

In: Diversité des langues et représentations cognitives.
C. Fuchs, S. Robert, eds. OPHRYS, Paris. 1997.

Mireille BESSON et Marta KUTAS

CNRS : CRNC-Marseille ; et Université de Californie, San Diego

MANIFESTATIONS ÉLECTRIQUES DE L'ACTIVITÉ DE LANGAGE DANS LE CERVEAU

Introduction

Comment les connaissances sont-elles représentées dans le cerveau ? Notre connaissance du langage diffère-t-elle de façon significative de notre connaissance dans d'autres domaines comme la musique, par exemple ? Les unités musicales et linguistiques sont-elles différentes ? Obéissent-elles à des règles et des principes différents ? Qu'est-ce qu'une preuve d'identité structurale ou fonctionnelle dans le cas de la musique et du langage où l'identité complète est hors de question ? Le langage et la musique sont clairement différents à plusieurs niveaux ; ils offrent cependant suffisamment de similarités pour simuler des recherches sur la proximité de leurs représentations et des opérations cognitives qu'ils impliquent. Des questions similaires se posent dans le domaine du langage concernant les représentations sémantique et syntaxique, par exemple, où les différences sont moins évidentes et moins nombreuses qu'entre langage et musique. Nous suggérons que les réponses à ces questions nécessitent des collaborations interdisciplinaires entre anthropologues, chercheurs en sciences cognitives et neurosciences cognitives, linguistes et psychologues. En outre, une telle entreprise requiert non seulement l'examen des structures et fonctions de plusieurs langues différentes mais aussi celui du cerveau.

Nos cerveaux sont à la fois très structurés et remarquablement plastiques. La structure de base est imposée par les récepteurs sensoriels (e.g., yeux, oreilles, nez, peau) et les effecteurs moteurs (e.g., mains, pieds, langue), mais une structure plus fine émerge d'une vie d'expériences, de co-occurrences spatiales et temporelles de l'activité nerveuse. Quelles expériences sont pertinentes pour la compréhension du langage ? Dans la mesure où nous utilisons le langage pour transmettre du sens - une construction

élaborée de l'esprit à partir d'indices-clés dans le flot linguistique- les expériences auxquelles nous sommes confrontés (consciemment ou inconsciemment) influencent forcément la manière dont nous comprenons et utilisons le langage. Quelles sont les conséquences lorsque nous apprenons une langue plutôt qu'une autre ? Les langues varient quant à la nature (le l'information immédiatement disponible (e.g., l'anglais n'a presque aucun marqueur morphologique de cas), dans le lieu et la nature de leurs ambiguïtés linguistiques, et, par conséquent, dans les demandes que les différentes analyses linguistiques exercent sur les processus de mémoire à court terme. Si tel est le cas, les particularités d'une langue donnée doivent avoir un impact sur la manière dont les processus de compréhension se déroulent : quelle information est, de fait, utilisée pour mener à bien les opérations linguistiques diverses et variées qu'un lecteur ou qu'un auditeur réalise sur le matériel qui lui est présenté ?

La compréhension du langage nécessite la mise en jeu d'une mémoire de travail, organisée de façon associative et catégorielle, dont les capacités et la durée de vie sont relativement limitées. Elle dépend également de la mise en jeu de systèmes mnésiques sensoriel, conceptuel et moteur organisés hiérarchiquement, et implémentés dans un cerveau composé de plusieurs centaines d'aires réalisant différentes fonctions, selon les principes d'organisation du néocortex (s'il est juste de baser cette estimation à partir des 30 aires, ou plus, répertoriées dans le système visuel). Ainsi, structure d'entrée et milieu de traitement se contraignent mutuellement pour déterminer quelle information est traitée, quelle information est perdue, quelles sont les voies suivies par les signaux pour aller des récepteurs sensoriels aux plus hautes structures du cerveau, pour déterminer si des signaux sont également envoyés des plus hautes vers les plus basses structures pour maintenir ou renforcer l'activation initiale, ou pour inhiber les cellules voisines dont les propriétés de réponse sont différentes, et contribuer ainsi à créer ce que nous percevons, pensons et éventuellement retenons...

1. L'activité électrique corticale

Une manière d'examiner les relations entre les entrées, la physiologie du cerveau, et ce que nous comprenons consiste à enregistrer les changements de l'activité électrique corticale chez l'homme. Le mode de fonctionnement du cerveau étant électrochimique, on peut enregistrer les variations de l'activité électrique corticale. Par opposition à la Tomographie par Émission de Positons (TEP) et à l'Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle, l'électroencéphalogramme (EEG) et son équivalent magnétique, le

magnétoencéphalogramme (MEG), sont (les mesures directes de l'activité électrochimique par laquelle les cellules nerveuses (neurones et cellules gliales) communiquent. Les techniques d'imagerie cérébrale mentionnées ci-dessus, aussi bien que d'autres fondées sur le métabolisme ou les changements hémodynamiques sont, au mieux, de deuxième ordre par rapport à l'activité neuronale.

