale en termes de traitement top-down et bottom-up online. En effet, dans une étude chez le singe, Buschman et Miller (2007) ont montré lors d'une tâche visuelle que l'activité cérébrale de basse fréquence (Beta) au niveau des régions frontales était liée au traitement top-down de l'information tandis que l'activité de haute fréquence (High-gamma) était liée au traitement bottom-up des régions sensorielles. Chez l'homme et au niveau de la compréhension du langage, nous pourrions faire l'hypothèse de mécanismes de traitement similaires avec des processus de contrôle top-down au niveau frontal en basse fréquence et des processus bottom-up de haute fréquence au niveau des régions temporales. Un tel postulat serait testable à l'aide d'analyses de synchronie de phases (Weiss & Mueller, 2003), de couplage phase-amplitude (Canolty et al., 2010), et de corrélation inter-régions (Vidal et al., 2012). Ces différentes méthodes permettent d'appréhender les mécanismes cérébraux sur les différentes dimensions (temporelle, spatiale, et fréquentielle) pouvant jouer dans la dynamique de traitement de l'information au niveau neural.

Certaines limites aux études d'électroencéphalographie intracrâniennes présentées sont à noter. En effet, dans l'Etude 5, il aurait été pertinent d'évaluer l'activité de fréquence thêta qui observée dans la littérature comme supportant des processus de contrôle cognitif (Domic-Siede et al., 2021; Röhm et al., 2001). Cependant, le design expérimental utilisé ne permettait pas d'évaluer l'activité de cette bande de fréquence à cause d'une période de baseline trop courte. De plus, comme précisé à la suite de l'Etude 5, nous avons pour objectif de comparer les enveloppes

d'activité de haute fréquence entre conditions afin d'évaluer la dynamique de traitement des informations sémantiques et syntaxiques. Cependant, nous avons constaté que très peu de modulation de l'activité de haute fréquence. Cette observation soulève tout de même un certain nombre de questions concernant la manière dont est traitée, au niveau cérébral, l'information auditive et continue que nous avons utilisée dans notre étude. En effet, alors que les patients distinguaient parfaitement les différents stimuli et comprenaient bien les phrases, nous n'observons pas d'effet très marqué d'un traitement différentiel en fonction de si une information sémantique ou syntaxique était traitée. Des mesures de corrélations inter-régions, de synchronisation de phases ou de couplage phase-amplitude permettrait peut-être de mettre en évidence des mécanismes de traitement de ces informations. Cette observation soulève également des questions concernant l'influence de la présentation des stimuli et de la tâche sur les traitements réalisés. En effet, dans nos études, nous avons utilisé des stimuli continus et ne comportant pas de violation (i.e., des phrases présentées dans leur intégralité sans coupure entre chaque mot) ou ne présentant pas les phrases mot-à-mot. Or, un certain nombre d'études mettant en évidence une distinction des traitements sémantiques et syntaxiques utilisent des stimuli segmentés ou présentant une violation (e.g., (M. Bastiaansen et al., 2010; M. Bastiaansen & Hagoort, 2015; Fedorenko et al., 2016; Matchin et al., 2019). Nous en venons donc à nous demander dans quelle mesure la présentation de stimuli segmentés ou présentant une violation reflètent un traitement langagier comparable à la compréhension de phrases continues. Il est fort probable que présenter les mots d'une phrase un à un (comme dans l'étude de Fedorenko et al., 2016 en ECoG) induise une charge en mémoire de travail non négligeable pouvant drastiquement moduler l'activité cérébrale liée à la compréhension. De la même manière, la présence d'une violation syntaxique ou sémantique (bien qu'apparaissant dans des contextes écologiques) est probablement accompagnée de processus de détection d'erreurs pouvant également influencer les mécanismes impliqués de manière significative. De telles méthodes restent essentielles à la compréhension des processus en jeu pendant le traitement du langage mais cela questionne sur l'aspect écologique des processus évalués et sur les possibles méthodes qui pourraient permettre l'évaluation de la compréhension au plus proche des conditions de tous les jours.

Manipulations, mesures expérimentales et leurs implications

Dans ce travail, nous avons choisi d'évaluer l'implication des processus de contrôle cognitif lors de la compréhension du langage oral à l'aide de différentes situations de compréhension. Dans l'ensemble des études comportementales de ce travail, nous avons manipulé le traitement langagier de différentes manières. Dans les Etudes 1 et 2 nous avons manipulé l'accès et la sélection lexicale avec la présentation d'homophones (induction d'une ambiguïté lexicale). Cette manipulation nous a permis de mettre en évidence une relation entre le traitement d'homophones et les performances de contrôle cognitif des participants (Etude 1) ainsi qu'une influence du traitement d'une telle ambiguïté lexicale sur les processus de contrôle exécutifs (Etude 2). Les résultats de ces deux études suggèrent une implication de certains processus de contrôle cognitif lors du traitement d'une ambiguïté lexicale au moment de l'activation de multiple sens d'un mot ou de la sélection du sens pertinent. L'ambiguïté lexicale étant transitoire, il est difficile de statuer pendant lequel de ces traitements un contrôle apparaîtrait. Il est possible que la détection de l'activation de multiple sens engage des mécanismes de contrôle afin de faciliter la sélection à venir. Il est également possible qu'au moment de la sélection du sens pertinent, des processus d'inhibition entrent en jeu afin d'inhiber les sens non pertinents du mot traité. L'Etude 2 semble indiquer un engagement de processus exécutif au moment de l'activation des différents sens mais ces résultats nécessiteraient d'être répliqués. De plus, dans cette étude faire varier le moment précis de synchronisation entre l'ambiguïté lexicale et les essais Flanker serait intéressant afin d'évaluer si un changement de pattern apparaîtrait, ce qui suggérerait une certaine dynamique d'engagement des processus cognitifs pendant le traitement langagier. Au vu des résultats obtenus dans l'Etude 2 nous pouvons faire l'hypothèse qu'en retardant la synchronisation des essais de contrôle cognitif (Flanker) au moment de la résolution de l'ambiguïté alors cette fois une interférence apparaîtrait de par une compétition des ressources de contrôle pour la résolution d'ambiguïté et pour la tâche de Flanker concomitante. En revanche, synchroniser les essais Flanker après cette résolution ne devrait pas induire d'effet particulier (voir Figure 6.1 pour une représentation schématique avec un exemple de phrase comportant une ambiguïté lexicale).

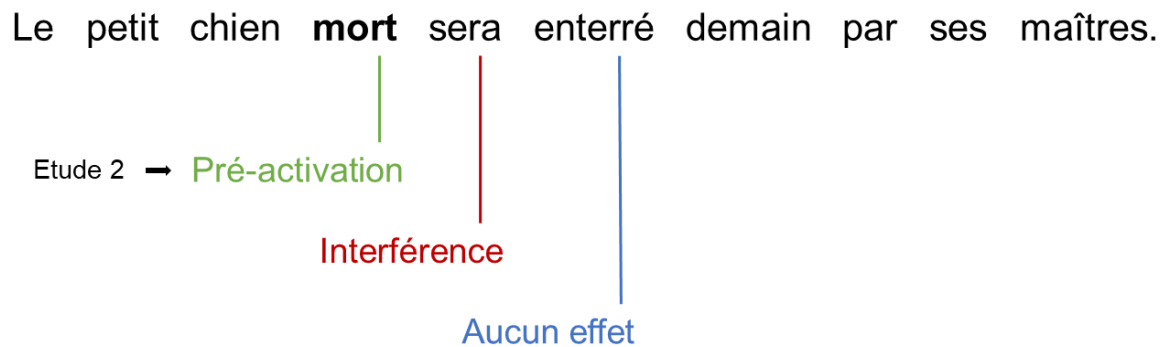


Figure 6.1 : Représentation schématique de l'effet observé dans l'Etude 2 (en vert) ainsi que des effets hypothétiques en fonction de la manipulation de la synchronisation de l'apparition des essais Flanker pendant la tâche

Dans les Etudes 3 et 4 nous avons manipulé la structure des phrases présentées afin d'induire une ambiguïté syntaxique transitoire de type *garden-path* (Etude 3) ou un traitement de phrases syntaxiquement moins fréquentes/canoniques (Etude 4). Ces études ont permis de mettre en évidence plusieurs aspects du traitement de phrases. Tout d'abord, l'absence d'effet d'ambiguïté syntaxique dans l'Etude 3 montre que la manipulation linguistique effectuée afin d'induire une ambiguïté syntaxique transitoire n'était pas suffisamment adaptée à la langue française. En effet, dans cette étude nous avons utilisées des phrases *garden-path* qui sont déjà en anglais des phrases peu fréquemment utilisées et artificiellement conçues pour des études en laboratoire. Ce type de phrases semblent être bien moins adaptées à la langue française (pour rappel : « mettez le crayon sur la serviette sur le classeur » au lieu de « mettez le crayon qui est sur la serviette sur le classeur »). Ainsi, la manipulation linguistique avec des phrases non-canoniques semble plus adaptée au français et se rapproche davantage d'une compréhension du langage écologique.

L'étude de la compréhension du langage oral implique une grande difficulté dans son évaluation. A cela s'ajoute dans notre étude la difficulté d'évaluer la compréhension en lien avec les mécanismes exécutifs. De plus, ce domaine étant relativement récent, peu de paradigmes expérimentaux permettant de mettre en évidence des effets robustes ont été développés. L'utilisation de mesures de mouvements oculaires semble être un bon compromis non seulement pour l'évaluation indirecte de la compréhension orale *online* mais également pour l'évaluation de son interaction avec les mécanismes de contrôle, telle qu'utilisée dans les Etudes 1 et 3. En effet, les études antérieures dans la littérature ont notamment montré que l'association de mesures de mouvements oculaires avec un paradigme de « monde

visuel » dans lequel des participants écoutent des phrases tout en voyant des images ou scènes reflétaient l'accès lexico-sémantique (Cooper, 1974; Tanenhaus et al., 2000). Par exemple, dans une étude utilisant une telle mesure, Tanenhaus et collaborateurs (1995) ont notamment montré que le regard des participants était synchronisé avec la présentation des mots dans une phrase. Plus spécifiquement, les auteurs ont montré que les participants regardaient l'image correspondant au mot qu'ils étaient en train de comprendre. Ce type d'information montre également la nature incrémentale du traitement du langage puisque le regard des participants semble suivre les différents éléments au cours des phrases. Dans ce travail, nous avons observé des mécanismes similaires. En effet, dans les études 1 et 3, lorsque les participants écoutaient une phrase (Etude 1) ou une instruction (Etude 3), leur regard se portait sur les images correspondant aux mots qu'ils étaient en train de comprendre. Cette observation semble refléter l'intégration incrémentale de l'information lors de la compréhension. Cet effet lexico-sémantique était particulièrement saillant dans l'Etude 1 dans laquelle nous présentions des homophones dont le sens pertinent pour la phrase était le sens non-dominant et dont le contexte contenait des images correspondant aux sens dominants et non-dominants de ces homophones. En effet, l'observation d'une plus forte probabilité de regard sur l'image représentant le sens dominant de l'homophone juste après la présentation de cet homophone que sur l'image décrivant son sens non-dominant montre d'une part que l'accès lexico-sémantique est très rapide, et d'autre part qu'il y a bien une compréhension du sens des différents mots pendant la compréhension et que celle-ci est influencée par la fréquence des mots dans la langue. De plus, l'observation de cet effet très transitoire dans l'Etude 1 et l'absence d'effet de l'ambiguïté syntaxique temporaire dans l'Etude 3 suggèrent que l'intégration des informations linguistiques et contextuelles se fait très rapidement.

Les effets observés dans cette thèse avec ces mesures oculométriques rejoignent les travaux de la littérature utilisant des paradigmes et mesures similaires (e.g., Chambers et al., 2004; Eberhard et al., 1995; Tanenhaus et al., 1995). Il est important de noter que la caractérisation de processus langagiers basée sur ce type de mesure oculaire repose uniquement sur des inférences puisqu'elles ne mesurent pas en tant que telle la compréhension. Ceci est d'autant plus vrai qu'il serait tout à fait possible de comprendre une phrase présentée auditivement sans regarder les images

correspondant aux éléments de la phrase. Les mesures offlines quant à elles, bien que n'apportant pas d'informations caractérisant la dynamique de la compréhension, permettent d'évaluer lors des paradigmes de choix d'images ou de vérification d'aborder la compréhension dans sa complexité. En effet, elles renseignent sur l'interaction possible entre le langage et la scène visuelle présentée et donc d'appréhender la compréhension du langage dans une forme plus écologique. Ce point a notamment été démontré par l'observation d'une facilitation de la résolution d'ambiguïtés lexicales ou syntaxiques en fonction des éléments présentés visuellement (Chambers et al., 2004; Eberhard et al., 1995). Etudier le langage avec un contexte visuel nécessite le contrôle de bon nombre de paramètres (en plus des paramètres perceptifs) afin de saisir les mécanismes d'intérêt. De plus, comme le note Tanenhaus et collaborateurs (1995) dans leur étude, l'observation d'une influence du contexte visuel lors du traitement langagier montre que l'étude du langage comme un processus modulaire isolément d'autres mécanismes cognitifs ne permettrait pas d'appréhender les processus de compréhension à l'œuvre dans notre quotidien.

La prise en considération de ce que les mesures online et offline mesurent réellement est également importante. En effet, alors que les mesures offline permettent de savoir si un matériel langagier a été compris dans sa globalité, les mesures online permettent d'appréhender les mécanismes à l'œuvre pendant la compréhension. En d'autres termes, les mesures online vont évaluer les processus cognitifs qui vont permettre la compréhension (traitement incrémentiel, intégration et unification des informations). L'objectif de ce travail étant d'évaluer l'implication des processus de contrôle cognitif pendant la compréhension du langage, de telles mesures online étaient essentielles. Nous avons vu précédemment que les mesures de mouvements oculaires permettent d'appréhender certains mécanismes cognitifs pendant la compréhension. Toutefois, à elles seules, ces mesures ne permettent pas de tester des hypothèses d'une influence ou implication directe des processus de contrôle cognitif sur la compréhension du langage.

Au niveau comportemental, l'utilisation des paradigmes en double tâche se sont révélés être la principale solution pour permettre une évaluation de l'interaction de la compréhension et le contrôle cognitif. En effet, entrelacer ou synchroniser deux tâches permet d'évaluer de manière directe le partage de ressources cognitives entre deux tâches, et plus spécifiquement l'influence de la manipulation des processus cognitifs

engagés par une première tâche sur les processus mesurés de la seconde tâche. Un tel entrelacement de deux tâches a été utilisé dans différentes études par l'équipe de Jared Novick et qui nous ont servi d'inspiration pour nos études (Hsu et al., 2020; Hsu & Novick, 2016; Thothathiri et al., 2018). Dans ces études, les auteurs entrelacent des essais d'une tâche de contrôle cognitif et ceux d'une tâche de compréhension du langage afin d'évaluer l'influence de l'augmentation de l'engagement des processus de contrôle cognitif par les essais de contrôle sur ceux de compréhension. Les auteurs ont ainsi montré dans les différentes études que le recrutement de processus de contrôle cognitif par la détection d'un conflit (e.g., Stroop ou Flanker incongruent) lors des essais de contrôle facilitait la résolution d'ambiguïtés syntaxiques qui suivaient ces essais. Une telle manipulation des processus cognitifs a permis de mettre en évidence un lien causal de l'engagement du contrôle cognitif lors du traitement et de la compréhension du langage. L'étude de Hu et Novick (2016) est la première utilisant une telle procédure avec une tâche de compréhension du langage oral. C'est pour cette raison que nous avons cherché à répliquer cette étude en français (Etude 3).

Un point que nous avons peu discuté jusqu'ici est la population étudiée dans de ce travail. Pour l'ensemble des études comportementale de ce travail (Etudes 1 à 4), nous avons évalué les processus cognitifs de compréhension du langage et de contrôle cognitif de participants sains, jeunes qui ne présentaient aucun trouble du langage. Nous avons donc étudié une population dont les capacités de compréhension du langage sont très élevées et dont celles de contrôle cognitif plafonnent (voir chapitre 3 pour une revue de cette question). Ces fortes capacités de compréhension et de contrôle cognitif rendent l'étude de la relation entre ces mécanismes d'autant plus difficiles puisque le traitement langagier chez cette population est très rapide et efficace. En effet, cela indique que pour tester l'hypothèse d'une possible interaction entre les deux mécanismes nous ne nous sommes pas mis dans les meilleures conditions. Ainsi, il serait intéressant d'évaluer les différences entre une population jeune chez qui les performances de contrôle cognitif et de langage seraient élevées et une population de personnes âgées chez qui les performances de contrôle cognitif seraient plus faibles et les performances de langage resteraient élevées (rappelons que les capacités de contrôle cognitif diminuent durant le vieillissement, e.g. Salthouse, 2009). La comparaison de telles populations pourrait permettre d'évaluer les liens entre les deux systèmes de manière plus aisée étant donné leur moindre

efficacité. De même, l'évaluation chez les enfants serait une bonne perspective puisque dans cette population, la compréhension du langage est moins efficace étant donnée la présence d'un vocabulaire ou d'une syntaxe moins développée ou moins stable, et que la maturation et le développement du contrôle cognitif est encore en cours (voir Chapitre 3).

Demande de la situation et compréhension

Dans toutes nos études, les participants ou patients avaient une certaine tâche à réaliser. Cette tâche leur demandait plus ou moins d'implication dans la manipulation mentale et l'utilisation du matériel langagier. En effet, les tâches allaient de l'écoute quasiment passive (Etude 5, 6 et 7), à la réponse à des questions tout en effectuant une seconde tâche (Etude 2), en passant par la mise en correspondance d'une phrase avec des images (Etude 1 et 4) et le suivi d'une instruction en alternance avec une seconde tâche (Etude 3). Cette variation de la demande associée au traitement et à la compréhension du langage est un point clef à prendre en compte dans les études futures. De fait, on peut supposer qu'une faible demande liée à la compréhension d'un message (e.g., écouter la radio en fond) impliquera peu de processus cognitifs (langagiers et/ou non-langagiers) tandis qu'une forte demande associée à la compréhension d'un message (e.g., écouter et comprendre un cours, converser) engagera davantage de processus cognitifs. Une étude de Meyer, Friederici, et von Cramon (2000) supporte ce postulat. En, effet, dans cette étude, les auteurs ont demandé à un groupe de participants de juger si des phrases qui leur étaient présentées étaient correctes grammaticalement ou non. A un second groupe, les auteurs ont demandé de réaliser la même tâche mais en plus de corriger mentalement les phrases qui présentaient une erreur grammaticale. L'activité BOLD des participants était enregistrée au cours de cette tâche. Les auteurs ont ainsi observé le recrutement de davantage de régions cérébrales (notamment des régions de l'hémisphère droit) pour le groupe ayant pour consigne supplémentaire de corriger mentalement les phrases incorrectes. Ce résultat suggère que la simple demande liée à la tâche va modifier les mécanismes à l'œuvre lors du traitement langagier. Cette observation est particulièrement frappante en imagerie cérébrale puisque l'activation de régions cérébrales supplémentaires apparaît. Au niveau comportemental, il serait possible que davantage de processus soient engagés mais qu'aucune différence notable n'apparaisse sur des mesures de temps de réaction ou de bonnes réponses. Ainsi, la

prise en compte de l'objectif de la compréhension serait importante en ce qu'il va influencer les processus cognitifs engagés.

