

Les sciences sœurs ou comment les techniques des neurosciences aident les sciences du langage : exemple de cas d'étude

Danut Grigore Gavris,
UMR 7023 – Structures formelles du langage,
Université Paris 8
Marzena Watorek,
UMR 7023 – Structures formelles du langage,
Université Paris 8
Frédéric Isel,
UMR 7114 – Modélisations, Dynamiques, Corpus,
Université Paris Nanterre

Introduction

Grâce à l'avènement des nouvelles techniques dans le domaine des neurosciences, à partir de la fin du XX^e siècle, notamment de l'imagerie cérébrale – imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (désormais IRMf) et de l'électroencéphalographie (désormais EEG), permettant de décrire respectivement la localisation cérébrale et la neurodynamique des processus de traitement du langage à différents niveaux d'analyse linguistique, les sciences du langage ont connu des avancées significatives, autant sur le plan théorique que sur le plan empirique. Ainsi, il a été possible, avec ces techniques empruntées aux neurosciences, de réfuter certaines hypothèses linguistiques et d'en confirmer d'autres prouver de manière objectivable. L'implication de ces techniques (EEG et IRMf), dans l'étude du langage, permet alors de considérer les sciences du langage et les neurosciences dans une perspective interdisciplinaire comme étant des sciences sœurs.

Au XIX^e siècle, en France, les découvertes faites en neuropsychologie notamment par Paul Broca (1861) à partir de l'étude de patients cérébro-lésés ont permis le développement de modèles cognitifs. L'intérêt pour l'étude des relations entre les fonctions cognitives, comme le langage par exemple, et le cerveau, s'est accru sous l'impulsion des neurosciences. Plus précisément, Broca (1861) a montré chez l'un de ses patients appelé « Tan » qu'une lésion de son lobe frontal gauche générerait une incapacité à parler. Durant des années, ce patient n'a émis qu'une seule syllabe : « Tan ». Ainsi, Broca a proposé que l'aire de production du langage soit localisée dans la partie antérieure gauche du cerveau, aire désormais dénommée l'aire Broca. À la même période, en Allemagne le neurologue Wernicke (1874) découvrait que des lésions du lobe temporal de l'hémisphère gauche occasionnaient des troubles de la compréhension du langage. Ces auteurs ont donné leur nom à deux aphasies : Broca — liée à la production — et Wernicke — liée à la compréhension. De cette manière, les chercheurs ont pu directement associer les fonctions langagières de production et de traitement au tissu cérébral. En effet, il est possible, de nos jours, de cartographier les différentes régions cérébrales sous tendant différents processus de traitement et de production du langage (Price, 2012). Plus récemment, grâce à l'utilisation de la connectivité fonctionnelle et structurelle en IRMf, il est possible d'étudier les réseaux neuronaux qui sous-tendent le langage (Binder et al., 2009 ; Santi & Grodzinsky, 2010 ; pour une revue Kail et Isel, 2019).

À ce sujet, les avancées en analyse des données d'imagerie ont permis de montrer un certain degré de connectivité cérébrale des réseaux neuronaux avançant l'hypothèse, très soutenue, du connectome (Alexandre, 2013 ; Duffau, 2020) d'un plan complet des réseaux neuronaux qui décrit l'organisation des neurones et des synapses. Ces nouvelles données de

connectivité cérébrale ont permis de revisiter l'hypothèse de Broca et de Wernicke, et d'élargir leurs considérations de région du langage à une théorie de l'interconnexion des neurones sous-tendant différentes fonctions, parmi lesquelles celles du langage. Le modèle heuristique du traitement du langage (Broca-Wernicke-Lichteim-Geschwind, voir Poeppel et Hickok, 2004) a bénéficié de nombreuses recherches dans le domaine des neurosciences du langage permettant ainsi le développement de nouveaux modèles qui mettent de plus en plus l'accent sur la théorie de l'interconnexion des réseaux neuronaux (voir Friederici, 2002, 2011 ; Hagoort, 2013 ; Hickok et Poeppel, 2007 ; Hickok, 2022).

Par ailleurs, le rapprochement constaté entre les neurosciences, notamment la neurophysiologie et les sciences du langage, en l'occurrence la psycholinguistique, s'incarne dans le titre d'un chapitre d'ouvrage publié par Kutas et Van Petten en 1994, *Psycholinguistics electrified : event-related brain potential investigations* ou encore par la publication *Psycholinguistics Electrified II* (1994-2005) (Kutas, Van Petten, & Kluender, 2006). Cet échange engagé entre ces trois disciplines scientifiques a non seulement permis d'étudier le rôle de l'expérience linguistique sur la plasticité neuronale observée lors des cas de l'acquisition d'une langue seconde (L2), mais aussi sur celle de la langue première (L1) et sur les influences bidirectionnelles entre L1 et L2 lors de l'apprentissage d'une L2. Par ailleurs, ce dialogue entre les neurosciences et les sciences du langage a permis une avancée dans la compréhension des mécanismes qui dysfonctionnent dans des maladies neurodégénératives comme l'Alzheimer, le Parkinson, ou encore la maladie de Huntington. Pour finir, on peut seulement noter et admirer comment l'apport et le dialogue entre les sciences peut compléter nos connaissances dans différents domaines. Cet exemple d'échange interdisciplinaire ne fait qu'encourager de futures collaborations entre chercheurs de différents domaines des Sciences Humaines et Sociales et des Sciences Biologiques pour contribuer à l'avancée des connaissances sur le comportement humain et les bases cérébrales des processus en charge de ces comportements. Dans le cadre de cet article, c'est le comportement langagier qui nous intéresse.

Nous présenterons en premier lieu les caractéristiques de la technique EEG en insistant tout particulièrement sur l'utilisation que l'on peut en faire en sciences du langage. En second lieu, nous illustrerons l'application pratique de cette technique en présentant les grandes lignes d'une étude sur la neurocognition du langage en cours. Nous montrerons en quoi l'EEG nous a permis de mieux comprendre le traitement neurocognitif de la complexité linguistique représentée par le subjonctif en français.