Un événement dans le monde, que ce soit une lumière, un son, une senteur, une saveur ou un événement dans l'esprit, tel qu'une décision ou une intention de bouger, est reflété dans l'activité concertée de neurones dans différentes parties du cerveau. Alors que la réponse du cerveau à chaque événement particulier peut être difficile à discerner parmi la multitude des réponses qui ont lieu simultanément, la répétition de ces événements particuliers (ou d'événements appartenant à la même catégorie), et le moyennage à travers ces répétitions permet au signal d'émerger du bruit de fond constitué par l'électrogénèse corticale. Le signal enregistré représente une variation du voltage au cours du temps, synchronisée à la présentation du stimulus. Notons que quelques centaines de millisecondes d'activité pré-stimulus sont également enregistrées pour calculer une ligne de base à des fins analytiques. Le tracé EEG consiste en une succession de pics et de creux, de négativités et positivités par rapport à la ligne de base, bien que les polarités ne soient pas absolues mais dépendent plutôt de la position relative des deux électrodes qui servent d'entrée à l'amplificateur différentiel qui nous permet d'enregistrer ces fluctuations de 1 à 60 μV dans l'EEG (voir Figure I).

Une électrode sur le scalp ne peut pas détecter toute l'activité électrique du cerveau. Par exemple, l'activité des configurations de neurones à champ clos n'est pas détectable ; seules les configurations à champ ouvert sont détectables à la surface du scalp, du fait des propriétés de conduction des volumes. Le néocortex fonctionne, cependant, en champ ouvert et remplit tous les critères nécessaires à la production d'un potentiel électrique observable sur le scalp : (1) la distribution moyenne des puits et des sources dans un fragment de cortex doit être organisée de façon symétrique non radiale, (2) les neurones doivent être alignés d'une façon systématique, et (3) les neurones doivent être activés de façon synchronisée. Environ 70 % des cellules dans le néocortex sont des cellules pyramidales ; elles ont des dendrites apicaux qui s'étendent du soma vers la surface et donnent au cortex une apparence en colonne. Quand ces dendrites apicaux ou les corps cellulaires sont activés, les flots de courant qui entrent et sortent des cellules créent une configuration (le puits et de sources approximativement dipolaire et orientée perpendiculairement à la surface corticale. Le champ de potentiel produit par un neurone pyramidal particulier est très faible ; cependant, les champs produits par un fragment de cortex contenant des centaines de milliers de cellules pyramidales se somment, produisant ainsi un champ électrique qui peut facilement être détecté sur le scalp. C'est, de fait, ce qui est

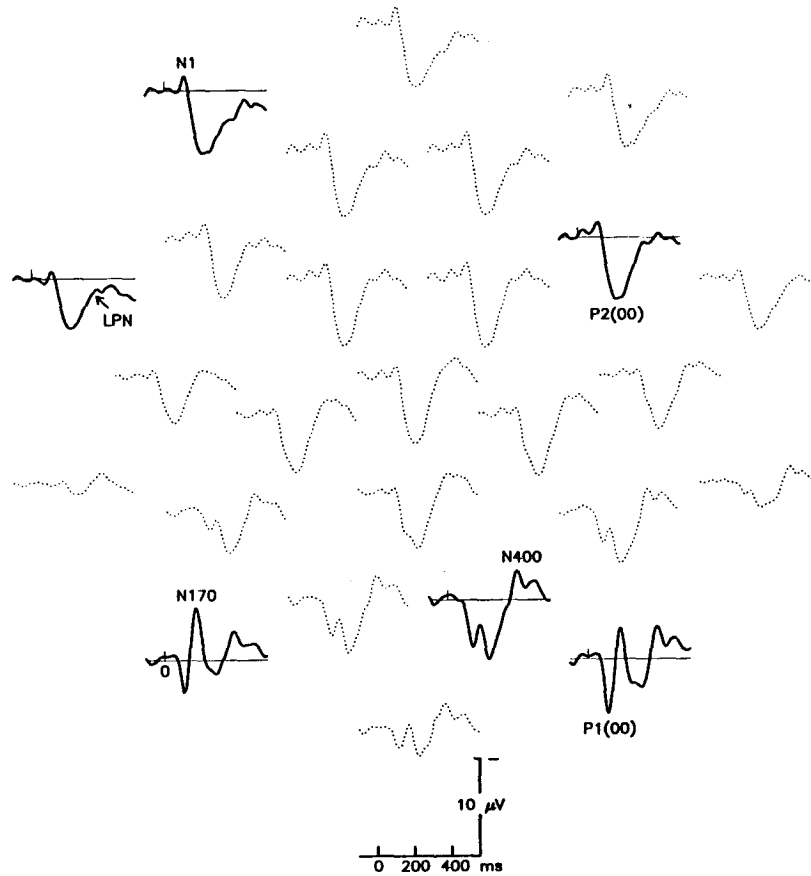


Figure 1. Grand moyennage (à travers les stimuli et les sujets) des Potentiels liés à l'Événement (ERPs) suscités par le premier nom dans une série de phrases, et enregistrés à partir de 26 électrodes placées sur le scalp. Le haut de la figure représente l'avant de la tête et le bas de la figure, l'arrière. Certaines des composantes typiques associées à la présentation de stimuli visuels (e. g., Ni, P1 (00), N170, P2 (00), la négativité de traitement lexical ou LPN, et N400) sont indiquées à leurs sites d'enregistrement caractéristiques. Zéro représente le début de la présentation du stimulus. La négativité des phénomènes enregistrés est représentée vers le haut sur cette figure et sur les suivantes.

reflété dans les ERPs enregistrés sur le scalp. En résumé, les enregistrements électriques sur le scalp résultent, pour l'essentiel, des courants post-synaptiques dans les dendrites apicaux des cellules pyramidales du néocortex. Être limité à étudier l'activité générée dans le néocortex n'est pas une limite très forte après tout, puisque le néocortex est le principal substrat nerveux du

traitement perceptif, qu'il joue un rôle prépondérant dans l'exécution et la planification motrice, et sous-tend l'essentiel de ce que nous entendons par « cognition supérieure ».