Perspectives

Les différentes études menées dans ce travail de thèse ouvrent à certaines perspectives pour des recherches futures et ne constituent que les premiers pas vers l'évaluation des interactions entre la compréhension du langage et les processus de contrôle cognitif. En effet, les Etudes 1 et 4 nous montrent que l'évaluation indirecte de la relation entre ces mécanismes pourraient permettre une caractérisation fine des processus de contrôle engagés lors de la compréhension. Plus particulièrement, une telle caractérisation serait importante à nos yeux afin de comprendre quelles fonctions exécutives spécifiques apparaissent dans quelles situations de compréhension. Ensuite, les Etudes 2 et 3 nous montrent que l'utilisation des paradigmes de double tâche est prometteuse pour l'évaluation d'une telle interaction, mais qu'il est nécessaire d'être prudent quant aux manipulations linguistiques réalisées. Cette dernière remarque mise en lien avec les résultats et difficultés rencontrées dans les études en sEEG réalisées suggère que l'aspect écologique des traitements linguistiques évalués est essentiel et à ne pas négliger dans les recherches futures.

Plus concrètement, l'étude de l'interaction entre les processus de compréhension du langage et de contrôle cognitif pourrait mener à de nouvelles perspectives de réhabilitation de certains troubles et déficits du langage. En effet, les études proposant un entraînement des capacités de contrôle cognitif et évaluant l'influence d'un tel entraînement sur les performances de compréhension du langage sont encourageantes (Carretti et al., 2013; Hussey et al., 2017; Novick et al., 2014). Au niveau cérébral, l'étude de stimulation transcrânienne à courant direct (tDCS) réalisée par Hussey et collaborateurs (2015) montrant une augmentation des performances de traitement de phrases suite à la pré-activation de région cérébrale spécifique au contrôle supporte la vision qu'une amélioration du traitement de contrôle cognitif pourrait aider au traitement du langage. De plus, l'observation chez des patients atteints d'aphasie d'une réorganisation cérébrale avec un recrutement plus important des régions frontales et pariétales suggère que l'implication de tels mécanismes exécutifs importants pour la réhabilitation des processus de compréhension. Ces études mises en lien avec les résultats présentés dans ce travail de thèse montrant une relation étroite entre les mécanismes de contrôle cognitif et

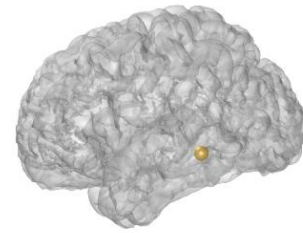
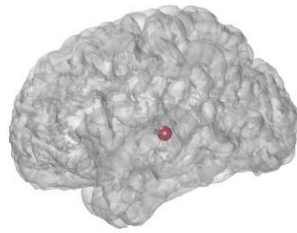
ceux de compréhension ouvrent donc à des perspectives de réhabilitation encourageantes et prometteuses.

Conclusion

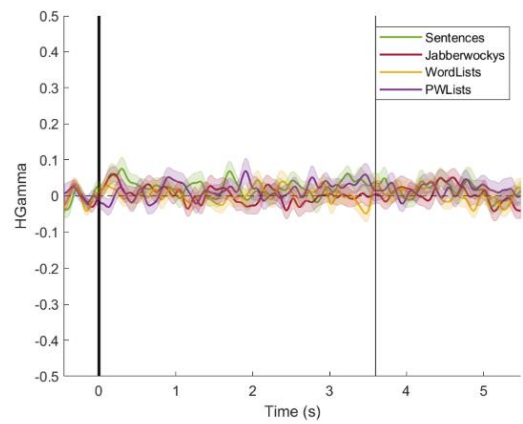
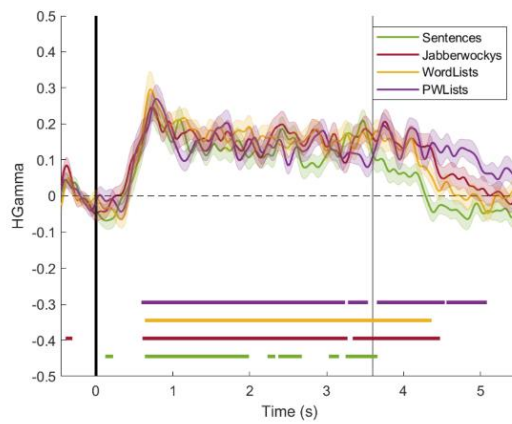
Nos résultats apportent de nouveaux arguments sur les liens entre la compréhension du langage oral et le contrôle cognitif. L'implication de ces processus de contrôle interviendrait lorsque la demande cognitive liée à la compréhension est importante. Cette demande peut être liée à des traitements sémantiques et/ou syntaxiques plus complexes (ou moins fréquents) dont la dissociation fonctionnelle d'un point de vue neural semble se refléter au niveau spectral. De plus, nos résultats suggèrent d'une part que les mécanismes de contrôle impliqués dans le langage sont spécifiquement liés à la demande de la tâche de compréhension et d'autre part que les liens entre ces deux systèmes sont bidirectionnels. Ces observations, bien qu'elles nécessitent d'être répliquées, ont permis de mieux spécifier les mécanismes cognitifs et neuraux de la compréhension du langage oral et ouvrent à des perspectives d'intervention sur les difficultés de compréhension du langage oral.

Annexes

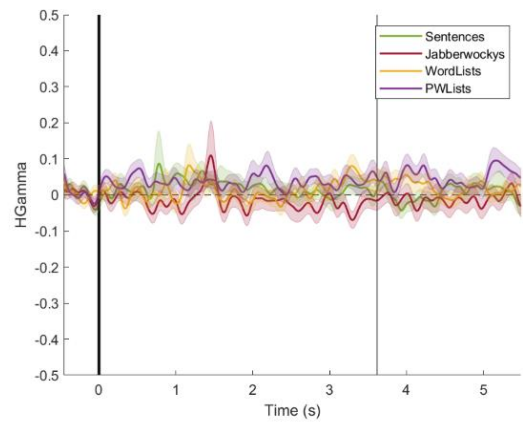
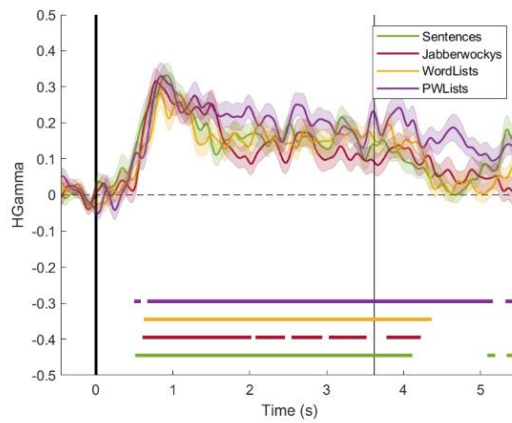
Annexe 1 : Enveloppes de dynamiques cérébrales Etude 5



P1



P2



P3

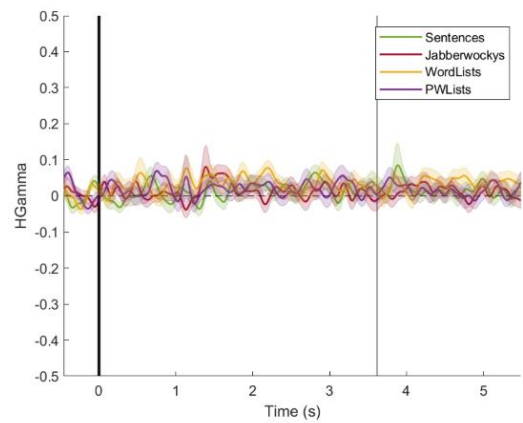
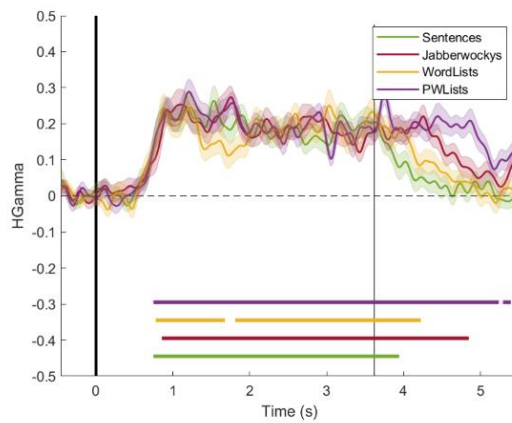


Figure A1 : Exemple de l'activité en haute fréquence gamma pour les quatre types de stimuli présentés dans l'étude 5 (phrases, en vert, jabberwockys en rouge, listes des mots en jaune et listes de pseudomots en violet)

Nous présentons ici l'activité pour trois patients implantés au niveau du gyrus temporal supérieur et du gyrus temporal moyen. Les traits horizontaux présentés sur les courbes représentent les effets significatifs de la comparaison de chaque condition versus la baseline. Le trait vertical présenté à 3 seconde et demi (approximativement) représente la moyenne de la fin de la stimulation auditive des quatre conditions.

Annexe 2 : Complément étude 7 en cours : Introduction, méthode, et analyses des données

Evaluation of the interaction between language comprehension and attentional control networks in stereo-EEG

Introduction

The implication of nonspecific language mechanisms for decoding and understanding language is a matter of debate. Indeed, several authors suggested that, in all circumstances, language comprehension is performed by the language-specific mechanisms (Diachek et al., 2020; Ryskin et al., 2020; Shain et al., 2019). Other authors argued that domain-general mechanisms are involved in language processing when comprehension is difficult and challenging (e.g., speech in noise, ambiguity situations at the level of lexical or syntactic information) (Hsu et al., 2017; Novick et al., 2010). Others proposed that executive mechanisms are involved in all comprehension situations and their implication is related to task demands. For instances, if the task does not require a deep comprehension, an automatic processing of stimuli could be sufficient. Nevertheless, if a deep comprehension is needed, for instances for a direct response to a request, this automatic processing does not allow a correct interpretation. In this view, the language brain network should share machinery with other cognitive functions such as executive control abilities.

In line with the claim of a close relation between language comprehension and cognitive control mechanisms several studies explored brain networks involved during both language and cognitive control tasks (including inhibition, working memory, attention or conflict resolution). For instances, in a fMRI proposed by Musz and Thompson-Schill, 2017), authors showed a domain general cognitive control implication during a sentence reading task in which lexical ambiguity was manipulated. Specifically, they showed that conflict resolution processes for lexical ambiguity involved similar prefrontal brain signatures than those observed during classical conflict resolution of a Stroop interference. They showed that the left ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC, including the pars triangularis and the pars

opercularis of the inferior frontal gyrus- IFG) was sensitive to semantic conflict. Similar, January, Trueswell, and Thompson-Schill (2009), also using fMRI, showed an overlap between BOLD activity in the posterior left IFG during high conflict sentence comprehension and incongruent Stroop trials (see also Novick et al., 2005). This overlap suggests that cognitive processes during language resolution and the executive inhibitory processes share the same brain structure (see Ben-Shachar et al., 2003; Blank et al., 2014). It is proposed that the VLPFC is an important anatomical region for attentional control processing and relevant task information processing (Perrone-Bertolotti et al., 2020). Indeed, in a recent study Perrone-Bertolotti et al. (2020) showed that the VLPFC takes part of a cerebral network playing a “gate-keeper” role during several cognitive tasks (including language task) by processing relevant information. Nevertheless, current data showed that cognitive control is supported by a larger cerebral network called Domain-General Network –DGN– (or *Multiple Demand Network*) which includes not only prefrontal cortex but also parietal network (Dosenbach et al., 2006; Geranmayeh et al., 2014). The extent of the DGN fronto-parietal network implication during language comprehension is an open question DGN (Fedorenko, 2014; Ye & Zhou, 2009b for reviews)

In the present study we were interested in characterizing the functional dynamic of brain regions that present or not a selectivity for language processing using sEEG recording. Indeed, we were interested in evaluated the relationship between the language and the cognitive control networks. More specifically, we functionally defined brain network selectivity using different auditory speech conditions: native language (French), foreign language (Soumi) for the French monolingual, and stereotypical lists of words (French alphabet and number). We identified selective brain networks for each of these types of auditory stimuli and characterized these networks during attentional tasks. Two major attentional tasks were included: one involving language stimuli (attentional reading task) and another without language stimuli (a visual search task).

Method

Participants

Eighteen patients presenting focal drug resistant epilepsy participated in this study. They underwent standard pre-surgical evaluations (between 2012 and 2019) with

intracerebral recordings at Grenoble-Alpes University Hospital (see Table 1). The inclusion in the present study was related with the cognitive tasks performed during the functional mapping performed using SEEG recordings (see Lachaux et al., 2012; Vidal et al., 2011). All patients included in this study completed language and attentional tasks. Specifically, they performed three different task: an auditory comprehension task, a selective reading task and a visual search task. The auditory and reading tasks involved language processing while the visual search task was mainly attentional and did not involve language processing. The study has been approved by the National French Ethical Committee (CPP Sud-Est V n° 09-CHUG-12) and patients provided written informed consent and.

Electrode implantation

Each patient was stereotactically implanted with 11 to 15 semi-rigid, multilead electrodes. Depending on the target structure, each electrode had a diameter of 0.8 mm and consisted of 8–18 contact leads 2 mm wide and 1.5 mm apart (DIXI Medical, Besançon, France). Electrode implantation were strictly related with individual clinical hypotheses. A preoperative MRI and post-operative MRI or CT scan were co-registered to assess the locations of the electrode contacts for each patient using a coordinate system in relation to the anterior commissure / posterior commissure plane. Electrode contact positions were finally expressed in the Montreal Neurological Institute (MNI) coordinate system to allow group analyses after brain spatial normalization using Statistical Parametric Mapping 12 software (SPM12, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, University College London, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm). Visual inspection of the contact locations was also used to check whether each electrode contact was located in grey or white matter.

SEEG recordings

SEEG recordings were performed using a video-EEG monitoring system (Micromed, Treviso, Italy) that allowed to simultaneously record up to 256 monopolar contacts. The sampling rate was set to 1024 Hz with an acquisition band-pass filter between 0.1 and 200 Hz. A bipolar montage between adjacent contacts of the same electrode was used to improve sensitivity to local current generators and filter out distant generators. Coordinates of virtual bipolar contacts used in the data analysis (see below) are at an equal distance between two successive contacts.

Cognitive tasks and procedures

The experimental procedure took place in patients' hospital room. Tasks were administered via the Presentation stimulus delivery software (Neurobehavioral Systems ®).

Auditory comprehension task (*AUDI*)

An auditory comprehension task, adapted from Belin et al. (2000), was used as a functional localizer (Vidal et al., 2011) and has been used in a previous study (Perrone-Bertolotti et al., 2012). Stimuli consisted of different auditory sound streams of distinct perceptual categories. Auditory stimuli were: speech and speech-like categories; categories including nonspeech-like human sound, environment sound, animals and instrumental music. For the specific question of the present study we only focused on three speech-like categories: familiar language (French), unfamiliar language (Suomi) and stereotypic language (a stream of continuous pronunciation of the letter of alphabet and a series of numbers). Participants listened to these auditory streams (10-14 seconds long) with the prior instruction that three of them would be presented again at the end of the task together with three novel sounds and that they should be able to detect previously played items. They were instructed to close their eyes while listening to three stimuli of each category lasting 12 seconds each, along with three 12 seconds intervals with no stimulation, serving as a baseline (i.e., Silence). Inter-stimulus interval consisted of 3 seconds of silence (no stimulus). The sequence was pseudorandomized to ensure that two stimuli of the same category did not follow each other. Sequences were delivered binaurally via earphones. All acoustic signals had the same intensity, quantified by their root mean square, set at a comfortable sound level.

Attentional reading task (*AREAD*)

The attentional reading task (AREAD) was adapted from Nobre et al. (1998). Participants were presented with two intermixed stories, shown word by word at a rapid rate (150ms every 700ms) (Figure A.2.1). One of the stories was written in gray and the other in white, both written on a black background. Consecutive words with the same color formed a meaningful and simple short story in French. Participants were instructed to read the gray story to report it at the end of the task and to ignore the white one. A total of 400 words were presented, 200 for each of the two stories: Attended condition (gray words) and Ignored condition (white words). The 400 words were presented randomly in order to avoid prediction of attended or ignored story.

However, the randomization was constrained to forbid series of more than three consecutive words of the same color. After the task, participants were asked questions about the attended text, which could not have been answered from general knowledge. Stimuli were presented to the participants on a 17-inch computer screen at a 60 cm viewing distance (average visual angle of 26 degrees).

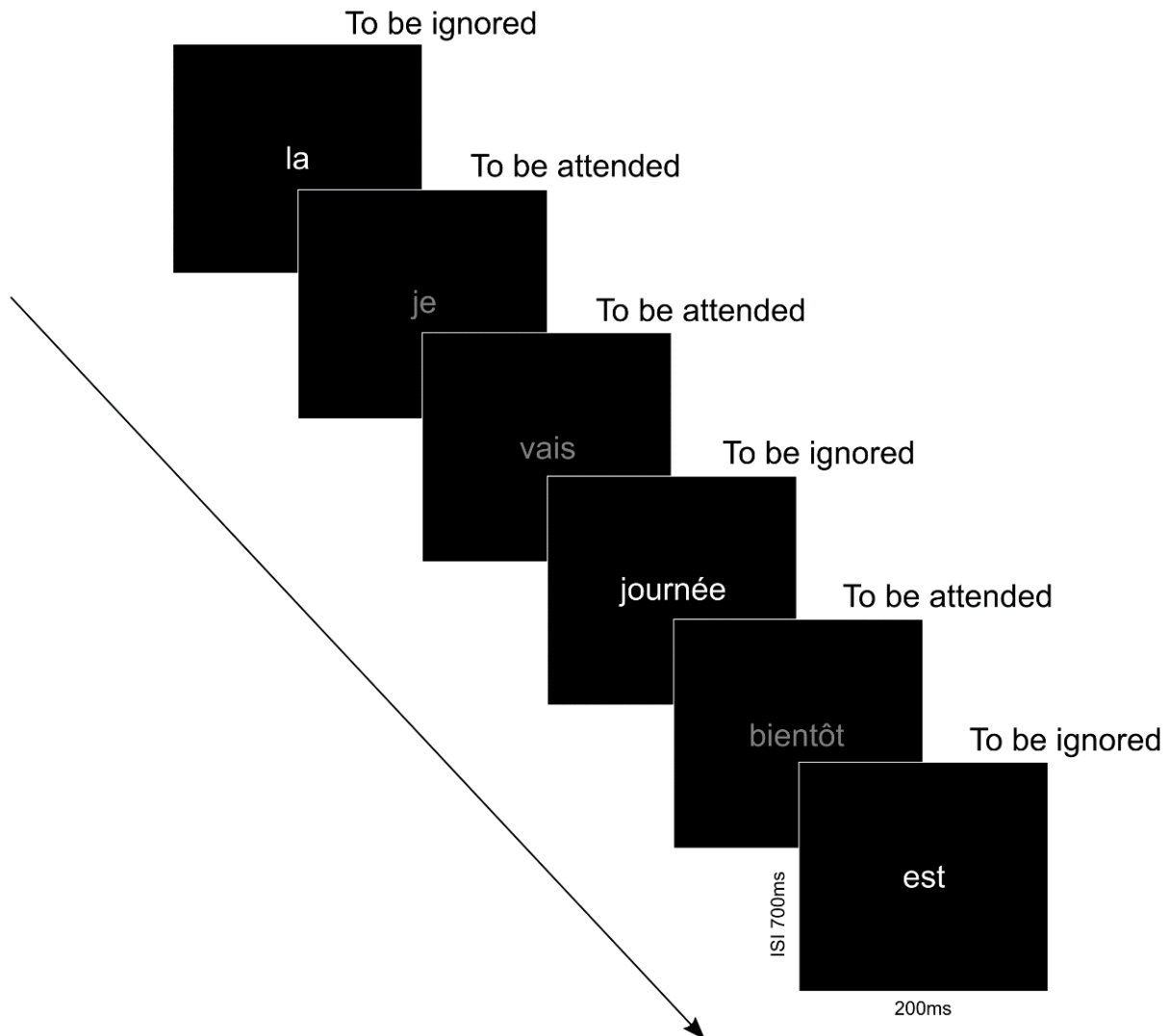


Figure A2.1: Experimental design used in the AREAD task

Visual search task (VISE)

This task was adapted from classical visual search test developed by Treisman and Gelade (1980) (called in short VISE). Each stimulus consisted of an array of 36 letters (6 x 6 square array with 35 Ls and one T randomly arranged). Patients were instructed to locate as fast as possible the “T” and press a response button as soon as they found

it. They had to respond by pressing one of four buttons on a joystick to indicate whether the target was located in the upper left, upper right, lower left, or lower right part of the display. Two main experimental conditions were contrasted corresponding to two difficulty levels. In the Easy condition (“pop-out” condition), the target “T” was gray among black distractors while in the Difficult condition (research condition), both distractors and target were gray (Figure A2.2). The task contained 192 trials (96 Easy and 96 Difficult) presented randomly. Typical trial started with a fixation cross for 100ms followed by the visual stimuli lasting up to 3000ms. Trials were interleaved with an ISI of 1000ms. This task was used to evaluate neural responses of sustained attention during search, and has been analyzed in a previous study (Ossandon et al., 2012).