La technique de l'électroencéphalographie (EEG) : caractéristiques et utilisation en linguistique

L'EEG voit le jour grâce à Hans Berger, un neurologue et psychiatre allemand, qui en 1924, en utilisant un galvanomètre à cordes,¹ enregistre les premiers signaux neuronaux humains grâce à des électrodes placées sur le cuir chevelu. Cette observation a comme résultat la découverte de deux types d'activités cérébrales électriques, ce qu'il a labellisé comme « rythme alpha » et « rythme bêta » (Berger, 1929). En moyennant et en amplifiant le signal électrique, il a pu s'assurer que l'activité qu'il avait enregistrée était liée à une activité d'origine corticale et surtout qu'elle n'était pas due à des artefacts (des mouvements des yeux ou de la tête, des contractions des muscles, etc.). Il propose alors d'appeler les changements de voltage, dus à une activité cérébrale, « électroencéphalogramme ». Ce fut le début d'une véritable révolution pour les neurosciences. Pour mieux comprendre le fonctionnement et les sources de ce signal cérébral, il faut commencer par comprendre le cerveau. Cet organe, qui est protégé par l'os du crâne, les méninges et le liquide céphalo-rachidien amortisseur et isolateur du cerveau, compte

¹ Un instrument en mesure de détecter les signaux électriques générés par le cœur, ce qui constitue aussi un électrocardiogramme.

environ 100 milliards de neurones (Purves et al., 2017) qui communiquent entre eux générant des connexions synaptiques grâce à des processus chimiques. Le courant électrique, généré par les processus chimiques, qui arrive dans le neurone est appelé « excitation » et celui qui sort du neurone est appelé « inhibiteur ». La transmission de cette activité électrique donne lieu à des signaux électriques positifs et négatifs. Les pulsations électriques envoyées à travers le neurone sont appelées « potentiels d'action » (Purves et al., 2017). L'activité électrique, générée par des connexions synaptiques dans des cellules pyramidales neuronales, dont il est question peut être liée à une activité neuronale. C'est justement le signal transmis par ces grands groupes de cellules pyramidales mesuré à la surface du cuir chevelu grâce à l'EEG qui peut présenter des variations en fonction des événements exogènes ou endogènes traités par le cerveau. Ces réponses électriques du cerveau modulées en fonction d'événements cognitifs sont appelées potentiels évoqués (PE) ou potentiels reliés à un événement (*event-related potentials*, ERP en anglais). Les PEs sont donc des réponses neuronales évoquées par un événement. Le rapport signal / bruit est faible et donc il est difficile, dans l'EEG mesuré à la surface du cuir chevelu, d'isoler les PEs qui sont de très faible amplitude en voltage. Pour permettre leur analyse, il est donc nécessaire de moyenniser les PEs sur grand nombre d'enregistrements de cette activité en présentant différents stimuli d'une même catégorie. Par exemple, on présente dans une expérience sur l'accès au lexique 60 mots bisyllabiques de haute fréquence lexicale que l'on compare à 60 mots bisyllabiques de basse fréquence lexicale, toutes choses égales par ailleurs. Par la suite, il est nécessaire d'amplifier et de moyenniser le signal recueilli par sujet et par condition expérimentale, puis de réaliser un grand moyennage (moyenne des moyennes par participant et par condition expérimentale) sur tous les participants de l'échantillon. L'une des particularités des PE est leur résolution temporelle qui est très haute. Cela signifie qu'ils offrent une mesure milliseconde par milliseconde au fur et à mesure que le stimulus (l'événement exogène ou endogène) est traité. Il est ainsi possible de suivre l'intégration cognitive de l'information délivrée en fonction de l'activité cérébrale à la milliseconde près, et ce dès le début (*stimulus onset*) de la présentation du stimulus qui coïncide parfaitement avec le début de la réponse électrique du cerveau. Les deux principaux avantages de cette technique sont (1) l'excellente résolution temporelle qui permet d'étudier en temps réel le traitement cognitif de différents stimuli dont les stimuli linguistiques, et (2) sa caractéristique non invasive. L'activité neuronale est relevée sur le cuir chevelu des participants à l'aide d'un bonnet comportant des électrodes, dont le nombre (32, 64, 128, 256) varie en fonction des choix méthodologiques sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à une quelconque réponse volontaire de la part des participants (Isel, 2017). Toutefois, l'un des inconvénients de l'EEG est que sa résolution spatiale est très faible (de l'ordre du centimètre). Par conséquent, l'EEG peut être synchronisée avec une technique qui présente une très bonne résolution spatiale, l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), lorsque les chercheurs ont pour objectif d'étudier à la fois la neurodynamique des processus cognitifs (EEG) et les bases cérébrales de ces processus (IRMf). Un autre inconvénient de l'EEG est que certaines composantes peuvent avoir plusieurs rôles fonctionnels. Afin de vérifier le rôle fonctionnel d'une composante donnée, les chercheurs tentent de résoudre ce qu'on appelle le problème inverse, c'est-à-dire de retrouver la région du cerveau où a été générée l'activité électrique qui a été mesurée à la surface du cuir chevelu. Pour ce faire, ils définissent un modèle de dipôles qui permet une analyse statistique de la localisation des générateurs neuronaux des PEs mesurés à la surface du cuir chevelu (voir Shen, Fiori-Duharcourt & Isel, 2016 pour un exemple). Plus précisément, cette méthode traite la nature multiple du problème inverse (nombreux paramètres à estimer et très peu de données disponibles) en caractérisant les sources en termes d'un nombre limité de dipôles de courant (modèle dipolaire) qui sont adaptés aux données par la minimisation d'une certaine mesure de l'erreur de reconstruction (De Munck, van Dijk, & Spekreijse, 1988). Dans ces modèles, chaque

dipôle représente l'activité sommée d'une petite région corticale et on fait l'hypothèse que ces dipôles ne varient que dans leur force au cours du temps (Luck, 2005).