2. Que révèle l'analyse des ERPs ?

Examinons comment on « lit » les ERPs et les inférences que l'on peut faire. Généralement, on commence avec un tracé représentant l'évolution du voltage au cours du temps, où le temps zéro représente le début du stimulus. Il est maintenant habituel d'examiner plusieurs tracés (e.g., 12-128) enregistrés simultanément à partir de différentes électrodes sur le scalp, pour avoir une idée de la manière dont les enregistrements changent, non seulement dans le temps, mais dans l'espace (voir Figure 1). Si la distribution topographique des ERPs change de façon significative au cours du temps, on peut inférer que plus d'une source génératrice est active. Savoir exactement combien de générateurs étaient actifs à un moment donné requiert des algorithmes de filtrage spatial ; cependant, l'inférence selon laquelle plus d'une source est active, découle des changements de distribution observés. Classiquement, les maxima d'amplitude sont identifiés comme des composantes, dont on peut montrer qu'elles sont significativement corrélées avec des manipulations expérimentales particulières, bien qu'en fait les maxima d'amplitude ne représentent rien de particulier par rapport aux autres parties du tracé. Le mot composante est utilisé par différents chercheurs pour signifier (1) un maximum d'amplitude, (2) une caractéristique de l'enregistrement dont la polarité, la latence et la distribution topographique peuvent être prédites à partir des manipulations expérimentales, (3) l'activité d'une source génératrice particulière ou d'un ensemble de sources dans le cerveau. Puisqu'un maximum d'amplitude est souvent corrélé avec un processus cognitif particulier, on considère qu'il peut être utilisé comme un indice physiologique de ce processus, dont le déroulement temporel peut être déduit de la latence d'occurrence du maximum d'amplitude (la propagation de l'activité électrique étant essentiellement instantanée), et son degré d'activation (parfois malencontreusement) déduit de l'amplitude, ou de la surface, de la composante.

Si deux tracés ERPs diffèrent significativement entre deux conditions expérimentales, on considère généralement que l'activité du cerveau, et les activités mentales que cette activité reflète, sont différentes dans les deux conditions. La nature exacte de la différence observée sur le scalp dépend très étroitement de la position des électrodes par rapport aux sources génératrices sous-jacentes. Il est important de noter que l'endroit sur le scalp où un changement de potentiel est le plus ample ne reflète pas nécessairement

l'endroit où se situe cette source génératrice. En outre, des inférences raisonnables peuvent être faites quant au décours temporel des processus étudiés, en considérant le moment où deux tracés ERPs enregistrés dans deux conditions diffèrent comme une limite supérieure du moment où le cerveau a détecté les différences entre les stimuli.

2.1. Le langage est-il spécifique ?

Maintenant que nous savons comment interpréter les changements observés au niveau des ERPs, examinons quels effets ont effectivement été observés et ce qu'ils nous apprennent sur la spécificité du langage. En d'autres termes, quelles informations nouvelles les ERPs apportent-ils quant à la question générale de savoir si le langage est séparé des connaissances dans d'autres domaines comme la musique (ce que nous discuterons plus tard), et la question plus spécifique de savoir si différentes connaissances linguistiques sont représentées différemment et indépendamment dans l'esprit/cerveau.

Les changements de potentiel les plus pertinents sont les composantes N400, N280, ou plus généralement la négativité de traitement lexical (LPN), la négativité antérieure gauche (LAN), et P600 ou changement syntactique positif. La composante N400 est un potentiel négatif entre 100 et 600 ms dont le maximum d'amplitude se situe environ 400 ms après le début d'un mot ou d'un pseudo-mot. Elle permet de mesurer comment et quand les contraintes sémantiques liées au contexte s'exercent sur le traitement d'un item. La UN est une négativité dont la latence varie entre 250 et 350 ms en fonction de la fréquence d'occurrence du mot dans la langue. La LAN est une négativité, entre 200 et 700 ms après le début de la présentation d'un mot, qui refléterait la charge mnésique dans la mémoire à court terme. La P600 est une composante positive, entre 200 et 800 ms, qui varie avec la manipulation de contraintes syntaxiques variées, et qui est corrélée avec la difficulté de traitement résultant de facteurs structuraux. Ces composantes sont considérées comme différentes parce qu'elles varient par leur distribution sur le scalp et leur sensibilité aux manipulations expérimentales. L'amplitude maximale de ces composantes est observée, pour N400, sur les sites postérieurs de l'hémisphère droit ; pour la LPN, sur les sites antérieurs gauches, pour la LAN sur les régions fronto-centrales de l'hémisphère gauche, et particulièrement sur les aires pré-frontales. La P600 est très largement distribuée sur le scalp, souvent mais pas toujours, d'amplitude maximale sur les aires postérieures bilatéralement.

2.2. Différents niveaux de représentation dans le langage

Comment peut-on utiliser ces changements de potentiel pour dissocier différents niveaux de représentation dans le langage ? Trois approches principales ont été utilisées. La première consiste à violer différents niveaux de représentation et déterminer si les ERPs sont similaires ou différents : la mise en évidence de différences atteste l'existence de niveaux de représentation différents. Une deuxième approche consiste à contraster les ERPs associés à différentes catégories de mots, comme les classes ouvertes et fermées, et à comparer leurs distributions topographiques, puisqu'elles signalent généralement la présence de sources génératrices sous-jacentes différentes. Une troisième approche consiste à tester les interactions entre différents niveaux de représentation, et démontrer, par exemple, que des informations contextuelles de niveau élevé influencent des processus de traitement plus bas, supposés modulaires. De nombreuses expériences ont eu pour but d'identifier les composantes ERPs qui seraient spécifiques des traitements syntaxique ou sémantique.