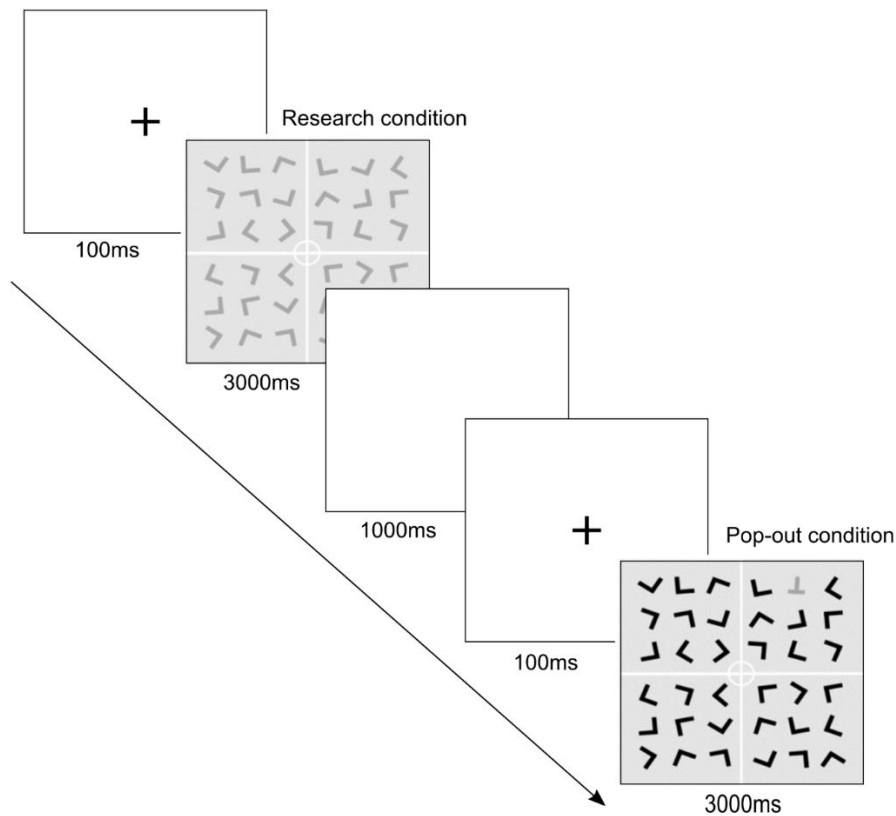


Figure A2.2: Experimental design used in the VISE task

Analyses

Data preprocessing and data analyses were performed using FieldTrip toolbox (Oostenveld et al., 2011) and custom scripts on Matlab (version 9.7.0, Matlab © R2019b)

Prepossessing

For the three tasks raw data were transformed into high frequency activity (HFA) amplitudes with the following procedure (Perrone-Bertolotti et al., 2012; Vidal et al., 2011):

Step 1) continuous sEEG signals were first bandpass-filtered in successive 10 Hz wide frequency bands from 50Hz to 150Hz using a zero-phase forward and reverse filter. Step 2) for each bandpass-filtered signal we computed the envelope using standard Hilbert transform (Le Van Quyen et al., 2001). Step 3) for each band this envelope signal was divided by its means across the entire recording session and multiplied by 100. This procedure yields instantaneous envelope values expressed in percentage (%) of the mean. Step 4) the amplitude envelope signals for consecutive frequency bands were averaged together to provide one single time series (HFA) across the entire session. Step 5) The obtained envelope was epoched into data segments centered around each stimulus and baseline corrected (the baseline corresponded to the 1500ms preceding the beginning of audio presentation). Specifically, for the AREAD and VISE tasks, a downsampling (to 64Hz) and Gaussian filter were applied before epoching the data (i.e., before step 5). Also, the baseline for these two task was set to 200ms.

Statistical analyses

Auditory comprehension task (AUDI)

This task was used to map functional regions in line with speech and speech-like item processing. To do so, the three 12 second were segmented into 20 trials for each condition, resulting in 60 trials per condition. subsequently, the mean power over trials was calculated and compared to the mean power of the silence condition. This operation was repeated across all contacts using *t*-tests and correcting for multiple comparisons using false discovery rate (FDR) procedure (Benjamini & Hochberg, 1995). This comparison allowed us to identify contacts that responded significantly more than silence and those that were involved in processing speech/speech-like items. Thereafter, we compared the two conditions to identify the specific cortical networks involved in processing native speech (French) vs foreign speech (Suomi). This comparison identifies neural response modulations by semantic processing.

Attentional reading task (AREAD)

We specifically evaluated neural responses that were selective for each of the speech conditions in the AUDI task. They consisted in non-parametric Wilcoxon tests between the Attended and Ignored reading conditions for each time sample. *P*-values were corrected for multiple comparison over time using FDR procedure (Benjamini & Hochberg, 1995).

Visual search task (VISE)

We specifically evaluated neural responses that were selective for each of the speech condition in the AUDI task. They consisted in non-parametric Wilcoxon tests between the Easy and Difficult conditions for each time sample. *P*-values were corrected for multiple comparison over time using FDR procedure.

Bibliographie

- Abutalebi, J., Guidi, L., Borsa, V., Canini, M., Della Rosa, P. A., Parris, B. A., & Weekes, B. S. (2015). Bilingualism provides a neural reserve for aging populations. *Neuropsychologia*, *69*, 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.01.040>
- Adank, P. (2012). The neural bases of difficult speech comprehension and speech production: Two Activation Likelihood Estimation (ALE) meta-analyses. *Brain and Language*, *122*(1), 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.04.014>
- Alaşam, Ö., Menzel, W., & Staron, T. (2019). How Does Visual Complexity Influence Predictive Language Processing in a Situated Context? *Proceedings of the 15th Conference on Natural Language Processing*.
- Alatorre-Cruz, G. C., Silva-Pereyra, J., Fernández, T., Rodríguez-Camacho, M. A., Castro-Chavira, S. A., & Sanchez-Lopez, J. (2018). Effects of Age and Working Memory Load on Syntactic Processing: An Event-Related Potential Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00185>
- Albinet, C. T., Boucard, G., Bouquet, C. A., & Audiffren, M. (2012). Processing speed and executive functions in cognitive aging: How to disentangle their mutual relationship? *Brain and Cognition*, *79*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.001>
- Alladi, S., Bak, T. H., Duggirala, V., Surampudi, B., Shailaja, M., & Shukla, A. K. (2013). *Bilingualism delays age at onset of dementia, independent of education and immigration status*. 7.
- Alladi, S., Bak, T. H., Mekala, S., Rajan, A., Chaudhuri, J. R., Mioshi, E., Krowvidi, R., Surampudi, B., Duggirala, V., & Kaul, S. (2016). Impact of Bilingualism on Cognitive Outcome After Stroke. *Stroke*, *47*(1), 258–261. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.115.010418>
- Allopenna, P. D., Magnuson, J. S., & Tanenhaus, M. K. (1998). Tracking the Time Course of Spoken Word Recognition Using Eye Movements: Evidence for Continuous Mapping Models. *Journal of Memory and Language*, *38*(4), 419–439. <https://doi.org/10.1006/jmla.1997.2558>
- Altmann, G. T. M., & Kamide, Y. (1999). Incremental interpretation at verbs: Restricting the domain of subsequent reference. *Cognition*, *73*(3), 247–264. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00059-1)
- Altmann, G. T. M., & Kamide, Y. (2007). The real-time mediation of visual attention by language and world knowledge: Linking anticipatory (and other) eye movements to linguistic processing. *Journal of Memory and Language*, *57*(4), 502–518. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2006.12.004>
- Altmann, G. T. M., & Kamide, Y. (2009). Discourse-mediation of the mapping between language and the visual world: Eye movements and mental representation. *Cognition*, *111*(1), 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.12.005>
- Altmann, G. T. M., & Mirković, J. (2009). Incrementality and Prediction in Human Sentence Processing. *Cognitive Science*, *33*(4), 583–609. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2009.01022.x>
- Alvarez, J. A., & Emory, E. (2006). Executive Function and the Frontal Lobes: A Meta-Analytic Review. *Neuropsychology Review*, *16*(1), 17–42. <https://doi.org/10.1007/s11065-006-9002-x>
- Anderson, P. (2002). Assessment and Development of Executive Function (EF) During Childhood. *Child Neuropsychology*, *8*(2), 71–82. <https://doi.org/10.1076/chin.8.2.71.8724>
- Anderson, V. (2008). Attention Deficits and the Frontal Lobes. In *Execution Functions and the Frontal Lobes* (Taylor&Francis, pp. 317–344).

- Anderson, V., Anderson, P., Jacobs, R., & Smith, M. S. (2008). Development and assessment of executive function: From preschool to adolescence. In *Executive Functions and the Frontal Lobes: A Lifespan Perspective*.
- Antón, E., Carreiras, M., & Duñabeitia, J. A. (2019). The impact of bilingualism on executive functions and working memory in young adults. *PLOS ONE*, *14*(2), e0206770. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206770>
- Arnal, L. H., Wyart, V., & Giraud, A.-L. (2011). Transitions in neural oscillations reflect prediction errors generated in audiovisual speech. *Nature Neuroscience*, *14*(6), 797–801. <https://doi.org/10.1038/nn.2810>
- Baciu, M., Boudiaf, N., Cousin, E., Perrone-Bertolotti, M., Pichat, C., Fournet, N., Chainay, H., Lamalle, L., & Krainik, A. (2016). Functional MRI evidence for the decline of word retrieval and generation during normal aging. *AGE*, *38*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11357-015-9857-y>
- Bader, M., & Meng, M. (1999). Subject-Object Ambiguities in German Embedded Clauses: An Across-the-Board Comparison. *Journal of Psycholinguistic Research*, *28*(2), 121–143.
- Bahlmann, J., Mueller, J. L., Makuuchi, M., & Friederici, A. D. (2011). Perisylvian Functional Connectivity during Processing of Sentential Negation. *Frontiers in Psychology*, *2*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00104>
- Bahlmann, J., Rodriguez-Fornells, A., Rotte, M., & Münte, T. F. (2007). An fMRI study of canonical and noncanonical word order in German. *Human Brain Mapping*, *28*(10), 940–949. <https://doi.org/10.1002/hbm.20318>
- Bak, T. H., Nissan, J. J., Allerhand, M. M., & Deary, I. J. (2014). Does bilingualism influence cognitive aging?: Bilingualism and Aging. *Annals of Neurology*, *75*(6), 959–963. <https://doi.org/10.1002/ana.24158>
- Baltaretu, A. A., & Chambers, C. G. (2018). When criminals blow up. . . Balloons. Associative and combinatorial information in older and younger listeners' generation of on-line predictions. *Proceedings of the 2018 Cognitive Science Society*.
- Bar, M. (2007). The proactive brain: Using analogies and associations to generate predictions. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(7), 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.05.005>
- Barac, R., & Bialystok, E. (2012). Bilingual Effects on Cognitive and Linguistic Development: Role of Language, Cultural Background, and Education: **Language, Culture, Education, and Bilingualism**. *Child Development*, *83*(2), 413–422. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01707.x>
- Barkley, R. A. (1997). Behavioral Inhibition, Sustained Attention, and Executive Functions: Constructing a Unifying Theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, *121*(1), 65–94.
- Barrett, M. (1999). An introduction to the nature of language and to the central themes and issues in the study of language development. In *The development of language* (pp. 1–24).
- Basavanahalli Jagadeesh, A., & Kumar U, A. (2019). Effect of informational masking on auditory working memory: Role of linguistic information in the maskers. *Hearing, Balance and Communication*, *17*(4), 270–279. <https://doi.org/10.1080/21695717.2019.1630980>
- Bastiaanse, R., & Edwards, S. (2004). Word order and finiteness in Dutch and English Broca's and Wernicke's aphasia. *Brain and Language*, *89*(1), 91–107. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00306-7](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00306-7)

- Bastiaansen, M., & Hagoort, P. (2006). Oscillatory neuronal dynamics during language comprehension. In *Progress in Brain Research* (Vol. 159, pp. 179–196). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)59012-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)59012-0)
- Bastiaansen, M., & Hagoort, P. (2015). Frequency-based Segregation of Syntactic and Semantic Unification during Online Sentence Level Language Comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(11), 2095–2107. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00829
- Bastiaansen, M., Linden, M. van der, Keurs, M. ter, Dijkstra, T., & Hagoort, P. (2005). Theta Responses Are Involved in Lexical—Semantic Retrieval during Language Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(3), 530–541. <https://doi.org/10.1162/0898929053279469>
- Bastiaansen, M., Magyari, L., & Hagoort, P. (2010). Syntactic Unification Operations Are Reflected in Oscillatory Dynamics during On-line Sentence Comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(7), 1333–1347. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21283>
- Bastiaansen, M., Oostenveld, R., Jensen, O., & Hagoort, P. (2008). I see what you mean: Theta power increases are involved in the retrieval of lexical semantic information. *Brain and Language*, 106(1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2007.10.006>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Belin, P., Zatorre, R. J., Lafaille, P., Ahad, P., & Pike, B. (2000). *Voice-selective areas in human auditory cortex*. 403, 4.
- Beltrán, D., Muñetón-Ayala, M., & de Vega, M. (2018). Sentential negation modulates inhibition in a stop-signal task. Evidence from behavioral and ERP data. *Neuropsychologia*, 112, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.004>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society*, 57(1), 289–300.
- Ben-Shachar, M., Hendlar, T., Kahn, I., Ben-Bashat, D., & Grodzinsky, Y. (2003). The Neural Reality of Syntactic Transformations: Evidence From Functional Magnetic Resonance Imaging. *Psychological Science*, 14(5), 433–440. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.01459>
- Ben-Shachar, M., Palti, D., & Grodzinsky, Y. (2004). Neural correlates of syntactic movement: Converging evidence from two fMRI experiments. *NeuroImage*, 21(4), 1320–1336. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.11.027>
- Bentin, S., Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1995). Semantic processing and memory for attended and unattended words in dichotic listening: Behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1).
- Bever, T. G. (1970). The Cognitive Basis for Linguistic Structures. In *Cognition and the Development of Language* (J. R. Hayes, pp. 279–362).
- Bialystok, E. (2007). Cognitive Effects of Bilingualism: How Linguistic Experience Leads to Cognitive Change. *International Journal of Bilingual Education and Bilingualism*, 10(3), 210–223. <https://doi.org/10.2167/beb441.0>
- Bialystok, E. (2015). Bilingualism and the Development of Executive Function: The Role of Attention. *Child Development Perspectives*, 9(2), 117–121. <https://doi.org/10.1111/cdep.12116>
- Bialystok, E., Craik, F. I. M., & Ryan, J. (2006). Executive control in a modified antisaccade task: Effects of aging and bilingualism. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32(6), 1341–1354. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.32.6.1341>

- Bialystok, E., & Majumder, S. (1998). The relationship between bilingualism and the development of cognitive processes in problem solving. *Applied Psycholinguistics*, *19*(1), 69–85. <https://doi.org/10.1017/S0142716400010584>
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where Is the Semantic System? A Critical Review and Meta-Analysis of 120 Functional Neuroimaging Studies. *Cerebral Cortex*, *19*(12), 2767–2796. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp055>
- Bishop, D. V. M., Nation, K., & Patterson, K. (2014). When words fail us: Insights into language processing from developmental and acquired disorders. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *369*(1634), 20120403. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0403>
- Bishop, D. V. M., & Norbury, C. F. (2005). Executive functions in children with communication impairments, in relation to autistic symptomatology: I: Generativity. *Autism*, *9*(1), 7–27. <https://doi.org/10.1177/1362361305049027>
- Bishop, D. V. M., Snowling, M. J., Thompson, P. A., Greenhalgh, T., & CATALISE consortium. (2016). CATALISE: A Multinational and Multidisciplinary Delphi Consensus Study. Identifying Language Impairments in Children. *PLOS ONE*, *11*(7), e0158753. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158753>
- Blank, I., Kanwisher, N., & Fedorenko, E. (2014). A functional dissociation between language and multiple-demand systems revealed in patterns of BOLD signal fluctuations. *Journal of Neurophysiology*, *112*(5), 1105–1118. <https://doi.org/10.1152/jn.00884.2013>
- Blumenfeld, H. K., & Marian, V. (2011). Bilingualism influences inhibitory control in auditory comprehension. *Cognition*, *118*(2), 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.10.012>
- Bögels, S., Schriefers, H., Vonk, W., Chwilla, D. J., & Kerkhofs, R. (2010). The Interplay between Prosody and Syntax in Sentence Processing: The Case of Subject- and Object-control Verbs. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(5), 1036–1053. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21269>
- Borella, E., Carretti, B., & Beni, R. D. (2008). Working memory and inhibition across the adult life-span. *Acta Psychologica*, *13*.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.01.032>
- Bornkessel-Schlesewsky, I., Schlesewsky, M., & Cramon, D. Y. von. (2009). Word order and Broca's region: Evidence for a supra-syntactic perspective. *Brain and Language*, *111*(3), 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.09.004>
- Botvinick, M. M., Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., & Cohen, J. D. (2001). Conflict Monitoring and Cognitive Control. *Psychological Review*, *108*(3), 624–652.
- Boulenger, V., Hoen, M., Ferragne, E., Pellegrino, F., & Meunier, F. (2010). Real-time lexical competitions during speech-in-speech comprehension. *Speech Communication*, *52*(3), 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2009.11.002>
- Braver, T. S., Barch, D. M., Keys, B. A., Carter, C. S., Cohen, J. D., Kaye, J. A., Janowsky, J. S., Taylor, S. F., Yesavage, J. A., Mummenthaler, M. S., Jagust, W. J., & Reed, B. R. (2001). Context processing in older adults: Evidence for a theory relating cognitive control to neurobiology in healthy aging. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(4), 746–763. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.130.4.746>
- Broca, M. P. (1861). *REMARQUES SUR LE SIÈGE DE LA FACULTÉ DU LANGAGE ARTICULÉ, SUIVIES D'UNE OBSERVATION D'APHÉMIE (PERTE DE LA PAROLE)*. 18.