Une deuxième méthode de localisation de la source est celle des solutions inverses distribuées (*distributed inverse solutions*, DIS). Ces solutions traitent le problème de la non-unicité du problème inverse de l'EEG en utilisant des contraintes anatomiques et mathématiques. Les contraintes anatomiques supposent que les sources EEG sont situées dans les régions du cerveau capables de générer des champs de tension (voltage) sur la surface du cuir chevelu (matière grise, par exemple), tandis que les contraintes mathématiques font des hypothèses physiologiques sur les propriétés mathématiques de la solution obtenue (comme la régularité spatiale maximale utilisée dans LORETA (pour plus de détails voir Trujillo-Barreto et al., 2004).

Grâce à la haute résolution temporelle et à la possibilité de rendre compte de l'information intégrée en temps réel, les chercheurs en psycholinguistique ont pu appliquer cette technique dès les années 1980 pour analyser la réponse électrique du cerveau à des traitements réalisés sur des stimuli langagiers. Progressivement, les neuroscientifiques ont pu identifier des marqueurs neurophysiologiques de différents processus de traitement du langage. En 1980, Kutas et Hillyard découvrent le premier marqueur neurophysiologique langagier : la N400. Dans le but de comprendre le rôle joué par le contexte phrastique dans la reconnaissance visuelle des mots, ils ont utilisé le paradigme *oddball*² avec des locuteurs natifs de l'anglais. Parmi leurs stimuli, il y avait des phrases acceptables (condition congrue) en anglais (*He took a sip from the waterfall*, « Il a pris une gorgée d'eau de la cascade ») et d'autres non acceptables d'un point de vue sémantique (condition incongrue) (*I take my coffee with cream and dog*, « J'ai pris mon café avec de la crème et du chien »). Les phrases présentant une anomalie dans la restriction de la sélection (condition incongrue) ont donné lieu à une négativité (d'où N devant 400) qui a commencé 250 ms après le début du stimulus et dont le pic a été trouvé à 400 ms après le début (*onset*) du stimulus. Cette composante supposée refléter le processus d'intégration des mots dans la phrase (processus lexical-sémantique) a été labelisée N400 par Kutas et Hillyard (1980). Ce n'a été que le début d'une longue recherche combinée entre neurosciences, psychologie et sciences du langage. Ce dialogue interdisciplinaire engagé entre les trois disciplines a permis par la suite des recherches en neurolinguistique d'étudier le rôle de l'expérience linguistique lors de l'acquisition d'une langue seconde et la plasticité neuronale qui en résulte (voir pour cette question au niveau lexical, Isel, 2019). Ces changements cérébraux commencent aussi à être étudiés à l'instar des transferts linguistiques entre L1 et L2, mais aussi plus récemment entre L2 et L1 en prenant en considération la relation typologique existant entre les langues étudiées à différents niveaux d'analyse linguistique. Depuis la découverte majeure faite par Kutas et Hillyard (1980), les chercheurs n'ont plus cessé de se questionner sur le traitement neuronal du langage, donnant ainsi lieu à la découverte d'autres marqueurs neurophysiologiques signant d'autres niveaux d'analyse linguistique comme par exemple la phonologie, la morphosyntaxe, la syntaxe ou encore le lexique.

Au fil du temps, s'appuyant sur des données comportementales de temps de réaction et des données neurophysiologiques de mesures de PE, différents modèles neurocognitifs du traitement du langage ont été proposés. Ces modèles constituent des alternatives au modèle classique, plutôt heuristique, Broca-Wernicke-Lichtheim-Geschwind dont l'une des faiblesses est de ne pas pouvoir rendre compte des différentes typologies d'aphasies en relation avec les dysfonctionnements des différents niveaux d'analyse linguistique (pour une discussion voir Hickok et Poeppel, 2004). Parmi les modèles neurocognitifs proposés, on compte le modèle

² Le paradigme en question consiste à présenter à des participants des stimuli cibles mélangés à des stimuli non cibles. Les premiers, qui constituent l'intérêt du chercheur sont généralement en moindre nombre que les deuxièmes qui servent à distraire les participants. Ces derniers peuvent être sollicités pour effectuer des tâches expérimentales (en appuyant sur des boutons par exemple) ou juste écouter / visualiser les stimuli.

structurel-fonctionnel proposé par Friederici (1995 ; 2002 ; 2011 ; 2017), le modèle neuro-computationnel Mémoire, Unification, Contrôle (MUC) proposé par Hagoort (2013), le modèle du double réseau (*dual stream*) — *quoi et comment* — de la production et du traitement du langage de Hickok (2022) et Hickok et Poeppel (2007), le modèle de Molinaro, Barber et Carreiras (2011) centré sur la dynamique temporelle et neuronale du traitement de l'accord grammatical ou encore le modèle Match, Utilisation, Memory (MUM) (Herrmann et al., 2004). Un point que partagent tous ces modèles indépendamment du cadre théorique auquel ils réfèrent, est la motivation de décrire des composantes neurophysiologiques du traitement du langage à différents niveaux d'analyse linguistique. Nous présenterons, de façon non exhaustive, les principales composantes neurophysiologiques identifiées pour être impliquées lors du traitement des informations langagières. Aux fins utiles de la compréhension de ce travail, nous en avons retenues trois : la *Left Anterior Negativity (LAN)*, la N400 et la P600.