2.3. Sémantique et syntaxe

2.3.1. La composante N400

Des violations lexico-sémantiques comme *Je prends mon café avec du sucre et du chien* suscitent l'occurrence d'une composante N400 (Kutas & Hillyard, 1980), que ces violations soient présentées en anglais, espagnol, français, allemand, hollandais, japonais et même dans la langue des signes (voir Kutas & Van Petten, 1994, pour une revue). L'amplitude de N400 est inversement proportionnelle à l'attente (i.e. la « cloze probability ») d'un mot spécifique dans un contexte phrastique particulier (Kutas & Hillyard, 1984 ; Kutas *et al.*, 1984). En fait, chaque mot suscite l'occurrence d'une composante N400 dont l'amplitude est fonction de l'attente sémantique liée au contexte phrastique. Van Petten et Kutas (1990 ; 1991) ont comparé les effets de contexte lorsque des mots sont présentés dans des phrases normalement congruentes, des phrases dont la structure syntaxique est correcte mais qui n'ont pas de sens, et des phrases complètement déstructurées, sans signification ni syntaxe. Seuls les mots des phrases congruentes étaient associés à une composante N400 dont l'amplitude diminuait au fur et à mesure de la construction du contexte sémantique. Ces résultats ont montré également des effets interactifs de la fréquence des mots et du contexte sémantique sur l'amplitude de N400, mais seulement pour les phrases ayant une signification. L'effet de fréquence est important au début de la phrase, mais il s'évanouit vers la fin de la phrase lorsque le contexte devient plus prégnant.

2.3.2. La composante P600

Toujours dans un contexte phrastique, examinons les variations observées au niveau des ERPs et suscitées par d'autres types de violations que les violations sémantiques. La première comparaison directe entre violations lexico-sémantique et morpho-syntaxique en anglais (résultats reproduits par la suite en espagnol) a montré qu'une positivité, dénommée P600 ou SPS, était associée aux violations morpho-syntaxiques (Kutas & Hillyard, 1983). Cette positivité a été interprétée, par d'autres auteurs, comme reflétant (directement ou indirectement) l'opération d'un analyseur syntaxique modulaire. Depuis, de nombreuses violations syntaxiques ont été utilisées en anglais, hollandais, finlandais et allemand. Par exemple, les chercheurs ont étudié l'effet des violations d'accord sujet/verbe, de genre, des contraintes de sous-catégorisation ou de structures phrastiques. Münte & Heinze (1994) ont montré qu'une composante P600 est associée à une violation de genre sur le mot *Besens* dans *Die Hexe benutze ihren Besens, um zum Wald zu fliegen* (« La sorcière a utilisé son balai pour voler dans la forêt ») par rapport au mot correct *Besen* (voir Figure 2).

L'occurrence de N400 en réponse aux violations lexico-sémantiques et de P600 à certaines violations syntaxiques a été interprété comme reflétant une différence entre processeurs syntaxique et sémantique (e.g., Osterhout & Holcomb, 1992). Cependant, des violations de sous-catégorisation en hollandais ne suscitent pas l'occurrence d'une composante P600. Ce résultat doit-il être considéré comme reflétant une différence linguistique ? En outre, les différentes positivités (appelées P600) dans différentes expériences varient par leur latence et leur distribution topographique, ce qui implique dif-

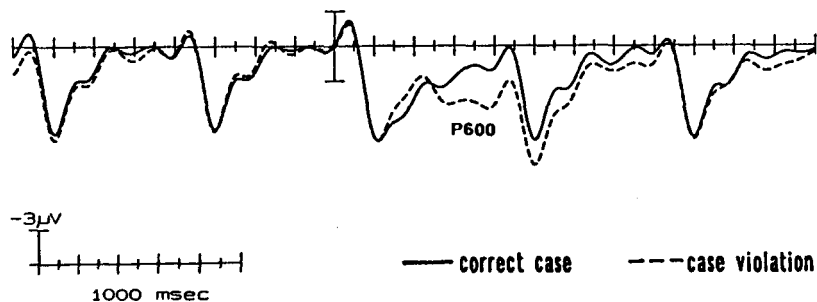


Figure 2. ERPs associés à un fragment de cinq mots d'une phrase, en allemand, présentée mot par mot. Comparaison d'énoncés syntaxiquement corrects (tracé plein) et d'énoncés dans lesquels apparaissent des violations syntaxiques (tracé pointillés). Les enregistrements ont été effectués à partir d'une électrode placée au sommet de la tête (au vertex). Figure adaptée de Münte et Heinze (1994).

férentes configurations de sources génératrices. Par conséquent, il semble difficile de considérer P600 comme spécifique du traitement syntaxique. En outre, Coulson *et al.* (à paraître) ont montré que l'amplitude de P600, comme celle de la composante P300 associée aux événements non linguistiques inattendus et pertinents pour la tâche, est sensible à la probabilité d'occurrence des violations. En d'autres termes, si les violations syntaxiques sont fréquentes et la forme syntaxiquement correcte rare, la différence entre les deux conditions est moins grande que si la violation syntaxique est également la moins fréquente. La non-additivité des effets de violation syntaxique et de fréquence d'occurrence des violations souligne donc la non-indépendance de leurs sources génératrices.