- Brockmole, J. R., & Logie, R. H. (2013). Age-Related Change in Visual Working Memory: A Study of 55,753 Participants Aged 8–75. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00012>
- Broderick, M. P., Anderson, A. J., & Lalor, E. C. (2019). Semantic Context Enhances the Early Auditory Encoding of Natural Speech. *The Journal of Neuroscience*, 39(38), 7564–7575. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0584-19.2019>
- Brown, E. C., Muzik, O., Rothermel, R., Matsuzaki, N., Juhász, C., Shah, A. K., Atkinson, M. D., Fuerst, D., Mittal, S., Sood, S., Diwadkar, V. A., & Asano, E. (2012). Evaluating reverse speech as a control task with language-related gamma activity on electrocorticography. *NeuroImage*, 60(4), 2335–2345. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.02.040>
- Brown-Schmidt, S. (2009). *The role of executive function in perspective taking during online language comprehension*. 16(5), 893–900. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.5.893>
- Brungart, D. S. (2001). Informational and energetic masking effects in the perception of two simultaneous talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(3), 1101–1109. <https://doi.org/10.1121/1.1345696>
- Brungart, D. S., Chang, P. S., Simpson, B. D., & Wang, D. (2006). Isolating the energetic component of speech-on-speech masking with ideal time-frequency segregation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(6), 4007–4018. <https://doi.org/10.1121/1.2363929>
- Brungart, D. S., Simpson, B. D., Ericson, M. A., & Scott, K. R. (2001). Informational and energetic masking effects in the perception of multiple simultaneous talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(5), 2527–2538. <https://doi.org/10.1121/1.1408946>
- Burchert, F., & De Bleser, R. (2004). Passives in agrammatic sentence comprehension: A German study. *Aphasiology*, 18(1), 29–45. <https://doi.org/10.1080/02687030344000409>
- Burke, D. M., & Shafto, M. A. (2008). *Language and Aging* (pp. 373–443).
- Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2007). Top-Down Versus Bottom-Up Control of Attention in the Prefrontal and Posterior Parietal Cortices. *Science*, 315(5820), 1860–1862. <https://doi.org/10.1126/science.1138071>
- Calabria, M., Costa, A., Green, D. W., & Abutalebi, J. (2018). Neural basis of bilingual language control: Bilingual language control. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1426(1), 221–235. <https://doi.org/10.1111/nyas.13879>
- Camilleri, J. A., Müller, V. I., Fox, P., Laird, A. R., Hoffstaedter, F., Kalenscher, T., & Eickhoff, S. B. (2018). Definition and characterization of an extended multiple-demand network. *NeuroImage*, 165, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.10.020>
- Canolty, R. T., Ganguly, K., Kennerley, S. W., Cadieu, C. F., Koepsell, K., Wallis, J. D., & Carmena, J. M. (2010). Oscillatory phase coupling coordinates anatomically dispersed functional cell assemblies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(40), 17356–17361. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008306107>
- Caplan, D. (2001). Functional Neuroimaging Studies of Syntactic Processing. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(3), 297–320.
- Caplan, D., Alpert, N., & Waters, G. (1998). Effects of Syntactic Structure and Propositional Number on Patterns of Regional Cerebral Blood Flow. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(4), 541–552. <https://doi.org/10.1162/089892998562843>
- Caplan, D., Alpert, N., Waters, G., & Olivieri, A. (2000). Activation of Broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation. *Human Brain Mapping*, 9(2), 65–71. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(200002\)9:2<65::AID-HBM1>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(200002)9:2<65::AID-HBM1>3.0.CO;2-4)

- Carlson, S. M., Davis, A. C., & Leach, J. G. (2005). Less Is More: Executive Function and Symbolic Representation in Preschool Children. *Psychological Science*, *16*(8), 609–616. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01583.x>
- Carlson, S. M., Mandell, D. J., & Williams, L. (2004). Executive Function and Theory of Mind: Stability and Prediction From Ages 2 to 3. *Developmental Psychology*, *40*(6), 1105–1122. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.6.1105>
- Carlson, S. M., Moses, L. J., & Claxton, L. J. (2004). Individual differences in executive functioning and theory of mind: An investigation of inhibitory control and planning ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *87*(4), 299–319. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.01.002>
- Carpenter, P. A., & Just, M. A. (1975). Sentence comprehension: A psycholinguistic processing model of verification. *Psychological Review*, *82*(1), 45–73. <https://doi.org/10.1037/h0076248>
- Carpenter, P. A., & Just, M. A. (1988). The Role of Working Memory in Language Comprehension. *Psychology Press.*, 51–88.
- Carpenter, P. A., Just, M. A., Keller, T. A., Eddy, W. F., & Thulborn, K. R. (1999). Time Course of fMRI-Activation in Language and Spatial Networks during Sentence Comprehension. *NeuroImage*, *10*(2), 216–224. <https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0465>
- Carreiras, M., Ferrand, L., Grainger, J., & Perea, M. (2005). Sequential Effects of Phonological Priming in Visual Word Recognition. *Psychological Science*, *16*(8), 585–589. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01579.x>
- Carretti, B., Borella, E., Zavagnin, M., & de Beni, R. (2013). Gains in language comprehension relating to working memory training in healthy older adults: Working memory training in older adults. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, *28*(5), 539–546. <https://doi.org/10.1002/gps.3859>
- Casey, B. J., Giedd, J. N., & Thomas, K. M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, *54*(1–3), 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00058-2)
- Casey, B. J., Jones, R., & Hare, T. (2008). The adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1124*, 111–126.
- Chambers, C. G., Tanenhaus, M. K., & Magnuson, J. S. (2004). Actions and Affordances in Syntactic Ambiguity Resolution. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *30*(3), 687–696. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.30.3.687>
- Chan, C. G., Yow, W. Q., & Oei, A. (2020). Active bilingualism in aging: Balanced bilingualism usage and less frequent language switching relate to better conflict monitoring and goal maintenance ability. *The Journals of Gerontology: Series B*, *75*(9), 231–241.
- Chang, I. (2020). Influences of executive function, language comprehension, and fluency on young children's reading comprehension. *Journal of Early Childhood Research*, *18*(1), 44–57. <https://doi.org/10.1177/1476718X19875768>
- Chen, L., & Boland, J. E. (2008). Dominance and context effects on activation of alternative homophone meanings. *Memory & Cognition*, *36*(7), 1306–1323. <https://doi.org/10.3758/MC.36.7.1306>
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures* (14. printing). Mouton Publ.
- Chomsky, N. (1980). Rules and representations. *Behavioral and Brain Sciences*, *3*(1), 1–15.
- Chomsky, N. (1986). *Barriers*. MIT Press.

- Christensen, K. R. (2009). Negative and affirmative sentences increase activation in different areas in the brain. *Journal of Neurolinguistics*, 22(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2008.05.001>
- Christensen, K. R. (2010). Syntactic reconstruction and reanalysis, semantic dead ends, and prefrontal cortex. *Brain and Cognition*, 73(1), 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.02.001>
- Christianson, K., Luke, S. G., & Ferreira, F. (2010). Effects of plausibility on structural priming. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(2), 538–544. <https://doi.org/10.1037/a0018027>
- Christianson, K., Williams, C. C., Zacks, R. T., & Ferreira, F. (2006). Younger and Older Adults' 'Good-Enough' Interpretations of Garden-Path Sentences. *Discourse Processes*, 42(2), 205–238. https://doi.org/10.1207/s15326950dp4202_6
- Cohen, J. I., & Gordon-Salant, S. (2017). The effect of visual distraction on auditory-visual speech perception by younger and older listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5), EL470–EL476. <https://doi.org/10.1121/1.4983399>
- Cole, M. W., & Schneider, W. (2007). The cognitive control network: Integrated cortical regions with dissociable functions. *NeuroImage*, 37(1), 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.071>
- Collette, F., Hogge, M., Salmon, E., & Van der Linden, M. (2006). Exploration of the neural substrates of executive functioning by functional neuroimaging. *Neuroscience*, 139(1), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.05.035>
- Collette, F., & Salmon, É. (2014). Fonctionnement exécutif et réseaux cérébraux. *Revue de neuropsychologie*, 6(4), 256–266. <https://doi.org/10.3917/rne.064.0256>
- Connelly, L., & Hasher, L. (1991). Age and Reading: The Impact of Distraction. *Psychology and Aging*, 6(4), 533–541.
- Cooper, R. M. (1974). The Control of Eye Fixation by the Meaning of Spoken Language. *Cognitive Psychology*, 6, 84–107.
- Costa, A., & Santesteban, M. (2004). Lexical access in bilingual speech production: Evidence from language switching in highly proficient bilinguals and L2 learners. *Journal of Memory and Language*, 50(4), 491–511. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2004.02.002>
- Cutler, A., Dahan, D., & van Donselaar, W. (1997). Prosody in the Comprehension of Spoken Language: A Literature Review. *Language and Speech*, 40(2), 141–201. <https://doi.org/10.1177/002383099704000203>
- Dagerman, K. S., MacDonald, M. C., & Harm, M. W. (2006). Aging and the Use of Context in Ambiguity Resolution: Complex Changes From Simple Slowing. *Cognitive Science*, 30(2), 311–345. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0000_46
- Dapretto, M., & Bookheimer, S. Y. (1999). Form and Content: Dissociating Syntax and Semantics in Sentence Comprehension. *Neuron*, 24, 427–432.
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, 44(11), 2037–2078. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2003). Hierarchical Processing in Spoken Language Comprehension. *The Journal of Neuroscience*, 23(8), 3423–3431. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-08-03423.2003>

- de Vega, M., Morera, Y., León, I., Beltrán, D., Casado, P., & Martín-Loeches, M. (2016). Sentential Negation Might Share Neurophysiological Mechanisms with Action Inhibition. Evidence from Frontal Theta Rhythm. *The Journal of Neuroscience*, *36*(22), 6002–6010. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3736-15.2016>
- Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The Neural Representation of Sequences: From Transition Probabilities to Algebraic Patterns and Linguistic Trees. *Neuron*, *88*(1), 2–19. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.019>
- Dekerle, M., Boulenger, V., Hoen, M., & Meunier, F. (2014). Multi-talker background and semantic priming effect. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00878>
- Desikan, R. S., Ségonne, F., Fischl, B., Quinn, B. T., Dickerson, B. C., Blacker, D., Buckner, R. L., Dale, A. M., Maguire, R. P., Hyman, B. T., Albert, M. S., & Killiany, R. J. (2006). An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest. *NeuroImage*, *31*(3), 968–980. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.01.021>
- D’Esposito, M., & Postle, B. R. (2002). The organization of working memory function in lateral prefrontal cortex: Evidence from event-related functional MRI. In *Principles of Frontal Lobe Function*.
- Diachek, E., Blank, I., Siegelman, M., Affourtit, J., & Fedorenko, E. (2020). The Domain-General Multiple Demand (MD) Network Does Not Support Core Aspects of Language Comprehension: A Large-Scale fMRI Investigation. *The Journal of Neuroscience*, *40*(23), 4536–4550. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2036-19.2020>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, *64*(1), 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. (2016). Why Improving and Assessing Executive Functions Early in Life is Critical. In *Executive Function in Preschool-Age Children* (pp. 11–43).
- Ding, N., Melloni, L., Yang, A., Wang, Y., Zhang, W., & Poeppel, D. (2017). Characterizing Neural Entrainment to Hierarchical Linguistic Units using Electroencephalography (EEG). *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 481. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00481>
- Ding, N., Melloni, L., Zhang, H., Tian, X., & Poeppel, D. (2016). Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech. *Nature Neuroscience*, *19*(1), 158–164. <https://doi.org/10.1038/nn.4186>
- Doebel, S., & Zelazo, P. D. (2015). A meta-analysis of the Dimensional Change Card Sort: Implications for developmental theories and the measurement of executive function in children. *Developmental Review*, *38*, 241–268. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2015.09.001>
- Domic-Siede, M., Irani, M., Valdés, J., Perrone-Bertolotti, M., & Ossandón, T. (2021). Theta activity from frontopolar cortex, mid-cingulate cortex and anterior cingulate cortex shows different roles in cognitive planning performance. *NeuroImage*, *226*, 117557. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117557>
- Dosenbach, N. U. F., Fair, D. A., Miezin, F. M., Cohen, A. L., Wenger, K. K., Dosenbach, R. A. T., Fox, M. D., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Raichle, M. E., Schlaggar, B. L., & Petersen, S. E. (2007). Distinct brain networks for adaptive and stable task control in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(26), 11073–11078. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704320104>
- Dosenbach, N. U. F., Visscher, K. M., Palmer, E. D., Miezin, F. M., Wenger, K. K., Kang, H. C., Burgund, E. D., Grimes, A. L., Schlaggar, B. L., & Petersen, S. E. (2006). A Core System

- for the Implementation of Task Sets. *Neuron*, 50(5), 799–812. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.04.031>
- Duffy, S. A., Kambe, G., & Rayner, K. (2001). The effect of prior disambiguating context on the comprehension of ambiguous words: Evidence from eye movements. In D. S. Gorfein (Ed.), *On the consequences of meaning selection: Perspectives on resolving lexical ambiguity*. (pp. 27–43). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/10459-002>
- Duffy, S. A., Morris, R. K., & Rayner, K. (1988). Lexical ambiguity and fixation times in reading. *Journal of Memory and Language*, 27(4), 429–446. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(88\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0749-596X(88)90066-6)
- Duman, T. Y., Altınok, N., Özgirgin, N., & Bastiaanse, R. (2011). Sentence comprehension in Turkish Broca's aphasia: An integration problem. *Aphasiology*, 25(8), 908–926. <https://doi.org/10.1080/02687038.2010.550629>
- Duñabeitia, J. A., & Carreiras, M. (2015). The bilingual advantage: Acta est fabula? *Cortex*, 73, 371–372. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.06.009>
- Duncan, J. (2010). The multiple-demand (MD) system of the primate brain: Mental programs for intelligent behaviour. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(4), 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.01.004>
- Eberhard, K. M., Spivey-Knowlton, M. J., Sedivy, J. C., & Tanenhaus, M. K. (1995). Eye movements as a window into real-time spoken language comprehension in natural contexts. *Journal of Psycholinguistic Research*, 24(6), 409–436. <https://doi.org/10.1007/BF02143160>
- Eckstein, K., & Friederici, A. D. (2006). It's Early: Event-related Potential Evidence for Initial Interaction of Syntax and Prosody in Speech Comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(10), 1696–1711. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.10.1696>
- Eich, T. S., MacKay-Brandt, A., Stern, Y., & Gopher, D. (2016). Age-Based Differences in Task Switching Are Moderated by Executive Control Demands. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, gbw117. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbw117>
- El Bouzaïdi Tiali, S., Spinelli, E., Meunier, F., Palluel-Germain, R., & Perrone-Bertolotti, M. (2021). Influence of homophone processing during auditory language comprehension on executive control processes: A dual-task paradigm. *PLOS ONE*, 16(7), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254237>
- Embick, D., Marantz, A., Miyashita, Y., O'Neil, W., & Sakai, K. L. (2000). A syntactic specialization for Broca's area. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(11), 6150–6154. <https://doi.org/10.1073/pnas.100098897>
- Engelhardt, P. E., Nigg, J. T., & Ferreira, F. (2017). Executive Function and Intelligence in the Resolution of Temporary Syntactic Ambiguity: An Individual Differences Investigation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(7), 1263–1281. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1178785>
- Eriksen, & Eriksen. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1), 143–149.
- Europa, E., Gitelman, D. R., Kiran, S., & Thompson, C. K. (2019). Neural Connectivity in Syntactic Movement Processing. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 27. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00027>
- Federmeier, K. D., & Kutas, M. (1999). A Rose by Any Other Name: Long-Term Memory Structure and Sentence Processing. *Journal of Memory and Language*, 41(4), 469–495. <https://doi.org/10.1006/jmla.1999.2660>

- Federmeier, K. D., & Kutas, M. (2005). Aging in context: Age-related changes in context use during language comprehension. *Psychophysiology*, *42*(2), 133–141. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00274.x>
- Federmeier, K. D., Mclennan, D. B., Ochoa, E. D., & Kutas. (2002). The impact of semantic memory organization and sentence context information on spoken language processing by younger and older adults: An ERP study. *Psychophysiology*, *39*(2), 133–146.
- Fedorenko, E. (2014). The role of domain-general cognitive control in language comprehension. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00335>
- Fedorenko, E., Behr, M. K., & Kanwisher, N. (2011). Functional specificity for high-level linguistic processing in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(39), 16428–16433. <https://doi.org/10.1073/pnas.1112937108>
- Fedorenko, E., & Blank, I. A. (2020). Broca's Area Is Not a Natural Kind. *Trends in Cognitive Sciences*, *24*(4), 270–284. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.01.001>
- Fedorenko, E., Hsieh, P.-J., Nieto-Castañón, A., Whitfield-Gabrieli, S., & Kanwisher, N. (2010). New Method for fMRI Investigations of Language: Defining ROIs Functionally in Individual Subjects. *Journal of Neurophysiology*, *104*(2), 1177–1194. <https://doi.org/10.1152/jn.00032.2010>
- Fedorenko, E., Scott, T. L., Brunner, P., Coon, W. G., Pritchett, B., Schalk, G., & Kanwisher, N. (2016). Neural correlate of the construction of sentence meaning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(41), E6256–E6262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1612132113>
- Fedorenko, E., & Thompson-Schill, S. L. (2014). Reworking the language network. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(3), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.12.006>
- Ferguson, H. J., Brunsdon, V. E. A., & Bradford, E. E. F. (2021). The developmental trajectories of executive function from adolescence to old age. *Scientific Reports*, *11*(1), 1382. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80866-1>
- Ferrand, L., Grainger, J., & Segui, J. (1994). A study of masked form priming in picture and word naming. *Memory & Cognition*, *22*(4), 431–441. <https://doi.org/10.3758/BF03200868>
- Ferrand, L., Humphreys, G. W., & Segui, J. (1998). Masked repetition and phonological priming in picture naming. *Perception & Psychophysics*, *60*(2), 263–274. <https://doi.org/10.3758/BF03206035>
- Ferreira, F. (2003). The misinterpretation of noncanonical sentences. *Cognitive Psychology*, *47*(2), 164–203. [https://doi.org/10.1016/S0010-0285\(03\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0010-0285(03)00005-7)
- Ferreira, F., Bailey, K. G. D., & Ferraro, V. (2002). Good-Enough Representations in Language Comprehension. *Current Directions in Psychological Science*, *11*(1), 11–15. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00158>
- Ferreira, F., & Clifton Jr., C. (1986). The Independence of Syntactic Processing. *Journal of Memory and Language*, *25*, 348–368.
- Ferreira, F., Foucart, A., & Engelhardt, P. E. (2013). Language processing in the visual world: Effects of preview, visual complexity, and prediction. *Journal of Memory and Language*, *69*(3), 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2013.06.001>
- Ferreira, F., Henderson, J. M., Anes, M. D., Weeks, P. A., & McFarlane, D. K. (1996). Effects of Lexical Frequency and Syntactic Complexity in Spoken-Language Comprehension: Evidence From the Auditory Moving-Window Technique. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*(2), 324–335.