Dans son modèle neurocognitif du traitement du langage, Friederici (2002, 2011, 2017) décrit la neurodynamique du traitement des informations linguistiques en les formalisant en trois phases. Ce modèle est sériel repose sur l'hypothèse centrale selon laquelle une première phase est purement syntaxique par nature (modèle *syntax-first*).³ Une seconde hypothèse est que l'intégration lexico-sémantique d'un mot donné ne peut avoir lieu que lorsque l'information syntaxique sur la catégorie de mots de ce mot est compatible avec la structure syntaxique antérieure. Ce modèle prédit donc un déroulement temporel différentiel pour différents types d'informations syntaxiques. Les informations sur la structure de la phrase pertinentes pour la construction de la structure syntaxique locale de la phrase (phase 1) devraient précéder le traitement des informations thématiques, qu'elles soient signalées par des informations lexico-sémantiques ou morpho-syntaxiques pertinentes pour l'attribution du rôle thématique (phase 2). Dans ce modèle, l'interaction entre les informations sémantiques et les informations syntaxiques ne devrait avoir lieu que pendant la phase d'intégration finale (phase 3). Pour résumer, Friederici postule donc que l'intégration de l'information morpho-syntaxique a lieu durant la phase 2 de son modèle dans une fenêtre temporelle 300-500 ms après le début de la présentation de l'item critique. Münte et Heinze (1994) ont été les premiers à mettre en évidence des effets de la LAN en réponse à des violations morpho-syntaxiques entre article et nom dans différentes langues (allemand, anglais, et finnois) et avec différentes tâches (jugement grammatical et décision lexicale). Cette composante négative dont le pic est généralement observé entre 300 et 600 ms après le début de la présentation d'un stimulus présentant une anomalie morphosyntaxique (p. ex., *Le voisine ; voir Isel et Kail, 2018) est distribuée dans la région antérieure gauche à la surface du cuir chevelu. Ce marqueur est souvent suivi par une positivité pariétale (dont nous parlerons plus tard) présentant un maximum autour de 600 ms post-stimulus *onset* qui est supposé être un processus de réparation linguistique après la détection d'une anomalie à une étape précoce. Cette positivité est appelée P600 postérieure. Des études récentes ont confirmé la présence de ce pattern biphasique LAN/P600 en réponse à la détection de violations morphosyntaxiques (voir Caffarra et al., 2019 ; Isel et Kail, 2018 ; Krott et Lebib, 2013 ; Molinaro et al., 2011, 2015 ; Steinhauer et Drury, 2012 ; entre autres).

Dans une expérience princeps, Hagoort, Brown et Groothusen (1991) ont utilisé trois types de violations syntaxiques en allemand dans le but de préciser les processus en charge de ces erreurs syntaxiques et les différencier des processus sémantiques. Pour les violations syntaxiques, les auteurs ont observé une positivité autour de 600 ms après le début du stimulus. Ils ont interprété cette réponse électrique du cerveau comme étant le reflet d'une impossibilité pour les participants de décider une structure préférentielle pour les mots traités. Ils ont labellisé

³ Il est important de noter qu'une autre catégorie de modèles suppose des processus interactifs parallèles tout au long du processus de traitement. Par exemple, le modèle d'unification proposé par Hagoort (2003 b, 2005) suppose que chaque élément d'information est émis immédiatement pour guider le processus d'interprétation dès qu'il devient disponible.

cette composante ERP, *syntactic positivity shift* ou SPS. Plus tard, Osterhout et Holcomb (1992) ont constaté, que les phrases comportant une ambiguïté syntaxique et qui sont, à la fois, complexes (p. ex., « Paul a vu un homme avec un télescope qu'il a ramené chez lui pour lui demander des conseils »), génèrent une positivité entre 500 ms et 900 ms après le début du mot ambigu, au moment de la désambiguïstation, ou quand intervient la réanalyse de la phrase (voir aussi Hagoort et al., 1993). Ils ont appelé cette positivité P600. Le marqueur P600 est aussi supposé signifier un processus de révision lors du traitement d'une phrase grammaticale mais ambiguë en termes d'attachement comme dans l'exemple ci-dessus. Kaan et Swaab (2003) ont montré que cette P600 associée à un processus de révision dans le cas du traitement de phrases présentant une certaine complexité est plutôt distribuée dans les régions frontales du cerveau. Cette P600 frontale de révision est clairement différenciable de la traditionnelle P600 postérieure qui elle marque plutôt un processus de réparation dans le cas où une anomalie de structure est présente dans la phrase (p. ex., « L'enfant qui est dans la \emptyset dort », emprunté à Isel et al., 2007).

Pour résumer, en réponse au traitement de phrases grammaticales présentant un certain degré de complexité syntaxique, Kaan et Swaab (2003), Kaan et al. (2000), Friederici, Hahne et Daddy (2002) ont trouvé une P600 plutôt fronto-centrale que centro-pariétale. Cette dernière serait liée plutôt à un traitement de réanalyse, réparation, unification syntaxique alors que celle à distribution fronto-centrale est interprétée comme intégration de la complexité syntaxique. En outre, il semble que l'amplitude de la P600 reflète aussi les processus liés à des structures syntaxiques moins préférées ou admises par les locuteurs d'une langue (Itzhak et al., 2010 ; Osterhout et al., 1994). Des études récentes en neurocognition du langage ont montré que le marqueur P600 indique non seulement des phénomènes relevant strictement de la syntaxe mais qu'il reflète aussi l'interaction entre la syntaxe et la sémantique lors des anomalies au niveau de la phrase (Gunter et al., 2000 ; Kuperberg et al., 2003). Récemment, DeLong et Kutas (2020) ont observé une positivité post-N400 (PNP, *post-N400 positivity*) dans la région antérieure à la surface du cuir chevelu qui pourrait marquer les variations de prédictions sémantiques. L'amplitude de la PNP est plus grande pour le traitement de mots plausibles mais peu attendus sur la base du contexte phrastique (p. ex., *At the dinner party, I wondered why my mother wasn't eating her soup. Then I noticed that she didn't have a bowl*, « Lors du dîner, je me suis demandé pourquoi ma mère ne mangeait pas sa soupe. Puis j'ai remarqué qu'elle n'avait pas de bol ») en comparaison avec des mots très attendus (p. ex., *At the dinner party, I wondered why my mother wasn't eating her soup. Then I noticed that she didn't have a spoon*, « Lors du dîner, je me suis demandé pourquoi ma mère ne mangeait pas sa soupe. J'ai alors remarqué qu'elle n'avait pas de cuillère ») (exemples empruntés à Federmeier et Kutas, 1999). L'interprétation du rôle fonctionnel de la PNP est en débat entre : (a) coût de révision d'une représentation contextuelle pré-activée en mémoire de travail, (b) processus d'inhibition pour supprimer le mot hautement pré-activé mais non reçu, (c) détection ou résolution d'un conflit entre information attendue et information reçue.