2.3.3. La négativité antérieure gauche et la composante N280

En revanche, la négativité antérieure gauche semble être plus spécifiquement liée aux violations syntaxiques. Cette négativité ressemble, cependant, à une autre négativité observée lorsque la charge de traitement imposée sur la mémoire de travail augmente, sans qu'il y ait pour autant de violations syntaxiques. Kluender & Kutas (1993) ont fait l'hypothèse selon laquelle le LAN refléterait les opérations qui permettent le stockage d'un item dans la mémoire à court terme et son recouvrement, ensuite, pour saisir le sens de la phrase (voir aussi King & Kutas, 1995).

Outre l'étude de l'effet des violations lexico-sémantiques ou morpho-syntaxiques, les chercheurs en électrophysiologie cognitive ont également utilisé une deuxième approche consistant à comparer la distribution topographique des ERPs associés à des items appartenant à des classes lexicales différentes, telles que les mots de classe ouverte (à contenu sémantique) ou fermée (mots de fonction). Cette idée repose sur l'association entre sémantique et mots de classe ouverte, et syntaxe et mots de classe fermée. Cette distinction semble avoir trouvé des bases électrophysiologiques, puisque les mots de classe ouverte suscitent l'occurrence de composantes N400s sur les sites postérieurs droits, alors que les mots de classe fermée sont associés à une négativité (N280) sur les sites frontaux gauches (à proximité de l'aire de Broca). Cependant, même cette distinction pose problème. Par exemple, N400 n'est pas spécifique des mots de classe ouverte. Kluender & Kutas (1993) ont observé des N400s aux mots de classe fermée *que*, *si*, et *qui* dans des questions comme *Pouvez-vous vous rappeler que, si ou qui... ?*.

Notons également que tous les mots de classe ouverte ne suscitent pas l'occurrence d'une composante N400. Par exemple, une violation sémantique répétée pour la deuxième fois n'est pas associée à une composante N400 (Besson *et al.*, 1992), pas plus qu'un mot de classe ouverte présenté à la fin d'une phrase (Van Petten 1993 ; Van Petten & Kutas, 1990, 1991). Dans la mesure où les mots de classe fermée sont plus facilement anticipés

en fonction du contexte que les mots de classe ouverte, cette différence pourrait expliquer pourquoi les mots de classe ouverte sont généralement associés à des N400s plus amples.

Il est également possible de montrer que les composantes N280s ne sont pas spécifiques des mots de classe fermée. En fait, les ERPs à tous les mots, articles, prépositions adverbiales, adjectifs, verbes et noms, suscitent l'occurrence d'une négativité, la négativité de traitement lexical (LPN), sur les régions frontales, dont la latence varie en fonction de la fréquence d'occurrence des mots dans la langue. La figure 3 illustre la LPN associée aux articles définis, prépositions adverbiales, adjectifs, verbes et noms.

Une régression linéaire sur la latence du maximum d'amplitude de la LPN et de la « scarité » des mots (i.e., une transformation de fréquence)

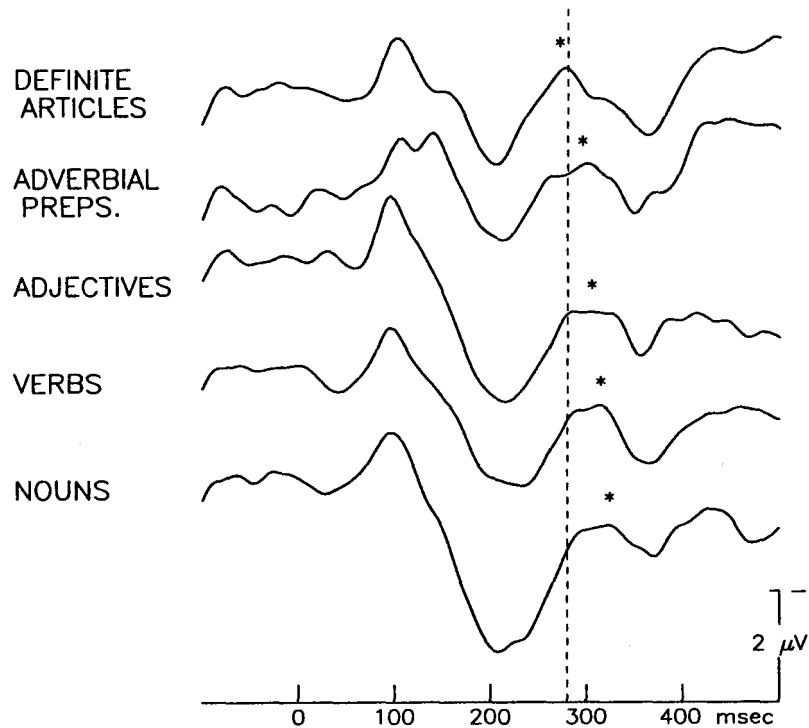


Figure 3. Grand moyennage (24 participants) des ERPs enregistrés sur un site frontal de l'hémisphère gauche (F7) lors de la présentation de différents types de mots représentatifs des sous-classes de la classe ouverte (adjectifs, verbes et noms) ou de la classe fermée (articles définis, prépositions adverbiales) sont présentés. La ligne en pointillés est située à 280 ms après le début du dernier mot; l'astérisque indique la latence du maximum d'amplitude des différents types de mots.

rend compte, en moyenne, de 90 % de la variance. Ainsi, la présence de cette négativité n'est pas un marqueur spécifique des mots de classe fermée. La LPN est présente, avec une distribution topographique similaire, pour les deux classes de mots, mais sa latence est plus courte pour les mots de classe fermée de haute fréquence, et plus longue pour les mots de classe ouverte de basse fréquence. Une telle différence de latence (environ 50 ms) peut très bien refléter de réelles différences dans le traitement des mots de classe ouverte et fermée, et va à l'encontre de l'hypothèse selon laquelle un processeur spécifique du traitement des mots de classe fermée, situé dans l'aire de Broca, serait responsable des différences observées.