- Ferreira, F., & Patson, N. D. (2007). The Good Enough Approach to Language Comprehension. *Language and Linguistics Compass*, 1(1–2), 71–83. <https://doi.org/10.1111/j.1749-818X.2007.00007.x>
- Ferreira, F., & Stacey, J. (2000). Syntactic Vulnerability and Thematic Misinterpretation. *Manuscript Submitted for Publication*.
- Fiebach, C. J., Vos, S. H., & Friederici, A. D. (2004). Neural Correlates of Syntactic Ambiguity in Sentence Comprehension for Low and High Span Readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(9), 1562–1575. <https://doi.org/10.1162/0898929042568479>
- Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2004). Age-Related Impairment in Executive Functioning: Updating, Inhibition, Shifting, and Access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(7), 874–890. <https://doi.org/10.1080/13803390490510680>
- Fodor, J. A. (1983). The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology. In *REASONING: Studies of Human Inference and Its Foundations* (pp. 878–914).
- Foucart, A., Martin, C. D., Moreno, E. M., & Costa, A. (2014). Can bilinguals see it coming? Word anticipation in L2 sentence reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(5), 1461–1469. <https://doi.org/10.1037/a0036756>
- Fourneret, P., & des Portes, V. (2016). Approche développementale des fonctions exécutives: Du bébé à l'adolescence. *Archives de Pédiatrie*, 24(1), 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2016.10.003>
- Frattali, C., Hanna, R., McGinty, A., Gerber, L., Wesley, R., Grafman, J., & Coelho, C. (2007). Effect of prefrontal cortex damage on resolving lexical ambiguity in text. *Brain and Language*, 102(1), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.09.007>
- Frazier, L. (1979). *On comprehending sentences: Syntactic parsing strategies*.
- Frazier, L. (1987). Sentence processing: A tutorial review. *Cognition*, 559–586.
- Frazier, L., & Fodor, J. D. (1978). The sausage machine: A new two-stage parsing model. *Cognition*, 6(4), 291–325. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(78\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0010-0277(78)90002-1)
- Frazier, L., & Rayner, K. (1982). Making and correcting errors during sentence comprehension: Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive Psychology*, 14(2), 178–210. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(82\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0010-0285(82)90008-1)
- Frazier, L., & Rayner, K. (1987). Resolution of syntactic category ambiguities: Eye movements in parsing lexically ambiguous sentences. *Journal of Memory and Language*, 26(5), 505–526. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(87\)90137-9](https://doi.org/10.1016/0749-596X(87)90137-9)
- Freyman, R. L., Balakrishnan, U., & Helfer, K. S. (2001). Spatial release from informational masking in speech recognition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5), 2112–2122. <https://doi.org/10.1121/1.1354984>
- Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(2), 78–84. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01839-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01839-8)
- Friederici, A. D. (2004). Processing local transitions versus long-distance syntactic hierarchies. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(6), 245–247.
- Friederici, A. D. (2011). The Brain Basis of Language Processing: From Structure to Function. *Physiological Reviews*, 91(4), 1357–1392. <https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2011>
- Friederici, A. D. (2017). *Language in Our Brain: The Origins of a Uniquely Human Capacity*. MA & London: The MIT Press.

- Friederici, A. D. (2020). Hierarchy processing in human neurobiology: How specific is it? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1789), 20180391. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0391>
- Friederici, A. D., Bahlmann, J., Heim, S., Schubotz, R. I., & Anwander, A. (2006). The brain differentiates human and non-human grammars: Functional localization and structural connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(7), 2458–2463. <https://doi.org/10.1073/pnas.0509389103>
- Friederici, A. D., Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., Bornkessel, I. D., & von Cramon, D. Y. (2005). Processing Linguistic Complexity and Grammaticality in the Left Frontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 16(12), 1709–1717. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhj106>
- Friederici, A. D., Gunter, T. C., Hahne, A., & Mauth, K. (2004). The relative timing of syntactic and semantic processes in sentence comprehension: *NeuroReport*, 15(1), 165–169. <https://doi.org/10.1097/00001756-200401190-00032>
- Friederici, A. D., Makuuchi, M., & Bahlmann, J. (2009). The role of the posterior superior temporal cortex in sentence comprehension. *NeuroReport*, 20(6), 563–568. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3283297dee>
- 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*, 74(2), 289–300. <https://doi.org/10.1006/brln.2000.2313>
- Friederici, A. D., Pfeifer, E., & Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials during natural speech processing: Effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Cognitive Brain Research*, 1(3), 183–192. [https://doi.org/10.1016/0926-6410\(93\)90026-2](https://doi.org/10.1016/0926-6410(93)90026-2)
- 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. *Cerebral Cortex*, 13(2), 170–177. <https://doi.org/10.1093/cercor/13.2.170>
- Friederici, A. D., Von Cramon, & Kotz. (1999). Language related brain potentials in patients with cortical and subcortical left hemisphere lesions. *Brain*, 122(6), 1033–1047. <https://doi.org/10.1093/brain/122.6.1033>
- Friederici, A. D., & Weissenborn, J. (2007). Mapping sentence form onto meaning: The syntax–semantic interface. *Brain Research*, 1146, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.08.038>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not All Executive Functions Are Related to Intelligence. *Psychological Science*, 17(2), 172–179. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x>
- Frisch, S., Hahne, A., & Friederici, A. D. (2004). Word category and verb–argument structure information in the dynamics of parsing. *Cognition*, 91(3), 191–219. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.09.009>
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127–138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- Fuster, J. M. (2002). Physiology of Executive Functions: The Perception-Action Cycle. In D. T. Stuss & R. T. Knight (Eds.), *Principles of Frontal Lobe Function* (pp. 96–108). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195134971.003.0006>
- Garagnani, M., Shtyrov, Y., & Pulvermüller, F. (2009). Effects of attention on what is known and what is not: MEG evidence for functionally discrete memory circuits. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.010.2009>

- Geranmayeh, F., Wise, R. J. S., Mehta, A., & Leech, R. (2014). Overlapping Networks Engaged during Spoken Language Production and Its Cognitive Control. *Journal of Neuroscience*, *34*(26), 8728–8740. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0428-14.2014>
- Gernsbacher, M. A., & Faust, M. (1991). Chapter 5 The Role of Suppression in Sentence Comprehension. In *Advances in Psychology* (Vol. 77, pp. 97–128). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)61531-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61531-9)
- Glenberg, A. M., & Gallese, V. (2012). Action-based language: A theory of language acquisition, comprehension, and production. *Cortex*, *48*(7), 905–922. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.04.010>
- Glucksberg, S., Kreuz, R. J., & Rho, S. H. (1986). Context Can Constrain Lexical Access: Implications for Models of Language Comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *12*(3), 323–335.
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., & Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Gooch, D., Hulme, C., Nash, H. M., & Snowling, M. J. (2014). Comorbidities in preschool children at family risk of dyslexia. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *55*(3), 237–246. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12139>
- Gooch, D., Thompson, P., Nash, H. M., Snowling, M. J., & Hulme, C. (2016). The development of executive function and language skills in the early school years. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *57*(2), 180–187. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12458>
- Gordon, P. C., Hendrick, R., & Levine, W. H. (2002). Memory-Load Interference in Syntactic Processing. *Psychological Science*, *13*(5), 6.
- Grainger, J., Diependaele, K., Spinelli, E., Ferrand, L., & Farioli, F. (2003). Masked Repetition and Phonological Priming Within and Across Modalities. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(6), 1256–1269. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.29.6.1256>
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1992). Optimizing the Use of Information: Strategic Control of Activation of Responses. *Journal of Experimental Psychology: General*, *121*(4), 480–506.
- Greenbaum, S. (1980). *Syntactic Frequency and Acceptability*. 301–314.
- Grisoni, L., Miller, T. M., & Pulvermüller, F. (2017). Neural Correlates of Semantic Prediction and Resolution in Sentence Processing. *The Journal of Neuroscience*, *37*(18), 4848–4858. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2800-16.2017>
- Grodzinsky, Y. (2000). The neurology of syntax: Language use without Broca's area. *Behavioral and Brain Sciences*, *23*(1), 1–21. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00002399>
- Grodzinsky, Y., & Santi, A. (2008). The battle for Broca's region. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*(12), 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.09.001>
- Grundy, J. G., Chung-Fat-Yim, A., Friesen, D. C., Mak, L., & Bialystok, E. (2017). Sequential congruency effects reveal differences in disengagement of attention for monolingual and bilingual young adults. *Cognition*, *163*, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.02.010>

- Gunter, T. C., Friederici, A. D., & Schriefers, H. (2000). Syntactic Gender and Semantic Expectancy: ERPs Reveal Early Autonomy and Late Interaction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(4), 556–568. <https://doi.org/10.1162/089892900562336>
- Haarmann, H., & Cameron, K. (2005). Active maintenance of sentence meaning in working memory: Evidence from EEG coherences. *International Journal of Psychophysiology*, 57(2), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.03.017>
- Hagoort. (2005). Broca's Complex as the Unification Space for Language. In *Twenty-First Century Psycholinguistics: Four Cornerstones* (pp. 157–172).
- Hagoort, P. (2013). MUC (Memory, Unification, Control) and beyond. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00416>
- Hagoort, P. (2014). Nodes and networks in the neural architecture for language: Broca's region and beyond. *Current Opinion in Neurobiology*, 28, 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.07.013>
- Hagoort, P. (2016). MUC (Memory, Unification, Control). In *Neurobiology of Language* (pp. 339–347). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00028-6>
- Hagoort, P., & Brown, C. (1994). Brain responses to lexical ambiguity resolution and parsing. *Perspectives on Sentence Processing*, 14, 45–80.
- Hagoort, P., Brown, C., & Groothusen, J. (1993). The syntactic positive shift (sps) as an erp measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processes*, 8(4), 439–483. <https://doi.org/10.1080/01690969308407585>
- 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. <https://doi.org/10.1126/science.1095455>
- Hagoort, P., & Indefrey, P. (2014). The Neurobiology of Language Beyond Single Words. *Annual Review of Neuroscience*, 37(1), 347–362. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071013-013847>
- Hahne, A., & Friederici, A. D. (2002). Differential task effects on semantic and syntactic processes as revealed by ERPs. *Cognitive Brain Research*, 13(3), 339–356. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(01\)00127-6](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(01)00127-6)
- Hald, L. A., Bastiaansen, M. C. M., & Hagoort, P. (2006). EEG theta and gamma responses to semantic violations in online sentence processing. *Brain and Language*, 96(1), 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.06.007>
- Hale, J. (2001). A probabilistic earley parser as a psycholinguistic model. *Second Meeting of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics on Language Technologies 2001 - NAACL '01*, 1–8. <https://doi.org/10.3115/1073336.1073357>
- Hanne, S., Burchert, F., De Bleser, R., & Vasishth, S. (2015). Sentence comprehension and morphological cues in aphasia: What eye-tracking reveals about integration and prediction. *Journal of Neurolinguistics*, 34, 83–111. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2014.12.003>
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working Memory, Comprehension, and Aging: A Review and a New View. *The Psychology of Learning*, 193–225.
- Hasson, U., Egidi, G., Marelli, M., & Willems, R. M. (2018). Grounding the neurobiology of language in first principles: The necessity of non-language-centric explanations for language comprehension. *Cognition*, 180, 135–157. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.06.018>

- Hasting, A. S., Kotz, S. A., & Friederici, A. D. (2007). Setting the Stage for Automatic Syntax Processing: The Mismatch Negativity as an Indicator of Syntactic Priming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(3), 386–400. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.3.386>
- Herrmann, C. S., Munk, M. H. J., & Engel, A. K. (2004). Cognitive functions of gamma-band activity: Memory match and utilization. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(8), 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.06.006>
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92(1–2), 67–99. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.10.011>
- Hilchey, M. D., & Klein, R. M. (2011). Are there bilingual advantages on nonlinguistic interference tasks? Implications for the plasticity of executive control processes. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(4), 625–658. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0116-7>
- Hino, Y., Lupker, S. J., & Pexman, P. M. (2002). Ambiguity and synonymy effects in lexical decision, naming, and semantic categorization tasks: Interactions between orthography, phonology, and semantics. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(4), 686–713. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.28.4.686>
- Hinojosa, J. A., Martin-Loeches, M., Muñoz, F., Casado, P., & Pozo, M. A. (2004). Electrophysiological evidence of automatic early semantic processing. *Brain and Language*, 88(1), 39–46. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00158-5](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00158-5)
- Hoën, M., Meunier, F., Grataloup, C.-L., Pellegrino, F., Grimault, N., Perrin, F., Perrot, X., & Collet, L. (2007). Phonetic and lexical interferences in informational masking during speech-in-speech comprehension. *Speech Communication*, 49(12), 905–916. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2007.05.008>
- Hoffman, P., Rogers, T. T., & Lambon Ralph, M. A. (2011). Semantic Diversity Accounts for the “Missing” Word Frequency Effect in Stroke Aphasia: Insights Using a Novel Method to Quantify Contextual Variability in Meaning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(9), 2432–2446. <https://doi.org/10.1162/jocn.2011.21614>
- Hsu, N. S., Jaeggi, S. M., & Novick, J. M. (2017). *A common neural hub resolves syntactic and non-syntactic conflict through cooperation with task-specific networks*. 15.
- Hsu, N. S., Kuchinsky, S. E., & Novick, J. M. (2020). Direct impact of cognitive control on sentence processing and comprehension. *Language, Cognition and Neuroscience*, 36(2), 211–239. <https://doi.org/10.1080/23273798.2020.1836379>
- Hsu, N. S., & Novick, J. M. (2016). Dynamic Engagement of Cognitive Control Modulates Recovery From Misinterpretation During Real-Time Language Processing. *Psychological Science*, 27(4), 572–582. <https://doi.org/10.1177/0956797615625223>
- Huang, H.-W., Meyer, A. M., & Federmeier, K. D. (2012). A “concrete view” of aging: Event related potentials reveal age-related changes in basic integrative processes in language. *Neuropsychologia*, 50(1), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.10.018>
- Huetting, F. (2015). Four central questions about prediction in language processing. *Brain Research*, 1626, 118–135. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.02.014>
- Huetting, F., & Altmann, G. T. M. (2005). Word meaning and the control of eye fixation: Semantic competitor effects and the visual world paradigm. *Cognition*, 96(1), B23–B32. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.10.003>
- Huetting, F., & Janse, E. (2016). Individual differences in working memory and processing speed predict anticipatory spoken language processing in the visual world. *Language, Cognition and Neuroscience*, 31(1), 80–93. <https://doi.org/10.1080/23273798.2015.1047459>

- Huettig, F., & Mani, N. (2016). Is prediction necessary to understand language? Probably not. *Language, Cognition and Neuroscience*, 31(1), 19–31. <https://doi.org/10.1080/23273798.2015.1072223>
- Huettig, F., Rommers, J., & Meyer, A. S. (2011). Using the visual world paradigm to study language processing: A review and critical evaluation. *Acta Psychologica*, 137(2), 151–171. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.11.003>
- Humphries, C., Binder, J. R., Medler, D. A., & Liebenthal, E. (2006). Syntactic and Semantic Modulation of Neural Activity during Auditory Sentence Comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(4), 665–679. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.4.665>
- Hussey, E. K., Harbison, J. I., Teubner-Rhodes, S. E., Mishler, A., Velnoskey, K., & Novick, J. M. (2017). Memory and language improvements following cognitive control training. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43(1), 23–58. <https://doi.org/10.1037/xlm0000283>
- Hussey, E. K., & Novick, J. M. (2012). The Benefits of Executive Control Training and the Implications for Language Processing. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00158>
- Hussey, E. K., Ward, N., Christianson, K., & Kramer, A. F. (2015). Language and Memory Improvements following tDCS of Left Lateral Prefrontal Cortex. *PLOS ONE*, 10(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141417>
- Ibbotson, P., & Kearvell-White, J. (2015). Inhibitory Control Predicts Grammatical Ability. *PLOS ONE*, 10(12), e0145030. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145030>
- Isel, F., & Kail, M. (2019). Neuroplasticity, network connectivity and language processing across the lifespan. *Brain and Cognition*, 134, 67–70. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2019.05.005>
- Ito, A., Gambi, C., Pickering, M. J., Fuellenbach, K., & Husband, E. M. (2020). Prediction of phonological and gender information: An event-related potential study in Italian. *Neuropsychologia*, 136, 107291. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107291>
- Ito, A., Martin, A. E., & Nieuwland, M. S. (2017). Why the A/AN prediction effect may be hard to replicate: A rebuttal to Delong, Urbach, and Kutas (2017). *Language, Cognition and Neuroscience*, 32(8), 974–983. <https://doi.org/10.1080/23273798.2017.1323112>
- Ito, A., Pickering, M. J., & Corley, M. (2018). Investigating the time-course of phonological prediction in native and non-native speakers of English: A visual world eye-tracking study. *Journal of Memory and Language*, 98, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2017.09.002>
- Itzhak, I., Pauker, E., Drury, J. E., Baum, S. R., & Steinhauer, K. (2010). Event-related potentials show online influence of lexical biases on prosodic processing: *NeuroReport*, 21(1), 8–13. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e328330251d>
- Janse, E. (2012). A non-auditory measure of interference predicts distraction by competing speech in older adults. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 19(6), 741–758.
- January, D., Trueswell, J. C., & Thompson-Schill, S. L. (2009). Co-localization of Stroop and Syntactic Ambiguity Resolution in Broca's Area: Implications for the Neural Basis of Sentence Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(12), 2434–2444. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21179>
- Juncos-Rabadàn, O. (1992). The processing of negative sentences in fluent aphasics: Semantic and pragmatic aspects. *Brain and Language*, 43(1), 96–106. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(92\)90023-8](https://doi.org/10.1016/0093-934X(92)90023-8)

- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A Capacity Theory of Comprehension: Individual Differences in Working Memory. *Psychological Review*, 99(1), 122–149.
- 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. <https://doi.org/10.1126/science.274.5284.114>
- Just, M. A., & Varma, S. (2002). A hybrid architecture for working memory: Reply to MacDonald and Christiansen (2002). *Psychological Review*, 109(1), 55–65. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.109.1.55>
- Kail, R., & Salthouse, T. A. (1994). Processing speed as a mental capacity. *Acta Psychologica*, 86(2–3), 199–225. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(94)90003-5)
- Kaiser, E., & Trueswell, J. (2004). The role of discourse context in the processing of a flexible word-order language. *Cognition*, 94(2), 113–147. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.01.002>
- Kamide, Y., Altmann, G. T. M., & Haywood, S. L. (2003). The time-course of prediction in incremental sentence processing: Evidence from anticipatory eye movements. *Journal of Memory and Language*, 49(1), 133–156. [https://doi.org/10.1016/S0749-596X\(03\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S0749-596X(03)00023-8)
- Kan, I. P., Teubner-Rhodes, S., Drummey, A. B., Nutile, L., Krupa, L., & Novick, J. M. (2013). To adapt or not to adapt: The question of domain-general cognitive control. *Cognition*, 129(3), 637–651. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.09.001>
- Kane, M. J., Conway, A. R. A., Miura, T. K., & Colflesh, G. J. H. (2007). Working memory, attention control, and the n-back task: A question of construct validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 615–622. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.3.615>
- Kaup, B., Lüdtke, J., & Zwaan, R. A. (2006). Processing negated sentences with contradictory predicates: Is a door that is not open mentally closed? *Journal of Pragmatics*, 38(7), 1033–1050. <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2005.09.012>
- Kaushanskaya, M., Park, J. S., Gangopadhyay, I., Davidson, M. M., & Weismer, S. E. (2017). The Relationship Between Executive Functions and Language Abilities in Children: A Latent Variables Approach. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 60(4), 912–923. https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-L-15-0310
- Kellas, G., & Vu, H. (1999). Strength of context does modulate the subordinate bias effect: A reply to Binder and Rayner. *Psychonomic Bulletin & Review*, 6(3), 511–517. <https://doi.org/10.3758/BF03210842>
- Kemper, S., Crow, A., & Kemtes, K. (2004). Eye-Fixation Patterns of High- and Low-Span Young and Older Adults: Down the Garden Path and Back Again. *Psychology and Aging*, 19(1), 157–170. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.19.1.157>
- Kemtes, K. A., & Kemper, S. (1997). Younger and older adults' on-line processing of syntactically ambiguous sentences. *Psychology and Aging*, 12(2), 362–371. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.12.2.362>
- Kemtes, K. A., & Kemper, S. (1999). Aging and Resolution of Quantifier Scope Effects. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 54B(6), P350–P360. <https://doi.org/10.1093/geronb/54B.6.P350>
- Key-DeLyria, S. E., & Altmann, L. J. P. (2016). Executive Function and Ambiguous Sentence Comprehension. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 25(2), 252–267. https://doi.org/10.1044/2015_AJSLP-14-0111