Le marqueur électroencéphalographique le plus étudié dans le domaine du langage écrit ou oral est la N400. Il s'agit d'une déflexion négative observée au niveau des électrodes centro-pariétales autour de 200-600 ms après la présentation d'un stimulus verbal, auditif ou visuel (Kutas et Hillyard, 1980 ; Kutas et Federmeier, 2011, pour une revue). La N400 présente une distribution latéralisée à droite pour les mots présentés visuellement, mais son amplitude est plus grande sur l'hémisphère gauche pour les mots présentés dans la modalité auditive (Kutas et Federmeier, 2011 ; Kutas et al., 1987 ; Isel, 2017). La N400 a différents rôles fonctionnels spécifiques : l'un d'entre eux étant l'intégration des informations lexicales-sémantiques. La N400 est interprétée comme un marqueur de l'intégration lexicale-sémantique (c'est-à-dire l'intégration des mots dans le contexte qui les précèdent). Son amplitude est plus grande en réponse au traitement d'un mot qui est sémantiquement incongru comparé à un mot

sémantiquement congru (Kutas et Hillyard, 1980 ; Isel, 2017 ; Isel et al., 2007). De plus, la N400 est un marqueur d'accès au lexique mental comme suggéré par une amplitude plus grande pour les pseudo-mots que pour les mots, ou encore pour les mots de fréquence d'occurrence rare que pour les mots de fréquence d'occurrence élevée (Kutas et Federmeier, 2011). La N400 est également sensible au traitement des informations orthographiques et phonologiques comme cela a été montré dans des expériences d'amorçage dans lesquelles la taille du recouvrement orthographique ou phonologique a été manipulée (Rugg et Barrett, 1987 ; Praamstra et Stegeman, 1993).

Aux fins de ce travail, nous prendrons comme exemple le modèle neurocognitif du traitement et de la compréhension du langage proposé par Friederici (2002 ; 2011 ; 2017) dont nous schématisons la neurodynamique temporelle ci-dessous :

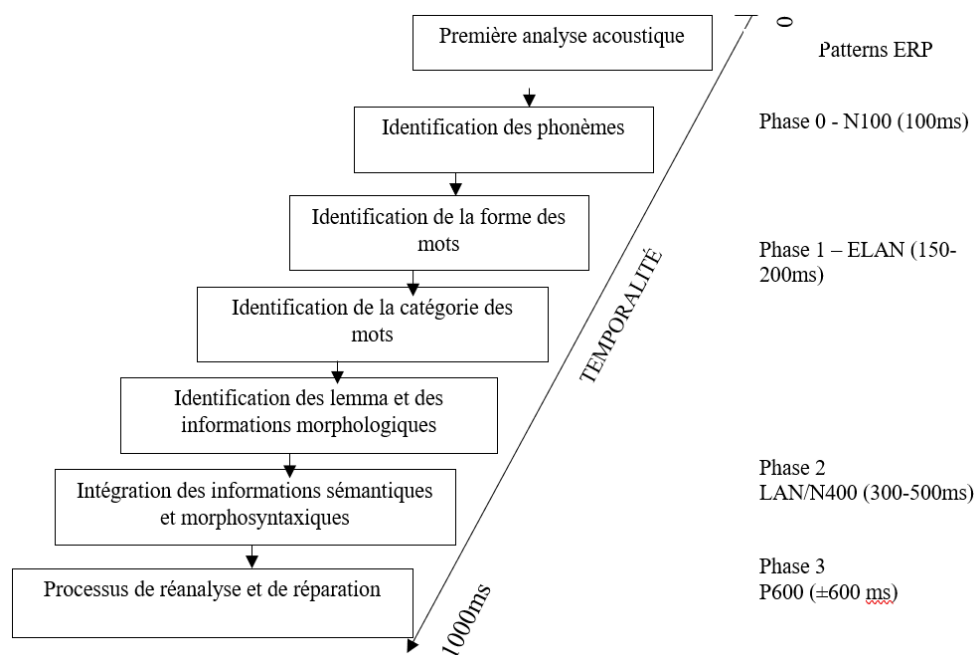


Figure 1. Représentation de la neurodynamique du traitement de l'information linguistique (Figure adaptée de Friederici, 2002).

Une étude EEG dont l'objectif est d'apporter des données expérimentales originales sur le traitement du subjonctif est en cours. Dans le cadre de notre travail, nous avons choisi d'étudier le traitement neurocognitif du subjonctif français. Si, d'un côté, les recherches sur la motivation du subjonctif en français et son alternance avec l'indicatif abondent dans la linguistique française, comme souligné, il y a quelques années désormais, par Wilmet en disant que « la concurrence du subjonctif et de l'indicatif demeure envers et contre tout l'un des trois ou quatre filons inépuisables de la linguistique française » (1997), de l'autre côté, il n'existe pas, à notre connaissance, d'études qui aient utilisé l'EEG pour examiner le traitement neurocognitif du subjonctif français en temps réel.

En linguistique théorique, les recherches foisonnent et viennent de tous bords et approches théoriques, il convient notamment de citer l'approche psychomécanique de Guillaume (1965), celle syntactique du front générativiste de Lalaire (1988), celle sémantique de Martin (1982), ou encore le modèle syntactico-fonctionnaliste de Soutet (2000), le modèle des modalités de Gosselin (2010) et pour finir le modèle unitaire proposé par Dreer (2014). Ce sont les quelques approches théoriques qui ont tenté d'expliquer la motivation du subjonctif dans la grammaire française, sans pour autant réussir complètement.