Bien que ni N400, ni la LPN ne soit spécifique d'une classe lexicale particulière, ces composantes peuvent néanmoins être utilisées pour aborder la question des représentations linguistiques. Nous avons déjà mentionné que le contexte influence l'amplitude de N400 associée à la présentation de mots dans un contexte phrastique. Notons que l'amplitude de N400 est aussi sensible à l'appartenance catégorielle (e.g., Fischler *et al.*, 1983 ; Boddy & Weinberg, 1981 ; Heinze *et al.*, 1997). L'amplitude de N400 associée à un mot appartenant à une catégorie sémantique définie par un premier mot est moins grande que si le mot n'appartient pas à cette catégorie sémantique. En outre, N400 aux exemplaires typiques de la catégorie est de moins grande amplitude que N400 aux exemplaires non typiques. Kara Federmeier a utilisé le fait que l'amplitude de N400 est influencée à la fois par le contexte phrastique et l'appartenance catégorielle pour déterminer dans quelle mesure les contraintes qui émergent de l'organisation des catégories dans la mémoire à long terme interagissent en temps réel au cours de la lecture avec les contraintes phrastiques. Les participants devaient lire des phrases qui étaient terminées soit par un nom d'objet attendu dans le contexte, un nom d'objet de la même catégorie mais non attendu dans le contexte, ou un nom d'objet non attendu en fonction du contexte et d'une catégorie différente. Par exemple, *Echec et mat, annonça Rosalie avec joie. Elle devenait très bonne aux ECHECS* (attendu), *MONOPOLY* (même catégorie), et *FOOTBALL* (catégorie différente). Les résultats préliminaires indiquent que les ERPs aux mots attendus sont associés à une positivité de grande amplitude entre 300 et 600 ms, alors que les mots non attendus sont caractérisés par des N400s, dont l'amplitude est plus grande lorsque le mot appartient à une catégorie sémantique différente. Il semble donc que l'attente sémantique ne concerne pas seulement un mot particulier mais plutôt des catégories sémantiques. Les items des catégories attendues seraient plus facilement intégrés même s'ils ne sont pas plus plausibles, ce qui est en accord avec l'hypothèse selon laquelle le contexte opère à travers l'utilisation d'une structure catégorielle pour les objets dans la mémoire à long terme. Nous envisageons maintenant d'étudier ces effets en utilisant des images d'objets et des catégories d'action.

2.3.4. Les potentiels lents

En étudiant l'effet de divers types de violations, l'emphase dans les études électrophysiologiques du langage est restée au niveau des mots particuliers, même si ceux-ci sont présentés dans le contexte de phrases. Cette approche diffère de la plupart des expériences fondées sur les techniques d'imagerie cérébrale dans lesquelles on utilise le plus souvent la présentation de mots isolés dans le contexte de listes. Mais le langage implique plus que le traitement de mots isolés et requiert l'analyse des relations syntaxique, sémantique et thématique entre les mots. En outre, certains processus se déroulent au cours du temps, impliquant ainsi une suite d'opérations logiques, comme dans le traitement de la référence anaphorique et la compréhension des questions *que, qui, quoi*, etc., en anglais, par exemple. Les ERPs sont tout à fait adaptés à l'étude de ces processus puisqu'on peut utiliser des filtres digitaux de basse fréquence et enregistrer ainsi les potentiels lents qui se développent au cours de la lecture de la phrase. Aussi simples que soient ces phrases, elles requièrent, pour être comprises, une analyse à des niveaux linguistiques multiples, ainsi que l'utilisation des mémoires de travail et à long terme.

Plusieurs caractéristiques de ces potentiels lents permettent de suivre le traitement d'un énoncé. En résumé, nous avons identifié quatre types de potentiels lents latéralement asymétriques (voir Figure 4)

(1) un changement négatif sur les sites occipitaux associé au traitement visuel précoce,

(2) une positivité temporale qui refléterait le traitement des verbes,

(3) une négativité sur les sites temporaux qui refléterait le traitement de la fin de l'énoncé,

et (4) une très lente positivité frontale qui pourrait refléter la construction d'un modèle mental de la phrase, en intégrant la trace des items dans la mémoire à court terme et leurs représentations dans la mémoire à long terme.

En outre, tout ceci prend place simultanément, mais sur des aires du cerveau différentes et avec un décours temporel différent.