- Kielar, A., Meltzer, J. A., Moreno, S., Alain, C., & Bialystok, E. (2014). Oscillatory Responses to Semantic and Syntactic Violations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(12), 2840–2862. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00670
- King, J., & Just, M. A. (1991). Individual differences in syntactic processing: The role of working memory. *Journal of Memory and Language*, 30(5), 580–602. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(91\)90027-H](https://doi.org/10.1016/0749-596X(91)90027-H)
- Kinno, R., Kawamura, M., Shioda, S., & Sakai, K. L. (2008). Neural correlates of noncanonical syntactic processing revealed by a picture-sentence matching task. *Human Brain Mapping*, 29(9), 1015–1027. <https://doi.org/10.1002/hbm.20441>
- Kitayama, S., & Howard, S. (1994). Affective Regulation of Perception and Comprehension: Amplification and Semantic Priming. In *The Heart's Eye* (pp. 41–65). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410560-7.50009-0>
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2–3), 169–195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- Koechlin, E., & Summerfield, C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(6), 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.04.005>
- Koizumi, M., Yasugi, Y., Tamaoka, K., Kiyama, S., Kim, J., Ajsivinac Sian, J. E., & García Mátzar, L. P. O. (2014). On the (non)universality of the preference for subject-object word order in sentence comprehension: A sentence-processing study in Kaqchikel Maya. *Language*, 90(3), 722–736. <https://doi.org/10.1353/lan.2014.0068>
- Kolk, H. H. J., Chwilla, D. J., van Herten, M., & Oor, P. J. W. (2003). Structure and limited capacity in verbal working memory: A study with event-related potentials. *Brain and Language*, 85(1), 1–36. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(02\)00548-5](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(02)00548-5)
- Köpke, B., Howells, R. K. R., Cortelazzo, F., Péran, P., de Boissezon, X., & Lubrano, V. (2021). Functional and structural differences in brain networks involved in language processing and control in highly proficient early and late bilinguals. *Journal of Neurolinguistics*, 59, 100988. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2021.100988>
- Kotz, S. A., Frisch, S., Von Cramon, D. Y., & Friederici, A. D. (2003). Syntactic language processing: ERP lesion data on the role of the basal ganglia. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 9(7), 1053–1060. <https://doi.org/10.1017/S1355617703970093>
- Kousaie, S., & Phillips, N. A. (2017). A behavioural and electrophysiological investigation of the effect of bilingualism on aging and cognitive control. *Neuropsychologia*, 94, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.11.013>
- Kristensen, L. B., Wang, L., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2013). The Interface Between Language and Attention: Prosodic Focus Marking Recruits a General Attention Network in Spoken Language Comprehension. *Cerebral Cortex*, 23(8), 1836–1848. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs164>
- Kuperberg, G. R. (2007). Neural mechanisms of language comprehension: Challenges to syntax. *Brain Research*, 1146, 23–49. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.12.063>
- Kuperberg, G. R., Caplan, D., Sitnikova, T., Eddy, M., & Holcomb, P. J. (2006). Neural correlates of processing syntactic, semantic, and thematic relationships in sentences. *Language and Cognitive Processes*, 21(5), 489–530. <https://doi.org/10.1080/01690960500094279>

- Kuperberg, G. R., & Jaeger, T. F. (2016). What do we mean by prediction in language comprehension? *Language, Cognition and Neuroscience*, 31(1), 32–59. <https://doi.org/10.1080/23273798.2015.1102299>
- Kuperberg, G. R., Kreher, D. A., Sitnikova, T., Caplan, D. N., & Holcomb, P. J. (2007). The role of animacy and thematic relationships in processing active English sentences: Evidence from event-related potentials. *Brain and Language*, 100(3), 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.12.006>
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203–205.
- Kutas, & Van Petten. (1988). Event-related brain potential studies of language. *Advances in Psychophysiology*, 3, 139–187.
- Kuzmina, E., & Weekes, B. S. (2016). Role of cognitive control in language deficits in different types of aphasia. *Aphasiology*, 31(7), 765–792. <https://doi.org/10.1080/02687038.2016.1263383>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13). <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Kwong See, S. T., & Ryan, E. B. (1995). Cognitive Mediation of Adult Age Differences in Language Performance. *Psychology and Aging*, 10(3), 458–468. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.10.3.458>
- Lachaux, J.-P., Axmacher, N., Mormann, F., Halgren, E., & Crone, N. E. (2012). High-frequency neural activity and human cognition: Past, present and possible future of intracranial EEG research. *Progress in Neurobiology*, 98(3), 279–301. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2012.06.008>
- Lau, E., Stroud, C., Plesch, S., & Phillips, C. (2006). The role of structural prediction in rapid syntactic analysis. *Brain and Language*, 98(1), 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.02.003>
- Laver, G. D., & Burke, D. M. (1993). Why do semantic priming effects increase in old age? A meta-analysis. *Psychology and Aging*, 8(1), 34–43. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.8.1.34>
- Le Van Quyen, M., Foucher, J., Lachaux, J.-P., Rodriguez, E., Lutz, A., Martinerie, J., & Varela, F. J. (2001). Comparison of Hilbert transform and wavelet methods for the analysis of neuronal synchrony. *Journal of Neuroscience Methods*, 111(2), 83–98. [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(01\)00372-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(01)00372-7)
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59–80. <https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Lehtonen, M., Soveri, A., Laine, A., Järvenpää, J., de Bruin, A., & Antfolk, J. (2018). Is bilingualism associated with enhanced executive functioning in adults? A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 144(4), 394–425. <https://doi.org/10.1037/bul0000142>
- León, C. B. R., Dias, N. M., Martins, G. L. L., & Seabra, A. G. (2018). Executive functions in preschool children: Development and relationships with language and behavior. *Psicologia - Teoria e Prática*, 20(3). <https://doi.org/10.5935/1980-6906/psicologia.v20n3p121-137>
- Levelt, W. J. M., Zwanenburg, W., & Ouweneel, G. R. E. (1970). Ambiguous Surface Structure and Phonetic Form in French. *Foundations of Language*, 6(2), 260–273.
- Levy, R. (2007). *Expectation-based syntactic comprehension*.

- Lewis, A. G., & Bastiaansen, M. (2015). A predictive coding framework for rapid neural dynamics during sentence-level language comprehension. *Cortex*, *68*, 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.02.014>
- Lewis, A. G., Wang, L., & Bastiaansen, M. (2015). Fast oscillatory dynamics during language comprehension: Unification versus maintenance and prediction? *Brain and Language*, *148*, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.01.003>
- Lezak, M. D. (1982). The Problem of Assessing Executive Functions. *International Journal of Psychology*, *17*(1–4), 281–297. <https://doi.org/10.1080/00207598208247445>
- Liu, X. (2018). Effects of Working Memory Load and Age on the Comprehension of Passive Sentences. *International Journal of Psychological Studies*, *10*(3), 13. <https://doi.org/10.5539/ijps.v10n3p13>
- Liuzzi, A. G., Bruffaerts, R., Peeters, R., Adamczuk, K., Keuleers, E., De Deyne, S., Storms, G., Dupont, P., & Vandenberghe, R. (2017). Cross-modal representation of spoken and written word meaning in left pars triangularis. *NeuroImage*, *150*, 292–307. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.02.032>
- Love, T., & Swinney, D. (1996). Coreference processing and levels of analysis in object-relative constructions; Demonstration of antecedent reactivation with the cross-modal priming paradigm. *Journal of Psycholinguistic Research*, *25*(1), 5–24. <https://doi.org/10.1007/BF01708418>
- Luo, L., Luk, G., & Bialystok, E. (2010). Effect of language proficiency and executive control on verbal fluency performance in bilinguals. *Cognition*, *114*(1), 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.08.014>
- Lupyan, G., & Clark, A. (2015). Words and the World: Predictive Coding and the Language-Perception-Cognition Interface. *Current Directions in Psychological Science*, *24*(4), 279–284. <https://doi.org/10.1177/0963721415570732>
- MacDonald, K. B. (2008). Effortful control, explicit processing, and the regulation of human evolved predispositions. *Psychological Review*, *115*(4), 1012–1031. <https://doi.org/10.1037/a0013327>
- Macdonald, M. C. (1993). The Interaction of Lexical and Syntactic Ambiguity. *Journal of Memory and Language*, *32*(5), 692–715. <https://doi.org/10.1006/jmla.1993.1035>
- MacDonald, M. C., & Just, M. A. (1989). Changes in activation levels with negation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*(4), 633–642. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.15.4.633>
- MacDonald, M. C., Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). Working memory constraints on the processing of syntactic ambiguity. *Cognitive Psychology*, *24*(1), 56–98. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90003-K](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90003-K)
- MacDonald, M. C., Pearlmutter, N. J., & Seidenberg, M. S. (1994). *Lexical Nature of Syntactic Ambiguity Resolution*. *101*(4), 676–703.
- Mack, J. E., & Thompson, C. K. (2017). Recovery of Online Sentence Processing in Aphasia: Eye Movement Changes Resulting From Treatment of Underlying Forms. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *60*(5), 1299–1315. https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-L-16-0108
- MacLeod, C. M., Dodd, M. D., Sheard, E. D., Wilson, D. E., & Bibi, U. (2003). In Opposition to Inhibition. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 43, pp. 163–214). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(03\)01014-4](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(03)01014-4)

- Manard, M., Carabin, D., Jaspar, M., & Collette, F. (2014). Age-related decline in cognitive control: The role of fluid intelligence and processing speed. *BMC Neuroscience*, *15*(1), 7. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-15-7>
- Mani, N., & Huettig, F. (2012). Prediction during language processing is a piece of cake—But only for skilled producers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *38*(4), 843–847. <https://doi.org/10.1037/a0029284>
- Marian, V., & Spivey, M. (2003). Competing activation in bilingual language processing: Within- and between-language competition. *Bilingualism: Language and Cognition*, *6*(2), 97–115. <https://doi.org/10.1017/S1366728903001068>
- Marslen-Wilson, W. D., Tyler, L. K., Warren, P., Grenier, P., & Lee, C. S. (1992). Prosodic Effects in Minimal Attachment. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *45*(1), 73–87. <https://doi.org/10.1080/14640749208401316>
- Martin, C. D., Thierry, G., Kuipers, J.-R., Boutonnet, B., Foucart, A., & Costa, A. (2013). Bilinguals reading in their second language do not predict upcoming words as native readers do. *Journal of Memory and Language*, *69*(4), 574–588. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2013.08.001>
- Martin, C., Vu, H., Kellas, G., & Metcalf, K. (1999). Strength of Discourse Context as a Determinant of the Subordinate Bias Effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *52*(4), 813–839. <https://doi.org/10.1080/713755861>
- Martin-Loeches, M., Hinojosa, J. A., Gomez-Jarabo, G., & Rubia, F. J. (2001). An early electrophysiological sign of semantic processing in basal extrastriate areas. *Psychophysiology*, *38*(1), 114–124. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3810114>
- Martorell, J., Morucci, P., Mancini, S., & Molinaro, N. (2020). *Sentence processing: How words generate syntactic structures in the brain* [Preprint]. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/3utpv>
- Marxer, R., Barker, J., Cooke, M., & Garcia Lecumberri, M. L. (2016). A corpus of noise-induced word misperceptions for English. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *140*(5), EL458–EL463. <https://doi.org/10.1121/1.4967185>
- Mason, R. A., Just, M. A., Keller, T. A., & Carpenter, P. A. (2003). Ambiguity in the Brain: What Brain Imaging Reveals About the Processing of Syntactically Ambiguous Sentences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(6), 1319–1338. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.29.6.1319>
- Matar, S., Dirani, J., Marantz, A., & Pykkänen, L. (2021). Left posterior temporal cortex is sensitive to syntax within conceptually matched Arabic expressions. *Scientific Reports*, *11*(1), 7181. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86474-x>
- Matchin, W., Brodbeck, C., Hammerly, C., & Lau, E. (2019). The temporal dynamics of structure and content in sentence comprehension: Evidence from fMRI-constrained MEG. *Human Brain Mapping*, *40*(2), 663–678. <https://doi.org/10.1002/hbm.24403>
- Matchin, W., & Hickok, G. (2020). The Cortical Organization of Syntax. *Cerebral Cortex*, *30*(3), 1481–1498. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz180>
- Matzke, M., Mai, H., Nager, W., Rüsseler, J., & Münte, T. (2002). The costs of freedom: An ERP – study of non-canonical sentences. *Clinical Neurophysiology*, *113*(6), 844–852. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00059-7](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00059-7)
- Mazoyer, Tzourio, Frak, Syrota, Murayama, Levrier, ..., & Mehler. (1993). The cortical representation of speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *5*(4), 467–476.

- Mazuka, R., Jincho, N., & Oishi, H. (2009). Development of Executive Control and Language Processing: Development of Executive Control and Language Processing. *Language and Linguistics Compass*, 3(1), 59–89. <https://doi.org/10.1111/j.1749-818X.2008.00102.x>
- McCallum, Farmer, & Pocock. (1984). The effects of physical and semantic incongruities on auditory event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 59(6), 477–488.
- McCoy, S. L., Tun, P. A., Cox, L. C., Colangelo, M., Stewart, R. A., & Wingfield, A. (2005). Hearing Loss and Perceptual Effort: Downstream Effects on Older Adults' Memory for Speech. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 58(1), 22–33. <https://doi.org/10.1080/02724980443000151>
- McDonald, S. A., & Shillcock, R. C. (2003). Low-level predictive inference in reading: The influence of transitional probabilities on eye movements. *Vision Research*, 43(16), 1735–1751. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(03\)00237-2](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(03)00237-2)
- McDowd, J. M., & Filion, D. L. (1992). Aging, Selective Attention, and Inhibitory Processes: A Psychophysiological Approach. *Psychology and Aging*, 7(1), 65–71.
- Mcqueen, J. M., & Sereno, J. (2005). Cleaving automatic processes from strategic biases in phonological priming. *Memory & Cognition*, 33(7), 1185–1209. <https://doi.org/10.3758/BF03193222>
- Mendoza, M. N., Blumenfeld, H. K., Knight, R. T., & Ries, S. K. (2021). Investigating the Link Between Linguistic and Non-Linguistic Cognitive Control in Bilinguals Using Laplacian-Transformed Event Related Potentials. *Neurobiology of Language*, 1–23. https://doi.org/10.1162/nol_a_00056
- Meunier, F., & Segui, J. (1999). Frequency Effects in Auditory Word Recognition: The Case of Suffixed Words. *Journal of Memory and Language*, 41(3), 327–344. <https://doi.org/10.1006/jmla.1999.2642>
- Meyer, A. M., Mack, J. E., & Thompson, C. K. (2012). Tracking passive sentence comprehension in agrammatic aphasia. *Journal of Neurolinguistics*, 25(1), 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2011.08.001>
- Meyer, L., & Friederici, A. D. (2016). Neural Systems Underlying the Processing of Complex Sentences. In *Neurobiology of Language* (pp. 597–606). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00048-1>
- Meyer, M., Alter, K., Friederici, A. D., Lohmann, G., & von Cramon, D. Y. (2002). fMRI reveals brain regions mediating slow prosodic modulations in spoken sentences. *Human Brain Mapping*, 17(2), 73–88. <https://doi.org/10.1002/hbm.10042>
- Meyer, M., Friederici, A. D., & von Cramon, D. Y. (2000). Neurocognition of auditory sentence comprehension: Event related fMRI reveals sensitivity to syntactic violations and task demands. *Cognitive Brain Research*, 9(1), 19–33. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(99\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(99)00039-7)
- Meyer, M., Steinhauer, K., Alter, K., Friederici, A. D., & von Cramon, D. Y. (2004). Brain activity varies with modulation of dynamic pitch variance in sentence melody. *Brain and Language*, 89(2), 277–289. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00350-X](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00350-X)
- Milham, M. P., Banich, M. T., & Barad, V. (2003). Competition for priority in processing increases prefrontal cortex's involvement in top-down control: An event-related fMRI study of the stroop task. *Cognitive Brain Research*, 17(2), 212–222. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(03\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(03)00108-3)

- Milham, M. P., Banich, M. T., Webb, A., Barad, V., Cohen, N. J., Wszalek, T., & Kramer, A. F. (2001). The relative involvement of anterior cingulate and prefrontal cortex in attentional control depends on nature of conflict. *Cognitive Brain Research*, 12(3), 467–473. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(01\)00076-3](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(01)00076-3)
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An Integrative Theory of Prefrontal Cortex Function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Millotte, S., René, A., Wales, R., & Christophe, A. (2008). Phonological phrase boundaries constrain the online syntactic analysis of spoken sentences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(4), 874–885. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.34.4.874>
- Mirman, D., & Britt, A. E. (2014). What we talk about when we talk about access deficits. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1634), 20120388. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0388>
- Mishra, R. K., & Singh, S. (2014). Activation of shape and semantic information during ambiguous homophone processing: Eye tracking evidence from Hindi. *Cognitive Processing*, 15(4), 451–465. <https://doi.org/10.1007/s10339-014-0622-4>
- Misurelli, S. M., & Litovsky, R. Y. (2015). Spatial release from masking in children with bilateral cochlear implants and with normal hearing: Effect of target-interferer similarity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(1), 319–331. <https://doi.org/10.1121/1.4922777>
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1), 8–14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134–140. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Müller, U., Jacques, S., Brocki, K., & Zelazo, P. D. (2001). The Executive Functions of Language in Preschool Children. In A. Winsler, C. Fernyhough, & I. Montero (Eds.), *Private Speech, Executive Functioning, and the Development of Verbal Self-Regulation* (pp. 53–68). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511581533.005>
- Münste, T. F., Heinze, H.-J., & Mangun, G. R. (1993). Dissociation of Brain Activity Related to Syntactic and Semantic Aspects of Language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(3), 335–344. <https://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.3.335>
- Murray, L. L. (2018). Sentence processing in aphasia: An examination of material-specific and general cognitive factors. *Journal of Neurolinguistics*, 48, 26–46. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2018.03.007>
- Musz, E., & Thompson-Schill, S. L. (2017). Tracking competition and cognitive control during language comprehension with multi-voxel pattern analysis. *Brain and Language*, 165, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.11.002>
- Näätänen, R., Gaillard, G. W. K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42(4), 313–329.
- Naccache, L., & Dehaene, S. (2001). Unconscious semantic priming extends to novel unseen stimuli. *Cognition*, 80(3), 215–229. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(00\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00139-6)