En linguistique, certains chercheurs, en utilisant la méthode expérimentale de la psycholinguistique, ont tenté de comprendre les facteurs qui déterminent l'apparition du

subjonctif dans la subordonnée ainsi que les éléments structurels qui permettent l'alternance indicatif / subjonctif à la fois dans des contextes différents et identiques chez des locuteurs natifs francophones adultes. Par exemple, Amsili et Guida (2014) ont étudié l'alternance indicatif / subjonctif et les facteurs qui la déterminent. Dans leur étude, les deux chercheurs ont essayé de comprendre la productivité des modes indicatif et subjonctif dans des contextes niés avec les prédicats épistémiques (voir aussi Godard et al., 2013, 2017). La tâche a consisté en complétion de phrases, (condition 1) à la fois à la forme affirmative et où le subjonctif est accepté (*Les deux sœurs sont contentes que leur père... comprendre...*), (c2) à la forme négative au subjonctif (*Les deux sœurs ne sont pas certaines que leur père... comprendre...*), et (c3) à la forme affirmative à l'indicatif (*Les deux sœurs sont certaines que leur père... comprendre...*), en conjuguant le verbe à l'infinitif au mode approprié. Ils ont gardé constants 4 facteurs : (1) le temps verbal de la matrice a toujours été au présent de l'indicatif ; (2) le sujet de la matrice a toujours été la troisième personne (P3), soit au singulier, soit au pluriel ; (3) le sujet de la subordonnée a toujours été la troisième personne (P3) et (4) ils ont choisi des verbes à bases phonétiquement fortes. Les résultats de leur étude montrent que le subjonctif reste le mode privilégié (75/80 % des cas). Amsili et Guida (2014) proposent alors de considérer un ensemble de facteurs qui pourraient exercer une influence sur le choix modal pour pouvoir expliquer ainsi l'alternance. Parmi ces facteurs, en cours d'élaboration, il y a le sujet de la matrice, la première personne de la principale semble privilégier le subjonctif dans la subordonnée (Boysen, 1969). La typologie de phrase semble influencer aussi sur le choix modal. Il semblerait que la déclarative, la négative mais aussi l'impérativo-négative donnent lieu à l'alternance avec une préférence pour le subjonctif. Et pour finir, ils proposent de considérer aussi la morphologie des modes puisqu'il semble que le subjonctif est employé avec des formes verbales supplétives, à savoir morphologiquement et phonétiquement saillantes.

Dans une approche plutôt sociolinguistique, Damar et Fourny (2015) ont étudié l'écart entre la norme et l'usage chez des étudiants de lettres, futurs professeurs de français, dans le contexte du français belge. Les résultats de la tâche consistant en des jugements de grammaticalité, sur des structures syntaxiques impliquant des déclencheurs du subjonctif ou de l'indicatif (après que, douter que, bien que, espérer que, espérer que + adv, quoique, si... et que, tout que), a permis aux deux chercheurs de conclure que pour certains déclencheurs (après que, espérer que + adv, quoique) il y a un écart de la norme dans la mesure où le subjonctif est utilisé alors que l'indicatif est conseillé par la norme.

Pour finir, Gudmestad et Edmonds (2015) ont étudié, dans une vision variationniste, l'alternance modale indicatif / subjonctif dans les mêmes contextes et où cette alternance change le sens des structures phrastiques. Deux tâches ont été utilisées : (1) élicitation imitée contextualisée à phrases (p. ex., *Jean est content que...*), et (2) élicitation imitée contextualisée à verbes (p. ex., *Pierre croit qu'on... devoir... appeler avant d'arriver*). Leurs résultats ont montré un emploi catégoriel de 100 % du subjonctif lorsque celui-ci était déclenché par des structures comme : *aimer, avant, jusqu'à ce que, préférer, vouloir, ne pas penser, ne pas croire*. Par ailleurs, il semblerait que différents facteurs influencent l'apparition et l'utilisation du subjonctif : expression de l'évaluation et de l'émotion (96,7 %), volition (95,7 %), incertitude (68,6 %), temporalité (24 %) et, en moindre mesure, assertion (4,4 %). Aussi, il apparaît que dans les contextes hypothétiques ainsi que la sémantique catégorielle des déclencheurs sont des facteurs de prédictibilité du mode subjonctif.

Ces études apportent des informations importantes au sujet de l'emploi du subjonctif et des facteurs linguistiques qui le motivent. Néanmoins, d'un point de vue cognitif, il reste à mieux comprendre les processus de traitement de ce mode verbal et la nature des informations linguistiques (syntaxique, morphosyntaxique et/ou sémantiques) prises en compte par des adultes natifs du français. La haute résolution temporelle qu'offre l'EEG constitue un outil privilégié pour approfondir la neurodynamique des processus cognitifs impliqués lors de

l'analyse du subjonctif. Un second avantage de l'EEG est de fournir des marqueurs neurophysiologiques spécifiques au processus de traitement langagier impliqués. De cette manière, il est donc possible de compléter les recherches existantes en psycholinguistique et apporter de nouvelles réponses à cette question.

Conclusion

Dans cet article, nous avons tenté de montrer comment le dialogue interdisciplinaire entre trois disciplines, la linguistique, la psycholinguistique et les neurosciences a permis d'enrichir nos connaissances sur le fonctionnement de phénomènes linguistiques et sur les mécanismes cognitifs et neurocognitifs qui sous-tendent ces phénomènes. L'avènement de l'imagerie cérébrale, notamment de l'IRMf et de l'EEG, en psycholinguistique a rendu possible des découvertes cruciales. Par exemple, il a été montré que le langage est une fonction cognitive en interaction avec d'autres fonctions cognitives comme la perception, la mémoire, l'attention, ou encore les fonctions exécutives, et que le langage est largement distribué dans différentes régions du cerveau (Price, 2012). Cette découverte fondamentale en neurosciences cognitives a remis en question l'approche modulariste défendue par Fodor (1983). En effet, démontrer avec des techniques des neurosciences que la compréhension ou la production du langage convoquent différentes régions du cerveau a profondément questionné, en psychologie cognitive, la notion fodorienne de modularité de l'esprit inspirée des travaux de Noam Chomsky en linguistique. Selon la thèse de Fodor, l'esprit humain comprend un certain nombre de modules spécialisés dans l'exécution de certaines fonctions cognitives.