Nous avons enregistré ces effets au niveau des potentiels lents en utilisant des structures de phrases variées, telles que des propositions subordonnées dont le premier syntagme nominal est soit le sujet, soit l'objet de la proposition (e.g., *la femme que je vois...* versus *la femme qui appelle...*). Sans entrer dans les détails, King et Kutas (1995) ont montré que le traitement de ces deux types de structures diffère, et que ces différences peuvent être liées aux demandes différentes qu'elles exercent sur la mémoire à court terme. En outre, nous avons trouvé que ces effets sont très similaires, que les phrases soient lues ou parlées (Müller *et al.*, sous presse). Peut-être plus important encore, ces potentiels lents peuvent aussi être utilisés pour examiner

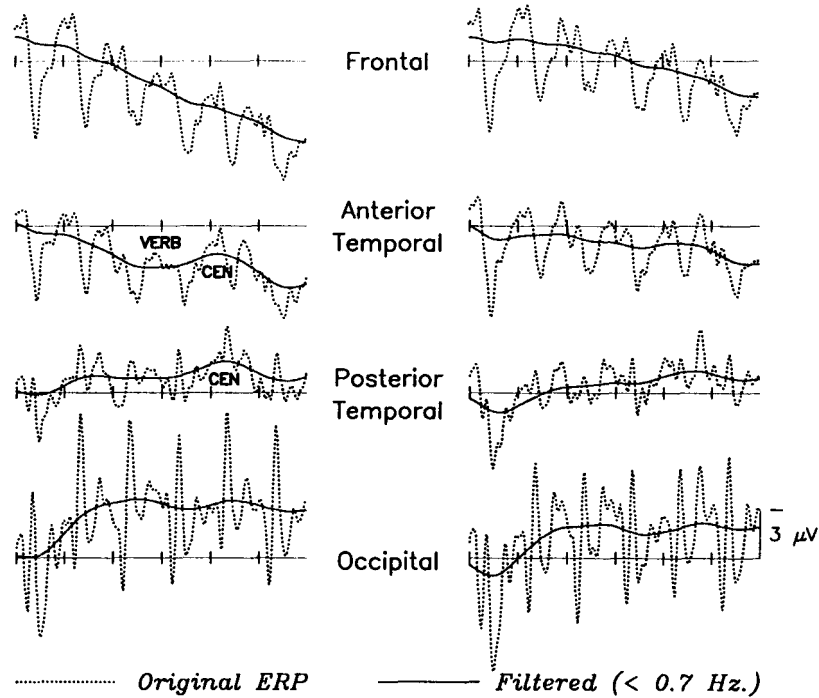


Figure 4. Les ERPs (tracé pointillé) enregistrés lors de la présentation des six premiers mots d'une phrase (a La secrétaire répond au téléphone parce que... »), et les potentiels lents (tracé plein), filtrés à 0.7 Hz. Les enregistrements sont effectués à partir de 4 paires d'électrodes situées d'avant en arrière du scalp et sur les hémisphères droit et gauche (colonnes de droite et gauche, respectivement) pour chacun des mots d'une phrase, chez 18 participants. Les effets correspondant au verbe et à la négativité de clôture de la phrase sont indiqués. Reproduit avec la permission de MIT Press, King & Kutas (1996).

d'éventuelles interactions entre différents niveaux d'analyse. Par exemple, Weckerly (1995) a utilisé ces potentiels lents pour déterminer si le caractère animé d'un nom (un facteur sémantique en anglais mais non dans toutes les langues) était utilisé en temps réel pendant la lecture de phrases. Elle a présenté des phrases, propositions subordonnées avec un syntagme nominal objet, dans lesquelles seul l'ordre des noms ayant un caractère animé ou non variait.

Plusieurs des effets observés précédemment ont été reproduits, notamment la très lente positivité frontale, la positivité liée au verbe et les effets CEN et LAN sur le verbe. En outre, les ERPs présentaient des différences en

fonction du caractère animé ou non des noms, et ceci aussitôt que le nom était lu (Weckerly & Kutas, à paraître). Nous avons souligné ailleurs que ces résultats vont dans le sens de notre hypothèse selon laquelle le caractère animé ou non des noms 1) est pris en compte simultanément avec les informations concernant l'ordre des mots pour déterminer les rôles grammaticaux des différents mots de la phrase, et 2) s'ajoute au mot quoi pour définir les attentes de la construction en syntagme nominal objet. Ainsi, les connaissances sémantique et pragmatique influencent les premières analyses syntaxiques. Plus généralement, nos résultats révèlent l'existence de relations étroites entre des niveaux d'analyse linguistique supposés être séparés et indépendants.

En résumé nous avons montré qu'il est possible d'examiner les changements de l'activité électrique du cerveau dans le traitement du langage via l'enregistrement des ERPs à partir du scalp chez l'homme. Les réactions aux mots et aux phrases reflètent la sensibilité du cerveau à des analyses linguistiques variées. A ce jour, aucune de nos données ne favorise l'hypothèse de l'existence univoque de représentations linguistiques encapsulées qui n'interagiraient pas avant leur traitement complet. Nous n'avons pas trouvé de marqueurs spécifiques des processus langagiers. Nous allons maintenant examiner comment l'hypothèse de modularité résiste à la comparaison des processus et représentations linguistiques et musicales.