- Nelson, J. K., Reuter-Lorenz, P. A., Sylvester, C.-Y. C., Jonides, J., & Smith, E. E. (2003). Dissociable neural mechanisms underlying response-based and familiarity-based conflict in working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*(19), 11171–11175. <https://doi.org/10.1073/pnas.1334125100>
- Nelson, M. J., El Karoui, I., Giber, K., Yang, X., Cohen, L., Koopman, H., Cash, S. S., Naccache, L., Hale, J. T., Pallier, C., & Dehaene, S. (2017). Neurophysiological dynamics of phrase-structure building during sentence processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(18), E3669–E3678. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701590114>
- Neville, H., Nicol, J., Barss, A., Forster, K. I., & Garrett, M. F. (1991). Syntactically Based Sentence Processing Classes: Evidence from Event-Related Brain Potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *3*(2), 151–165.
- Newman, A. J., Pancheva, R., Ozawa, K., Neville, H. J., & Ullman, M. T. (2001). An Event-Related fMRI Study of Syntactic and Semantic Violations. *Journal of Psycholinguistic Research*, *30*(3), 339–364.
- Newman, S. D., Carpenter, P. A., Varma, S., & Just, M. A. (2003). Frontal and parietal participation in problem solving in the Tower of London: FMRI and computational modeling of planning and high-level perception. *Neuropsychologia*, *41*(12), 1668–1682. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(03\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(03)00091-5)
- Ni, W., Constable, R. T., Mencl, W. E., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Gore, J. C., & Shankweiler, D. (2000). An Event-related Neuroimaging Study Distinguishing Form and Content in Sentence Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(1), 120–133. <https://doi.org/10.1162/08989290051137648>
- Nichols, E. S., Wild, C. J., Stojanoski, B., Battista, M. E., & Owen, A. M. (2020). Bilingualism Affords No General Cognitive Advantages: A Population Study of Executive Function in 11,000 People. *Psychological Science*, *31*(5), 548–567. <https://doi.org/10.1177/0956797620903113>
- Nieuwland, M. S., Politzer-Ahles, S., Heyselaar, E., Segaert, K., Darley, E., Kazanina, N., Von Grebmer Zu Wolfsthurn, S., Bartolozzi, F., Kogan, V., Ito, A., Mézière, D., Barr, D. J., Rousselet, G. A., Ferguson, H. J., Busch-Moreno, S., Fu, X., Tuomainen, J., Kulakova, E., Husband, E. M., ... Huettig, F. (2018). Large-scale replication study reveals a limit on probabilistic prediction in language comprehension. *eLife*, *7*, e33468. <https://doi.org/10.7554/eLife.33468>
- Nobre, A. C., Allison, T., & McCarthy, G. (1998). Modulation of human extrastriate visual processing by selective attention to colours and words. *Brain*, *121*(7), 1357–1368. <https://doi.org/10.1093/brain/121.7.1357>
- Noonan, K. A., Jefferies, E., Corbett, F., & Lambon Ralph, M. A. (2010). Elucidating the Nature of Deregulated Semantic Cognition in Semantic Aphasia: Evidence for the Roles of Prefrontal and Temporo-parietal Cortices. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(7), 1597–1613. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21289>
- Noppeney, U., & Price, C. J. (2002). A PET Study of Stimulus- and Task-Induced Semantic Processing. *NeuroImage*, *15*(4), 927–935. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1015>
- Novais-Santos, S., Gee, J., Shah, M., Troiani, V., Work, M., & Grossman, M. (2007). *Resolving sentence ambiguity with planning and working memory resources: Evidence from fMRI*. 18.
- Novick, J. M., Hussey, E., Teubner-Rhodes, S., Harbison, J. I., & Bunting, M. F. (2014). Clearing the garden-path: Improving sentence processing through cognitive control training. *Language, Cognition and Neuroscience*, *29*(2), 186–217. <https://doi.org/10.1080/01690965.2012.758297>

- Novick, J. M., Kan, I. P., Trueswell, J. C., & Thompson-Schill, S. L. (2009). A case for conflict across multiple domains: Memory and language impairments following damage to ventrolateral prefrontal cortex. *Cognitive Neuropsychology*, 26(6), 527–567. <https://doi.org/10.1080/02643290903519367>
- Novick, J. M., Trueswell, J. C., & Thompson-Schill, S. L. (2005). Cognitive control and parsing: Reexamining the role of Broca's area in sentence comprehension. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5(3), 263–281. <https://doi.org/10.3758/CABN.5.3.263>
- Novick, J. M., Trueswell, J. C., & Thompson-Schill, S. L. (2010). Broca's Area and Language Processing: Evidence for the Cognitive Control Connection: Broca's Area and Language Processing. *Language and Linguistics Compass*, 4(10), 906–924. <https://doi.org/10.1111/j.1749-818X.2010.00244.x>
- Nozari, N. (2019). The dual origin of semantic errors in access deficit: Activation vs. inhibition deficit. *Cognitive Neuropsychology*, 36(1–2), 31–53. <https://doi.org/10.1080/02643294.2019.1587397>
- Nozari, N., & Thompson-Schill, S. L. (2016). Left Ventrolateral Prefrontal Cortex in Processing of Words and Sentences. In *Neurobiology of Language* (pp. 569–584). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00046-8>
- Nygaard, L. C., & Lunders, E. R. (2002). Resolution of lexical ambiguity by emotional tone of voice. *Memory & Cognition*, 30(4), 583–593.
- Obleser, J., Wostmann, M., Hellbernd, N., Wilsch, A., & Maess, B. (2012). Adverse Listening Conditions and Memory Load Drive a Common Alpha Oscillatory Network. *Journal of Neuroscience*, 32(36), 12376–12383. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4908-11.2012>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97–113.
- Onifer, W., & Swinney, D. A. (1981). Accessing lexical ambiguities during sentence comprehension: Effects of frequency of meaning and contextual bias. *Memory & Cognition*, 9(3), 225–236. <https://doi.org/10.3758/BF03196957>
- Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., & Schoffelen, J.-M. (2011). FieldTrip: Open Source Software for Advanced Analysis of MEG, EEG, and Invasive Electrophysiological Data. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2011/156869>
- Ossandon, T., Jerbi, K., Vidal, J. R., Bayle, D. J., Henaff, M.-A., Jung, J., Minotti, L., Bertrand, O., Kahane, P., & Lachaux, J.-P. (2011). Transient Suppression of Broadband Gamma Power in the Default-Mode Network Is Correlated with Task Complexity and Subject Performance. *Journal of Neuroscience*, 31(41), 14521–14530. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2483-11.2011>
- Ossandon, T., Vidal, J. R., Ciumas, C., Jerbi, K., Hamame, C. M., Dalal, S. S., Bertrand, O., Minotti, L., Kahane, P., & Lachaux, J.-P. (2012). Efficient 'Pop-Out' Visual Search Elicits Sustained Broadband Gamma Activity in the Dorsal Attention Network. *Journal of Neuroscience*, 32(10), 3414–3421. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6048-11.2012>
- Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31(6), 785–806. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(92\)90039-Z](https://doi.org/10.1016/0749-596X(92)90039-Z)
- Osterhout, McKinnon, Bersick, & Corey. (1996). On the language specificity of the brain response to syntactic anomalies: Is the syntactic positive shift a member of the P300 family? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(6), 507–526.

- Otten, M., Nieuwland, M. S., & Van Berkum, J. J. (2007). Great expectations: Specific lexical anticipation influences the processing of spoken language. *BMC Neuroscience*, *8*(1), 89. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-8-89>
- Otten, M., & Van Berkum, J. J. A. (2008). Discourse-Based Word Anticipation During Language Processing: Prediction or Priming? *Discourse Processes*, *45*(6), 464–496. <https://doi.org/10.1080/01638530802356463>
- Owen, A. M., Downes, J. J., Sahakian, B. J., Polkey, C. E., & Robbins, T. W. (1990). Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, *28*(10), 1021–1034. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(90\)90137-D](https://doi.org/10.1016/0028-3932(90)90137-D)
- Paap, K. R., Johnson, H. A., & Sawi, O. (2015). Bilingual advantages in executive functioning either do not exist or are restricted to very specific and undetermined circumstances. *Cortex*, *69*, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.04.014>
- Pallier, C., Devauchelle, A.-D., & Dehaene, S. (2011). Cortical representation of the constituent structure of sentences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(6), 2522–2527. <https://doi.org/10.1073/pnas.1018711108>
- Papeo, L., & de Vega, M. (2020). The neurobiology of lexical and sentential negation. In *The Oxford Handbook of Negation*.
- Paradis, M. (1987). *Bilingual aphasia test* (Lawrence Erlbaum Associates).
- Patterson, K., Nestor, P. J., & Rogers, T. T. (2007). Where do you know what you know? The representation of semantic knowledge in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*(12), 976–987. <https://doi.org/10.1038/nrn2277>
- Payne, B. R., & Federmeier, K. D. (2018). Contextual constraints on lexico-semantic processing in aging: Evidence from single-word event-related brain potentials. *Brain Research*, *1687*, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2018.02.021>
- Peelle, J. E. (2019). Language and aging. In *The Oxford Handbook of Neurolinguistics* (pp. 216–295).
- Peña, M., & Melloni, L. (2012). Brain Oscillations during Spoken Sentence Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(5), 1149–1164. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00144
- Pérez, A., Molinaro, N., Mancini, S., Barraza, P., & Carreiras, M. (2012). Oscillatory dynamics related to the Unagreement pattern in Spanish. *Neuropsychologia*, *50*(11), 2584–2597. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.07.009>
- Perquin, M., Vaillant, M., Schuller, A.-M., Pastore, J., Dartigues, J.-F., Lair, M.-L., Diederich, N., & on behalf of the MemoVie Group. (2013). Lifelong Exposure to Multilingualism: New Evidence to Support Cognitive Reserve Hypothesis. *PLoS ONE*, *8*(4), e62030. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062030>
- Perrone-Bertolotti, M., Dohen, M., Løevenbruck, H., Sato, M., Pichat, C., & Baciú, M. (2013). Neural correlates of the perception of contrastive prosodic focus in French: A functional magnetic resonance imaging study: Correlates of Contrastive Prosodic Focus. *Human Brain Mapping*, *34*(10), 2574–2591. <https://doi.org/10.1002/hbm.22090>
- Perrone-Bertolotti, M., El Bouzaïdi Tiali, S., Vidal, J. R., Petton, M., Croize, A. C., Deman, P., Rheims, S., Minotti, L., Bhattacharjee, M., Baciú, M., Kahane, P., & Lachaux, J. P. (2020). A real-time marker of object-based attention in the human brain. A possible component of a “gate-keeping mechanism” performing late attentional selection in the Ventrro-Lateral Prefrontal Cortex. *NeuroImage*, *210*, 116574. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116574>

- Perrone-Bertolotti, M., Kujala, J., Vidal, J. R., Hamame, C. M., Ossandon, T., Bertrand, O., Minotti, L., Kahane, P., Jerbi, K., & Lachaux, J.-P. (2012). How Silent Is Silent Reading? Intracerebral Evidence for Top-Down Activation of Temporal Voice Areas during Reading. *Journal of Neuroscience*, *32*(49), 17554–17562. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2982-12.2012>
- Perrone-Bertolotti, M., Rapin, L., Lachaux, J.-P., Baciú, M., & Løevenbrück, H. (2014). What is that little voice inside my head? Inner speech phenomenology, its role in cognitive performance, and its relation to self-monitoring. *Behavioural Brain Research*, *261*, 220–239. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.12.034>
- Perrone-Bertolotti, M., Tassin, M., & Meunier, F. (2017). Speech-in-speech perception and executive function involvement. *PLOS ONE*, *12*(7), e0180084. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180084>
- Pichora-Fuller, M. K. (2003). Processing speed and timing in aging adults: Psychoacoustics, speech perception, and comprehension. *International Journal of Audiology*, *42*(sup1), 59–67. <https://doi.org/10.3109/14992020309074625>
- Pichora-Fuller, M. K., Schneider, B. A., & Daneman, M. (1995). How young and old adults listen to and remember speech in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *97*(1), 593–608.
- Pickering, M. J., & Gambi, C. (2018). Predicting while comprehending language: A theory and review. *Psychological Bulletin*, *144*(10), 1002–1044. <https://doi.org/10.1037/bul0000158>
- Pickering, M. J., & Garrod, S. (2007). Do people use language production to make predictions during comprehension? *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(3), 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.12.002>
- Plante, E., Creusere, M., & Sabin, C. (2002). Dissociating Sentential Prosody from Sentence Processing: Activation Interacts with Task Demands. *NeuroImage*, *17*(1), 401–410. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1182>
- Poulin-Dubois, D., Blaye, A., Coutya, J., & Bialystok, E. (2011). The effects of bilingualism on toddlers' executive functioning. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(3), 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.10.009>
- Poullisse, C., Wheeldon, L., & Segaert, K. (2019). Evidence against preserved syntactic comprehension in healthy aging. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *45*(12), 2290–2308. <https://doi.org/10.1037/xlm0000707>
- Price, P., Ostendorf, M., Shattuck-Hufnagel, S., & Fong, C. (1991). The Use of Prosody in Syntactic Disambiguation. *Journal of the Acoustical Society of America*, *90*(6), 2956–2970.
- Pulvermüller, F., Moseley, R. L., Egorova, N., Shebani, Z., & Boulenger, V. (2014). Motor cognition–motor semantics: Action perception theory of cognition and communication. *Neuropsychologia*, *55*, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.12.002>
- Pulvermüller, F., & Shtyrov, Y. (2003). Automatic processing of grammar in the human brain as revealed by the mismatch negativity. *NeuroImage*, *20*(1), 159–172. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00261-1](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00261-1)
- Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., Hasting, A. S., & Carlyon, R. P. (2008). Syntax as a reflex: Neurophysiological evidence for early automaticity of grammatical processing. *Brain and Language*, *104*(3), 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2007.05.002>
- Ray, S., Niebur, E., Hsiao, S. S., Sinai, A., & Crone, N. E. (2008). High-frequency gamma activity (80–150Hz) is increased in human cortex during selective attention. *Clinical Neurophysiology*, *119*(1), 116–133. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.09.136>

- Rayner, K., Carlson, M., & Frazier, L. (1983). The interaction of syntax and semantics during sentence processing: Eye movements in the analysis of semantically biased sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 22(3), 358–374. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(83\)90236-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(83)90236-0)
- Rhodes, M. G. (2004). Age-Related Differences in Performance on the Wisconsin Card Sorting Test: A Meta-Analytic Review. *Psychology and Aging*, 19(3), 482–494. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.19.3.482>
- Ridderinkhof, K. R., Band, G. P. H., & Logan, G. D. (1999). A study of adaptive behavior: Effects of age and irrelevant information on the ability to inhibit one's actions. *Acta Psychologica*, 315–337.
- Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). 'Oops!': Performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, 35(6), 747–758. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00015-8)
- Rodd, J. M., Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2005). The Neural Mechanisms of Speech Comprehension: fMRI studies of Semantic Ambiguity. *Cerebral Cortex*, 15(8), 1261–1269. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi009>
- Rodd, J. M., Gaskell, G., & Marslen-Wilson, W. (2002). Making Sense of Semantic Ambiguity: Semantic Competition in Lexical Access. *Journal of Memory and Language*, 46(2), 245–266. <https://doi.org/10.1006/jmla.2001.2810>
- Rodd, J. M., Johnsrude, I. S., & Davis, M. H. (2010). The role of domain-general frontal systems in language comprehension: Evidence from dual-task interference and semantic ambiguity. *Brain and Language*, 115(3), 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2010.07.005>
- Röder, B., Stock, O., Neville, H., Bien, S., & Rösler, F. (2002). Brain Activation Modulated by the Comprehension of Normal and Pseudo-word Sentences of Different Processing Demands: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *NeuroImage*, 15(4), 1003–1014. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1026>
- Rogalsky, C., & Hickok, G. (2009). Selective Attention to Semantic and Syntactic Features Modulates Sentence Processing Networks in Anterior Temporal Cortex. *Cerebral Cortex*, 19(4), 786–796. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn126>
- Rogalsky, & Hickok. (2011). The Role of Broca's Area in Sentence Comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(7), 1664–1680.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(2), 207–231. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.124.2.207>
- Röhm, D., Klimesch, W., Haider, H., & Doppelmayr, M. (2001). The role of theta and alpha oscillations for language comprehension in the human electroencephalogram. *Neuroscience Letters*, 310(2–3), 137–140. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)02106-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)02106-1)
- Rommers, J., Dijkstra, T., & Bastiaansen, M. (2013). Context-dependent Semantic Processing in the Human Brain: Evidence from Idiom Comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(5), 762–776. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00337
- Rosen, V. M., & Engle, R. W. (1997). The Role of Working Memory Capacity in Retrieval. *Journal of Experimental Psychology: General*, 126(3), 211–227.
- Rösler, F., Pechmann, T., Streb, J., Röder, B., & Hennighausen, E. (1998). Parsing of Sentences in a Language with Varying Word Order: Word-by-Word Variations of Processing Demands Are Revealed by Event-Related Brain Potentials. *Journal of Memory and Language*, 38(2), 150–176. <https://doi.org/10.1006/jmla.1997.2551>

- Ryskin, R., Levy, R. P., & Fedorenko, E. (2020). Do domain-general executive resources play a role in linguistic prediction? Re-evaluation of the evidence and a path forward. *Neuropsychologia*, *136*, 107258. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107258>
- Salthouse, T. A. (2000). Aging and measures of processing speed. *Biological Psychology*, *54*(1–3), 35–54. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00052-1)
- Salthouse, T. A. (2009). When does age-related cognitive decline begin? *Neurobiology of Aging*, *30*(4), 507–514. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2008.09.023>
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive Functioning as a Potential Mediator of Age-Related Cognitive Decline in Normal Adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, *132*(4), 566–594. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.132.4.566>
- Schaie, K. W. (1996). Intellectual Development in Adulthood. In *Handbook of the psychology of aging* (4th ed., pp. 266–286).
- Schaie, K. W. (2005). What Can We Learn From Longitudinal Studies of Adult Development? *Research in Human Development*, *2*(3), 133–158. https://doi.org/10.1207/s15427617rhd0203_4
- Schell, M., Zaccarella, E., & Friederici, A. D. (2017). Differential cortical contribution of syntax and semantics: An fMRI study on two-word phrasal processing. *Cortex*, *96*, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.09.002>
- Schneider, W., & Chein, J. M. (2003). Controlled & automatic processing: Behavior, theory, and biological mechanisms. *Cognitive Science*, *27*(3), 525–559. https://doi.org/10.1207/s15516709cog2703_8
- Schwartz, J.-L., Berthommier, F., & Savariaux, C. (2004). Seeing to hear better: Evidence for early audio-visual interactions in speech identification. *Cognition*, *93*(2), 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.01.006>
- Scott, S. K., & McGettigan, C. (2013). The neural processing of masked speech. *Hearing Research*, *303*, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.05.001>
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., Reiss, A. L., & Greicius, M. D. (2007). Dissociable Intrinsic Connectivity Networks for Salience Processing and Executive Control. *Journal of Neuroscience*, *27*(9), 2349–2356. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5587-06.2007>
- Seidenberg, M. S., Tanenhaus, M. K., Leiman, J. M., & Bienkowski, M. (1982). Automatic access of the meanings of ambiguous words in context: Some limitations of knowledge-based processing. *Cognitive Psychology*, *14*(4), 489–537.
- Service, E., Helenius, P., Maury, S., & Salmelin, R. (2007). Localization of Syntactic and Semantic Brain Responses using Magnetoencephalography. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(7), 1193–1205. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.7.1193>
- Shaffer, W. O., & LaBerge, D. (1979). Automatic semantic processing of unattended words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *18*(4), 413–426. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(79\)90228-7](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(79)90228-7)
- Shain, C., Blank, I. A., Fedorenko, E., Gibson, E., & Schuler, W. (2021). *Robust effects of working memory demand during naturalistic language comprehension in language-selective cortex* [Preprint]. Neuroscience. <https://doi.org/10.1101/2021.09.18.460917>
- Shain, C., Blank, I. A., van Schijndel, M., Schuler, W., & Fedorenko, E. (2019). fMRI reveals language-specific predictive coding during naturalistic sentence comprehension. *Neuropsychologia*, *138*. <https://doi.org/10.1101/717512>

- Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 298(1089), 199–209. <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0082>
- Shallice, T., & Burgess, P. (1996). The domain of supervisory processes and temporal organization of behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 351(1346), 1405–1412. <https://doi.org/10.1098/rstb.1996.0124>
- Sheng, J., Zheng, L., Lyu, B., Cen, Z., Qin, L., Tan, L. H., Huang, M.-X., Ding, N., & Gao, J.-H. (2019). The Cortical Maps of Hierarchical Linguistic Structures during Speech Perception. *Cerebral Cortex*, 29(8), 3232–3240. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy191>
- Shtyrov, Y. (2010). Automaticity and attentional control in spoken language processing: Neurophysiological evidence. *The Mental Lexicon*, 5(2), 255–276. <https://doi.org/10.1075/ml.5.2.06sht>
- Shtyrov, Y., Kujala, T., & Pulvermüller, F. (2010). Interactions between Language and Attention Systems: Early Automatic Lexical Processing? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(7), 1465–1478. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21292>
- Siegelman, M., Blank, I. A., Mineroff, Z., & Fedorenko, E. (2019). An Attempt to Conceptually Replicate the Dissociation between Syntax and Semantics during Sentence Comprehension. *Neuroscience*, 413, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.06.003>
- Simpson, G. B. (1981). Meaning dominance and semantic context in the processing of lexical ambiguity. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 20(1), 120–136. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(81\)90356-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(81)90356-X)
- Simpson, G. B., & Krueger, M. A. (1991). Selective access of homograph meanings in sentence context. *Journal of Memory and Language*, 30(6), 627–643. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(91\)90029-J](https://doi.org/10.1016/0749-596X(91)90029-J)
- Simpson, S. A., & Cooke, M. (2005). *Consonant identification in N-talker babble is a nonmonotonic function of N (L)*. 118(5), 2775–2778.
- Slobin, D. I. (1966). Grammatical transformations and sentence comprehension in childhood and adulthood. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 5(3), 219–227. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(66\)80023-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(66)80023-3)
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). *Storage and Executive Processes in the Frontal Lobes*. 283(5408), 1657–1661.
- Spinelli, E., McQueen, J. M., & Cutler, A. (2003). Processing resyllabified words in French. *Journal of Memory and Language*, 48(2), 233–254. [https://doi.org/10.1016/S0749-596X\(02\)00513-2](https://doi.org/10.1016/S0749-596X(02)00513-2)
- Spivey, M. J., & Tanenhaus, M. K. (1998). Syntactic Ambiguity Resolution in Discourse: Modeling the Effects of Referential Context and Lexical Frequency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24(6), 1521–1543.
- Steinhauer, K., Alter, K., & Friederici, A. D. (1999). Brain potentials indicate immediate use of prosodic cues in natural speech processing. *Nature Neuroscience*, 2(2), 191–196. <https://doi.org/10.1038/5757>
- Steinhauer, K., & Drury, J. E. (2012). On the early left-anterior negativity (ELAN) in syntax studies. *Brain and Language*, 120(2), 135–162. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.07.001>
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662.