Bibliographie

- Aarnes Gudmestad et Amanda Edmonds, "Categorical and Variable Mood Distinction in Hexagonal French: Factors Characterising Use for Native and Non-Native Speakers", *Canadian Journal of Applied Linguistics*, n° 1, vol. 18, 2015, p. 107-131.
- Andrea Krott, Riadh Lebib, "Electrophysiological evidence for a neural substrate of morphological rule application in correct wordforms", *Brain Research*, 2013, p. 70-83.
- Angela D. Friederici, "Towards a neural basis of auditory sentence processing", *Trends in Cognitive Sciences*, n° 2, vol. 6, 2002, p. 78-84.
- Angela D. Friederici, "The Brain Basis of Language Processing: From Structure to Function", *Physiological Reviews*, n° 4, vol. 91, 2011, p. 1357-1392.
- Angela D. Friederici, *Language in our brain. The origins of a uniquely human capacity*, Cambridge, MIT press, 2017.
- Angela D. Friederici, Anja Hahne, Saddy Douglas, "Distinct neurophysiological patterns reflecting aspects of syntactic complexity and syntactic repair", *Journal of Psycholinguistic Research*, n° 1, vol. 31, 2002, p. 45-63.
- Andrea Santi et Yosef Grodzinsky, "fMRI adaptation dissociates syntactic complexity dimensions", *Neuroimage*, vol. 15, n° 51, 2010, p. 1285-93.
- Carl Wermicke, *Der aphasische Symptomencomplex*, Berlin, Springer-Verlag, 1874, p. 1-70.
- Cathy J. Price, "A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading", *Neuroimage*, vol. 62, n° 2, 2012, p. 816-847.
- Christoph S Herrmann, Matthias H J Munk, Andreas K Engel, "Cognitive functions of gamma-band activity: memory match and utilization", *Trends Cogn Sci*, vol. 8, n° 8, 2004, p. 347-355.
- Danièle Gordard, Barbara Hemforth, Jean-Marie Marandin, « Le subjonctif en contexte négatif en français : une approche expérimentale », in Verginica Barbu Mititelu, Mihaela Ionescu,

- Gianina Iordachioaia (éd.), *Omagiu profesorului Emil Ionescu la 60 de ani*, Bucharest, Université de Bucarest, 2017, p. 27-39.
- Danièle Gordard, Barbara Hemforth, Jean-Marie Marandin, “Negation and mood alternation in French. A preliminary experimental investigation of polarity mood”, Manuscrit proposé en hommage à Ivan Sag, 2013, disponible en ligne sur : http://www.stanford.edu/dept/linguistics/structures_evidence/.
- Dale Purves, George J. Augustine, David Fitzpatrick, William C. Hall, Anthony-Samuel LaMantia, Richard D. Mooney, Michael L. Platt, et Leonard E. White, *Neuroscience*, Cambridge, Oxford University Press, 2018, 6th ed.
- Edith Kaan, Tamara y Swaab, “Repair, revision and complexity in syntactic analysis: an electrophysiological differentiation”, *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 15, n° 1, p. 98-110.
- Frédéric Alexandre, *Comprendre les réseaux cérébraux*, [Rapport de recherche] RR-8219, INRIA, 2013.
- Frédéric Isel, et Michèle Kail, “The cost of morphological cues across the course of sentence processing in French: Event-related brain potentials evidence”, *Journal of Neurolinguistics*, n° 46, 2018, p. 23-36.
- Frédéric Isel, et Michèle Kail, “Neuroplasticity, network connectivity and language processing across lifespan”, *Brain and Cognition*, n° 134, 2019, p. 67-70.
- Frédéric Isel, « Chapitre 6. Apport de l'électroencéphalographie à l'étude des atypies du traitement du langage », dans Caroline Bogliotti (éd.), *Atypies langagières de l'enfance à l'âge adulte. Apports de la psycholinguistique et des neurosciences cognitives*, Paris, De Boeck Supérieur, 2017, p. 149-192.
- Frédéric Isel, Anja Hahne, Burkhard Maess, et Angela D Friederici, “Neurodynamics of sentence interpretation: ERP evidence from French”, *Biological Psychology*, vol. 74, n° 3, 2007, p. 337-346.
- Gerhard Boysen, « Le mode de la proposition complétive préposée dans les langues romanes », *Revue romane*, vol. 4, n° 1, 1969, p. 10-19.
- Gina Kruperg, Tatiana Sitnikova, David Caplan, Philip J Holcomb, “Electrophysiological distinctions in processing conceptual relationships within sentences”, *Cognitive Brain Research*, vol. 17, n° 1, 2003, p. 117-29.
- Gregory Hickok et David Poeppel, “The cortical organization of speech processing”, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 8, 2007, p. 393-402.
- Gregory Hickok, “The dual stream model of speech and language processing”, *Handbook of Clinical Neurology*, vol. 182, 2022, p. 1-13.
- Gregory Hickok et David Poeppel, “Dorsal and ventral stream: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language”, *Cognition*, vol. 9, 2004, p. 67-99.
- Gustave Guillaume, *Temps et verbe : théorie des aspects, des modes et des temps*, Paris, Honoré Champion, 1965, 134 p.
- Hugues Duffau, « Neuroplasticité et connectome : vers un modèle en méta-réseau du fonctionnement cérébral », *Revue neurologique*, vol. 176, n° 9, 2020, p. 1-2.
- Hans Berger, « Uber das Elektrenkephalogramm des Menschen (On the human electroencephalogram) », *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, vol. 87, 1929, p. 527-570.
- Igor Dreer, « La prise en considération d'un événement contraire dans l'analyse de l'opposition entre l'indicatif et le subjonctif en français », *SHS Web of Conferences*, 4^{ème} Congrès Mondial de Linguistique française, vol. 8, 2014, p. 2383-2395.
- Inbal Itzhak, Efrat Pauker, John E Drury, Shari R Baum, Karsten Steinhauer, “Event-related potentials show online influence of lexical biases on prosodic processing”, *NeuroReport*, vol. 21, n° 1, 2010, p. 8-13.