- Sung, J. E., Yoo, J. K., Lee, S. E., & Eom, B. (2017). Effects of age, working memory, and word order on passive-sentence comprehension: Evidence from a verb-final language. *International Psychogeriatrics*, 29(6), 939–948. <https://doi.org/10.1017/S1041610217000047>
- Swets, B., Desmet, T., Hambrick, D. Z., & Ferreira, F. (2007). The role of working memory in syntactic ambiguity resolution: A psychometric approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(1), 64–81. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.1.64>
- Swick, D., Ashley, V., & Turken, A. U. (2008). Left inferior frontal gyrus is critical for response inhibition. *BMC Neuroscience*, 9(1), 102. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-102>
- Tabossi, P., Colombo, L., & Job, R. (1987). Accessing lexical ambiguity: Effects of context and dominance. *Psychological Research*, 49(2–3), 161–167. <https://doi.org/10.1007/BF00308682>
- Tamaoka, K., Kanduboda, P. B. A., & Sakai, H. (2011). Effects of Word Order Alternation on the Sentence Processing of Sinhalese Written and Spoken Forms. *Open Journal of Modern Linguistics*, 01(02), 24–32. <https://doi.org/10.4236/ojml.2011.12004>
- Tanenhaus, M. K., Leiman, J. M., & Seidenberg, M. S. (1979). Evidence for Multiple Stages in the Processing of Ambiguous Words in Syntactic Contexts. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 18, 427–440.
- Tanenhaus, M. K., Magnuson, J. S., Dahan, D., & Chambers, C. (2000). Eye Movements and Lexical Access in Spoken-Language Comprehension: Evaluating a Linking Hypothesis between Fixations and Linguistic Processing. *Journal of Psycholinguistic Research*, 29(6).
- Tanenhaus, M. K., Spivey-Knowlton, M., Eberhard, K., & Sedivy, J. (1995). Integration of visual and linguistic information in spoken language comprehension. *Science*, 268(5217), 1632–1634. <https://doi.org/10.1126/science.7777863>
- Tettamanti, M., Alkadhi, H., Moro, A., Perani, D., Kollias, S., & Weniger, D. (2002). Neural Correlates for the Acquisition of Natural Language Syntax. *NeuroImage*, 17(2), 700–709. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1201>
- Tettamanti, M., Manenti, R., Della Rosa, P. A., Falini, A., Perani, D., Cappa, S. F., & Moro, A. (2008). Negation in the brain: Modulating action representations. *NeuroImage*, 43(2), 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.08.004>
- Tettamanti, M., & Weniger, D. (2006). Broca's Area: A Supramodal Hierarchical Processor? *Cortex*, 42(4), 491–494. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70384-8](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70384-8)
- Teubner-Rhodes, S. E., Bolger, D. J., & Novick, J. M. (2017). Conflict monitoring and detection in the bilingual brain. *Bilingualism: Language and Cognition*, 22(2), 228–252. <https://doi.org/10.1017/S1366728917000670>
- Teubner-Rhodes, S. E., Mishler, A., Corbett, R., Andreu, L., Sanz-Torrent, M., Trueswell, J. C., & Novick, J. M. (2016). The effects of bilingualism on conflict monitoring, cognitive control, and garden-path recovery. *Cognition*, 150, 213–231. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.02.011>
- Thompson-Schill, S. L., Bedny, M., & Goldberg, R. F. (2005). The frontal lobes and the regulation of mental activity. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.006>
- Thompson-Schill, S. L., D'Esposito, M., Aguirre, G. K., & Farah, M. J. (1997). Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge: A reevaluation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(26), 14792–14797. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.26.14792>

- Thompson-Schill, S. L., Jonides, J., Marshuetz, C., Smith, E. E., D'Esposito, M., Kan, I. P., & Knight, R. T. (2002). Effects of frontal lobe damage on interference effects in working memory. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2(2), 109–120.
- Thornton, R., & Light, L. L. (2006). Language Comprehension and Production in Normal Aging. In *Handbook of The Psychology of Aging* (6th ed., pp. 261–287).
- Thothathiri, M., Asaro, C. T., Hsu, N. S., & Novick, J. M. (2018). Who did what? A causal role for cognitive control in thematic role assignment during sentence comprehension. *Cognition*, 178, 162–177. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.05.014>
- Tierney, A., Rosen, S., & Dick, F. (2020). *Speech-in-speech perception, non-verbal selective attention, and musical training*.
- Tomasello, M. (2003). The Key Is Social Cognition. In *Language in Mind: Advances in the Study of Language and Thought* (pp. 47–57).
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(1), 3–18. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.1.3>
- Traxler, M. J., Pickering, M. J., & Clifton, C. (1998). Adjunct Attachment Is Not a Form of Lexical Ambiguity Resolution. *Journal of Memory and Language*, 39(4), 558–592. <https://doi.org/10.1006/jmla.1998.2600>
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). *A Feature-Integration Theory of Attention*. 12, 97–136.
- Troyer, A. K., Moscovitch, M., Winocur, G., Alexander, M. P., & Stuss, D. (1998). Clustering and switching on verbal fluency: The effects of focal- frontal- and temporal- lobe lesions. *Neuropsychologia*, 36(6), 499–504.
- Trueswell, J. C. (1996). The Role of Lexical Frequency in Syntactic Ambiguity Resolution. *Journal of Memory and Language*, 35(4), 566–585. <https://doi.org/10.1006/jmla.1996.0030>
- Trueswell, J. C., Sekerina, I., Hill, N. M., & Logrip, M. L. (1999). The kindergarten-path effect: Studying on-line sentence processing in young children. *Cognition*, 73(2), 89–134. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00032-3)
- Trueswell, J. C., Tanenhaus, M. K., & Garnsey, S. M. (1994). Semantic influences on parsing: Use of thematic role information in syntactic ambiguity resolution. *Journal of Memory and Language*, 33(3), 285–318.
- Trueswell, J. C., Tanenhaus, M. K., & Kello, C. (1993). Verb-specific constraints in sentence processing: Separating effects of lexical preference from garden-paths. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19(3), 528–553. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.19.3.528>
- Tsapkini, K., Frangakis, C. E., & Hillis, A. E. (2011). The function of the left anterior temporal pole: Evidence from acute stroke and infarct volume. *Brain*, 134(10), 3094–3105. <https://doi.org/10.1093/brain/awr050>
- Tun, P. A., O'Kane, G., & Wingfield, A. (2002). Distraction by competing speech in young and older adult listeners. *Psychology and Aging*, 17(3), 453–467. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.17.3.453>
- Ullsperger, M., Bylsma, L. M., & Botvinick, M. M. (2005). The conflict adaptation effect: It's not just priming. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5(4), 467–472. <https://doi.org/10.3758/CABN.5.4.467>

- Vaden, K. I., Kuchinsky, S. E., Cute, S. L., Ahlstrom, J. B., Dubno, J. R., & Eckert, M. A. (2013). The Cingulo-Opercular Network Provides Word-Recognition Benefit. *Journal of Neuroscience*, 33(48), 18979–18986. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1417-13.2013>
- Van Berkum, J. J. A., Brown, C. M., Zwitserlood, P., Kooijman, V., & Hagoort, P. (2005). Anticipating Upcoming Words in Discourse: Evidence From ERPs and Reading Times. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31(3), 443–467. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.31.3.443>
- Van Berkum, J. J. A., van den Brink, D., Tesink, C. M. J. Y., Kos, M., & Hagoort, P. (2008). The Neural Integration of Speaker and Message. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(4), 580–591. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20054>
- van de Meerendonk, N., Rueschemeyer, S.-A., & Kolk, H. H. J. (2013). Language comprehension interrupted: Both language errors and word degradation activate Broca's area. *Brain and Language*, 126(3), 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.07.004>
- Van der Linden, M., Brédart, S., & Beerten, A. (1994). Age-related differences in updating working memory. *British Journal of Psychology*, 85, 145–152.
- Van der Lubbe, R. H. J., & Verleger, R. (2002). Aging and the Simon task. *Psychophysiology*, 39(1), 100–110. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3910100>
- Van Engen, K. J. V., & Bradlow, A. R. (2007). *Sentence recognition in native- and foreign-language multi-talker background noise*. 121(1), 519–526.
- van Gompel, R. P. G., Pickering, M. J., & Traxler, M. J. (2001). Reanalysis in Sentence Processing: Evidence against Current Constraint-Based and Two-Stage Models. *Journal of Memory and Language*, 45(2), 225–258. <https://doi.org/10.1006/jmla.2001.2773>
- Vandenberghe, R., Nobre, A. C., & Price, C. J. (2002). The Response of Left Temporal Cortex to Sentences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(4), 550–560. <https://doi.org/10.1162/08989290260045800>
- Varnet, L., Meyer, J., Hoen, M., & Meunier, F. (2012). Phoneme resistance during speech-in-speech comprehension. *13th Annual Conference of the International Speech Communication Association*.
- Verreyt, N., Woumans, E., Vandelanotte, D., Szmalec, A., & Duyck, W. (2016). The influence of language-switching experience on the bilingual executive control advantage. *Bilingualism: Language and Cognition*, 19(1), 181–190. <https://doi.org/10.1017/S1366728914000352>
- Vidal, J. R., Freyermuth, S., Jerbi, K., Hamame, C. M., Ossandon, T., Bertrand, O., Minotti, L., Kahane, P., Berthoz, A., & Lachaux, J.-P. (2012). Long-Distance Amplitude Correlations in the High Gamma Band Reveal Segregation and Integration within the Reading Network. *Journal of Neuroscience*, 32(19), 6421–6434. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4363-11.2012>
- Vidal, J. R., Hamame, C. M., Jerbi, K., Dalal, S. S., Ciumas, C., Perrone-Bertolotti, M., Ossandon, T., Minotti, L., Kahane, P., & Lachaux, J.-P. (2011). *Localizing cognitive functions in epilepsy with intracranial gamma-band dynamic responses*. 13.
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*, 30(4), 1414–1432. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.11.002>
- Visser, M., Jefferies, E., & Lambon Ralph, M. A. (2010). Semantic Processing in the Anterior Temporal Lobes: A Meta-analysis of the Functional Neuroimaging Literature. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(6), 1083–1094. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21309>

- Vugs, B., Knoors, H., Cuperus, J., Hendriks, M., & Verhoeven, L. (2016). Interactions between working memory and language in young children with specific language impairment (SLI). *Child Neuropsychology*, 22(8), 955–978. <https://doi.org/10.1080/09297049.2015.1058348>
- Vuong, L. C., & Martin, R. C. (2011). LIFG-based attentional control and the resolution of lexical ambiguities in sentence context. *Brain and Language*, 116(1), 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2010.09.012>
- Vuong, L. C., & Martin, R. C. (2014). Domain-specific executive control and the revision of misinterpretations in sentence comprehension. *Language, Cognition and Neuroscience*, 29(3), 312–325. <https://doi.org/10.1080/01690965.2013.836231>
- Walenski, M., Europa, E., Caplan, D., & Thompson, C. K. (2019). Neural networks for sentence comprehension and production: An ALE-based meta-analysis of neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 40(8), 2275–2304. <https://doi.org/10.1002/hbm.24523>
- Wang, L., Bastiaansen, M., Yang, Y., & Hagoort, P. (2011). The influence of information structure on the depth of semantic processing: How focus and pitch accent determine the size of the N400 effect. *Neuropsychologia*, 49(5), 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.035>
- Wehbe, L., Blank, I. A., Shain, C., Futrell, R., Levy, R., von der Malsburg, T., Smith, N., Gibson, E., & Fedorenko, E. (2020). *Incremental language comprehension difficulty predicts activity in the language network but not the multiple demand network* [Preprint]. Neuroscience. <https://doi.org/10.1101/2020.04.15.043844>
- Weighall, A. R. (2008). The kindergarten path effect revisited: Children's use of context in processing structural ambiguities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99(2), 75–95. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.10.004>
- Weiland, C., Barata, M. C., & Yoshikawa, H. (2014). The Co-Occurring Development of Executive Function Skills and Receptive Vocabulary in Preschool-Aged Children: A Look at the Direction of the Developmental Pathways: Executive Function and Receptive Vocabulary Development in Preschool. *Infant and Child Development*, 23(1), 4–21. <https://doi.org/10.1002/icd.1829>
- Weiss, S., & Mueller, H. M. (2003). The contribution of EEG coherence to the investigation of language. *Brain and Language*, 85(2), 325–343. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00067-1)
- Weiss, S., Mueller, H., Schack, B., King, J., Kutas, M., & Rappelsberger, P. (2005). Increased neuronal communication accompanying sentence comprehension. *International Journal of Psychophysiology*, 57(2), 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.03.013>
- White, L. J., & Greenfield, D. B. (2016). Executive functioning in Spanish- and English-speaking Head Start preschoolers. *Developmental Science*, 20(1), e12502. <https://doi.org/10.1111/desc.12502>
- Wicha, N. Y. Y., Moreno, E. M., & Kutas, M. (2004). Anticipating Words and Their Gender: An Event-related Brain Potential Study of Semantic Integration, Gender Expectancy, and Gender Agreement in Spanish Sentence Reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(7), 1272–1288. <https://doi.org/10.1162/0898929041920487>
- Wikman, P., Sahari, E., Salmela, V., Leminen, A., Leminen, M., Laine, M., & Alho, K. (2021). Breaking down the cocktail party: Attentional modulation of cerebral audiovisual speech processing. *NeuroImage*, 224, 117365. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117365>
- Wild, C. J., Yusuf, A., Wilson, D. E., Peelle, J. E., Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2012). Effortful Listening: The Processing of Degraded Speech Depends Critically on Attention.

- Journal of Neuroscience*, 32(40), 14010–14021. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1528-12.2012>
- Wingfield, A., McCoy, S. L., Peelle, J. E., Tun, P. A., & Cox, C. L. (2006). Effects of Adult Aging and Hearing Loss on Comprehension of Rapid Speech Varying in Syntactic Complexity. *Journal of the American Academy of Audiology*, 17(07), 487–497. <https://doi.org/10.3766/jaaa.17.7.4>
- Wingfield, A., Peelle, J. E., & Grossman, M. (2003). Speech Rate and Syntactic Complexity as Multiplicative Factors in Speech Comprehension by Young and Older Adults. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 10(4), 310–322. <https://doi.org/10.1076/anec.10.4.310.28974>
- Wittke, K., Spaulding, T. J., & Schechtman, C. J. (2013). Specific Language Impairment and Executive Functioning: Parent and Teacher Ratings of Behavior. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 22(2), 161–172. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2012/11-0052\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2012/11-0052))
- Woodard, K., Pozzan, L., & Trueswell, J. C. (2016). Taking your own path: Individual differences in executive function and language processing skills in child learners. *Journal of Experimental Child Psychology*, 141, 187–209. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.08.005>
- Xiang, H.-D., Fonteijn, H. M., Norris, D. G., & Hagoort, P. (2010). Topographical Functional Connectivity Pattern in the Perisylvian Language Networks. *Cerebral Cortex*, 20(3), 549–560. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp119>
- Yang, H.-C., & Gray, S. (2017). Executive Function in Preschoolers with Primary Language Impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 60(2), 379–392. https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-L-15-0267
- Ye, Z., & Zhou, X. (2008). Involvement of cognitive control in sentence comprehension: Evidence from ERPs. *Brain Research*, 1203, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.01.090>
- Ye, Z., & Zhou, X. (2009a). *Conflict control during sentence comprehension: fMRI evidence*. 11.
- Ye, Z., & Zhou, X. (2009b). Executive control in language processing. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 10.
- Yip, M. C. W., & Zhai, M. (2018). Processing Homophones Interactively: Evidence from eye-movement data. *Scientific Reports*, 8(1), 9812. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27768-5>
- Yost, W. A. (2017). Spatial release from masking based on binaural processing for up to six maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3), 2093–2106. <https://doi.org/10.1121/1.4978614>
- Yvert, G., Perrone-Bertolotti, M., Baci, M., & David, O. (2012). Dynamic Causal Modeling of Spatiotemporal Integration of Phonological and Semantic Processes: An Electroencephalographic Study. *Journal of Neuroscience*, 32(12), 4297–4306. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6434-11.2012>
- Zaccarella, E., & Friederici, A. D. (2015). Merge in the Human Brain: A Sub-Region Based Functional Investigation in the Left Pars Opercularis. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01818>
- Zaccarella, E., Meyer, L., Makuuchi, M., & Friederici, A. D. (2017). Building by Syntax: The Neural Basis of Minimal Linguistic Structures. *Cerebral Cortex*, 27, 411–421. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv234>

- Zakariás, L., Keresztes, A., Marton, K., & Wartenburger, I. (2018). Positive effects of a computerised working memory and executive function training on sentence comprehension in aphasia. *Neuropsychological Rehabilitation*, 28(3), 369–386. <https://doi.org/10.1080/09602011.2016.1159579>
- Zelazo, P. D., Craik, F. I. M., & Booth, L. (2004). Executive function across the life span. *Acta Psychologica*, 115(2–3), 167–183. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.12.005>
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002). The Balance Beam in the Balance: Reflections on Rules, Relational Complexity, and Developmental Processes. *Journal of Experimental Child Psychology*, 81(4), 458–465. <https://doi.org/10.1006/jecp.2002.2667>
- Zhang, H., Wu, Y. J., & Thierry, G. (2020). Bilingualism and aging: A focused neuroscientific review. *Journal of Neurolinguistics*, 54, 100890. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2020.100890>
- Zhang, Y., Shu, H., Li, P., & Liu, Y. (2001). *Inhibitory processes, homophone meanings recognition, and spoken discourse comprehension in Chinese*. Proceedings of the third international conference on cognitive science.
- Zhu, Z., Zhang, J. X., Wang, S., Xiao, Z., Huang, J., & Chen, H.-C. (2009). Involvement of left inferior frontal gyrus in sentence-level semantic integration. *NeuroImage*, 47(2), 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.04.086>