- Jan Casper de Munck, Bob W. Van Dijk, Henk Spekreijse, "Mathematical dipoles are adequate to describe realistic generators of human brain activity", *IEE trans Biomed Eng*, vol. 35, n° 11, 1988, p. 960-966.
- Jeffrey R Binder, Rutvik H Desai, William W Graves et Lisa L Conant, "Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies", *Cereb Cortex*, vol. 19, n° 12, 2009, p. 2767-96.
- Jerry A. Fodor, *The modularity of mind: an essay on faculty of psychology*, Cambridge, MIT Press, 1983, 145 p.
- Kara D Federmeier, Marta Kutas, "A rose by any other name: long-term structure and sentence processing", *Journal of Memory and Language*, vol. 41, n° 4, 1999, p. 469-495.
- Karsten Steinhauer, John E. Drury, "On the early left-anterior negativity (ELAN) in syntax studies", *Brain and Language*, vol. 120, n° 2, 2012, p. 135-162.
- Katherine A Delong, Marta Kutas, "Comprehending surprising sentences: sensitivity of post-N400 positivities to contextual congruity and semantic relatedness", *Language, Cognition and Neuroscience*, vol. 35, n° 1, 2020, p. 1044-1063.
- Laurent Gosselin, *Les modalités en français : la validation des représentations*, Amsterdam, Rodopi, 2010, 502 p.
- Lee Osterhout, Phillip J Holcomb, "Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly", *Journal of Memory and Language*, vol. 31, n° 6, 1992, p. 785-806.
- Lee Osterhout, Phillip J Holcomb, David A. Swinney, "Brain potentials elicited by garden-path sentences: evidence of the application of verb information during parsing", *Journal of experimental psychology: Learning, Memory and Cognition*, vol. 20, n° 4, 1994, p. 786-803.
- Louis Lalaire, *La variation modale dans les subordonnées à temps fini du français moderne. Approche syntaxique*, Berne, Peter Lang, 1998, 377 p.
- Marc Wilmet, *Grammaire critique du Français*, Paris, Hachette Supérieur / Duculot, 1997, 2^e éd., 670 p.
- Marie-Eve Damar et Laurent Fourny, « Subjonctif ou indicatif? Étude synchronique des fluctuations des jugements d'acceptabilité : analyse et perspectives », *Pratiques*, n° 167/168, 2015.
- Marta Kutas et Cyma Van Petten, "Psycholinguistics electrified: Event-related potentials investigations", dans Morton Ann Gernsbacher (éd.), *Handbook of Psycholinguistics*, Academic Press, 1994, p. 83-143.
- Marta Kutas et Steve A Hillyard, "Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity", *Science*, vol. 207, n° 4427, 1980, p. 203-205.
- Marta Kutas, Cyma Van Petten, et Robert Kluender, "Psycholinguistics electrified II: 1994-200", in Matthew Traxler et Morton Ann Gernsbacher (éd.), *Handbook of Psycholinguistics*, New York, Elsevier, 2006, p. 659-724, 2nd ed.
- Marta Kutas, Kara D. Federmeier, "Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event related brain potential (ERP)", *Annu Rev Psychol*, vol. 62, 2011, p. 621-647.
- Marta Kutas, Helen J. Neville, Phillip J. Holcomb, "A preliminary comparison of the N400 response to semantic anomalies during reading, listening and signing", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Supplement*, vol. 39, 1987, p. 325-330.
- Michael D Rugg, Sarah E Barrett, "Event-related potentials and the interaction between orthographic and phonological information in a rhyme-judgment task", *Brain and Language*, vol. 32, n° 2, 1987, p. 336-361.
- Nelson Trujillo-Barreto, Eduardo Aubert-Vazquez, Pedro A. Valdes-Sosa, "Bayesian model averaging in EEG/MEG imaging", *NeuroImage*, vol. 21, n° 4, 2004, p. 1300-1319.
- Nicola Molinaro, Horacio A Barber, Manuel Carreiras, "Grammatical agreement processing in reading: ERP findings and future directions", *Cortex*, vol. 47, 2011, p. 908-930.

- Nicola Molinaro, Horacio A Barber, Sendy Caffarra, Manuel Carreiras, “On the left anterior negativity (LAN): The case of morphosyntactic agreement”, *Cortex*, vol. 66, 2015, p. 156-159.
- Olivier Soutet, *Le subjonctif en français*, Paris, Phyris, 2000, 161 p.
- Paul Broca, « Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d’une observation d’aphémie (perte de la parole) », *Bulletins de la Société anatomique de Paris*, n° 6, 1861, p. 330-357.
- Pascal Amsili et Floriane Guida, « Vers une analyse factorielle de l’alternance indicatif / subjonctif », *SHS*, 2014, p. 2313-2331.
- Peter Hagoort, “MUC (Memory, Unification, Control) and beyond”, *Frontiers in Psychology*, vol. 4, 2013, p. 1-13.
- Peter Hagoort, “How the brain solves the binding problem for language: a neurocomputational model of syntactic processing”, *NeuroImage*, vol. 20, sup. 1, 2003, p. 18-29.
- Peter Hagoort, “On Broca, brain and binding: a new framework”, *Trends Cogn Sci*, vol. 9, n° 9, 2005, p. 416-423.
- Peter Hagoort, Colin Brown, Jolanda Groothusen “The syntactic positive shift (sps) as an erp measure of syntactic processing”, *Language and Cognitive Processes*, vol. 8, n° 4, 1993, p. 439-483.
- Peter Praamstra, Dick F Stegeman, “Phonological effects on the auditory N400 event-related brain potential”, *Cognitive Brain Research*, vol. 1, n° 2, 1993, p. 73-86.
- Robert Martin, *Pour une logique du sens*, Paris, Presses Universitaires Françaises, 1983, 268 p.
- Sandy Caffarra, Martha Mendoza, Doug Davidson, “Is the LAN effect in morphosyntactic processing an ERP artifact?”, *Brain and Language*, vol. 191, 2019, p. 9-16.
- Steve Luck, *An introduction to event-related potentials technique*, Cambridge, MIT, 2005, 374 p
- Thomas F. Munte, Hans Jochen Heinze, George R Mangun, “Dissociation of brain activity related to syntactic and semantic aspects of language”, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1994, vol. 5, n° 3, p. 335-344.
- Thomas C Grunter, Angela D Friederici, Herbert Schriefers, “Syntactic gender and semantic expectancy: ERPs reveal early automatization and late interaction”, *Cognitive Neuroscience*, vol. 12, n° 4, 2000, p. 556-568.
- Weilin Shen, Nicole Fiori-Duharcourt, Frédéric Isel, “Nature of the P600 in semantically anomalous sentences: Evidence from ERP source localisation”, *NeuroReport*, vol. 7, n° 27, 2016, p. 548-558.