2.4. ERPs et musique

Les premières expériences que nous avons réalisées dans le domaine de la perception musicale ont eu pour but de tester la signification fonctionnelle de la composante N400. Il s'agissait de déterminer si la présentation d'une note incongrue (hors de la tonalité) à la fin d'une phrase musicale, comme celle d'un mot incongru à la fin d'une phrase linguistique, suscite l'occurrence d'une composante N400 (Besson & Macar, 1987). Les résultats ont révélé que seule la présentation d'un mot incongru suscite l'occurrence d'une composante N400. En revanche, la présentation d'une fausse note est associée à une composante positive tardive, dont le maximum d'amplitude se situe environ 500 ms après le début de la note incongrue sur les aires pariétales du scalp. Fallait-il alors conclure à la spécificité linguistique de N400 ? Plusieurs raisons nous ont conduit à réserver nos conclusions. Tout d'abord, les phrases musicales utilisées étaient si familières et les incongruités si évidentes, qu'elles ne nécessitaient pas la mise en jeu de connaissances musicales particulières pour être détectées. En outre, les participants n'étaient pas musiciens et ne pouvaient donc pas avoir recours à des connaissances musicales spécifiques. Or N400 pourrait refléter l'accès aux connais-

lances et les opérations réalisées sur ces connaissances, sans pour autant être spécifique du langage.

2.4.1. Violations harmoniques

Nous avons donc conduit une deuxième série d'expériences (Besson & Faita, 1995) dans lesquelles nous avons manipulé

- l'expertise musicale : des musiciens de formation classique, professionnels ou ayant au moins 7 ans de formation musicale au Conservatoire National de Région, et des non musiciens, non mélomanes, ont participé aux expériences ;
- la familiarité du matériel musical présenté : des phrases musicales connues des participants, extraites du répertoire classique (Vivaldi « Les Quatre Saisons » ; Mozart « La Marche Turque », etc.), et des phrases nouvelles, composées spécialement pour l'expérience en suivant les canons de la musique classique ;
- le type d'incongruité : les phrases musicales, connues ou nouvelles, étaient terminées par la note congruente, une note incongrue en dehors de la tonalité (non diatonique), ou dans la tonalité mais peu attendue en fonction du contour mélodique (diatonique), et, enfin, par la note congruente mais présentée après un délai de 600 ms (rythmique). Notons que chaque type de note terminale avait la même probabilité d'occurrence.

Les résultats illustrés sur la Figure 5 montrent que la présentation d'une incongruité non diatonique suscite l'occurrence d'une composante positive tardive, reproduisant ainsi les résultats obtenus par Besson & Macar (1987). L'incongruité diatonique suscite également l'occurrence d'une composante positive, mais son amplitude est moins grande que pour l'incongruité non diatonique. En outre, l'amplitude de ces effets est plus grande pour les mélodies connues que pour les mélodies inconnues des participants, et pour les musiciens que pour les non musiciens.

La présentation d'incongruités musicales diatoniques ou non diatoniques suscite donc l'occurrence de composantes positives tardives mais non de composantes N400. Or, comme nous l'avons mentionné ci-dessus, des composantes positives tardives, comme P600, sont associées à différents types de violations syntaxiques. Il semble donc que les similarités entre langage et musique se situent plutôt au niveau des structures harmoniques et syntaxiques qu'au niveau des représentations sémantiques. Récemment, cette hypothèse a été testée directement par Patel & al (sous presse). Des phrases linguistiques et musicales, dans lesquelles étaient insérées des violations syntaxiques, d'inversion d'ordre des mots, ou des violations harmoniques, d'accords hors de la tonalité, étaient présentées à des participants musiciens. Les résultats ont montré que les composantes positives associées aux

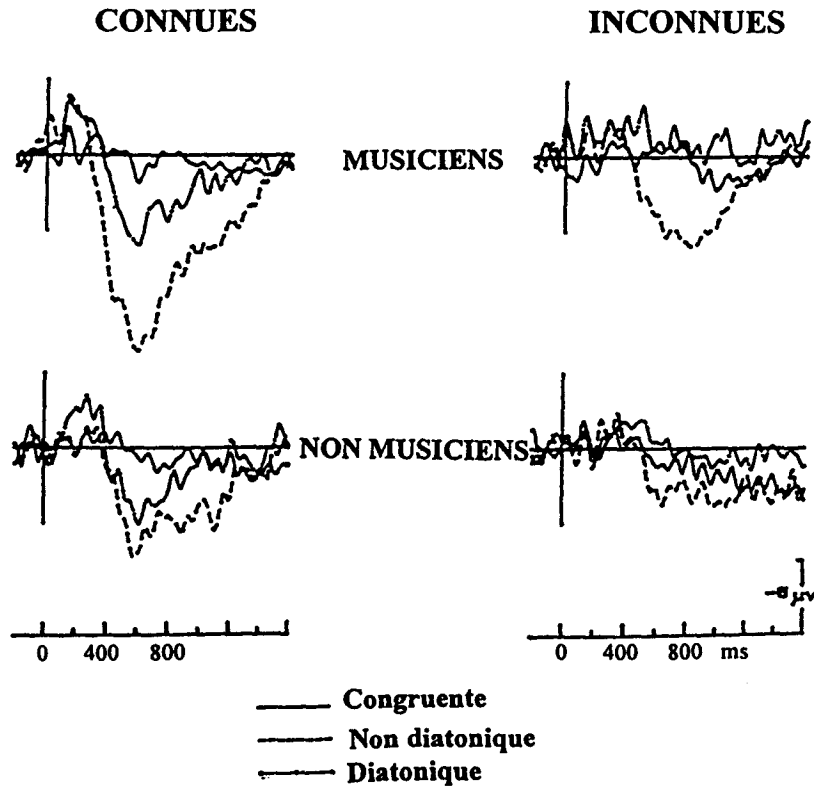


Figure 5. Les ERPs enregistrés chez des musiciens (15 participants) et des non musiciens (15 participants), lors de la présentation d'une note congruente (tracé plein), d'une incongruité non diatonique (tracé pointillé) ou diatonique (tracé tiret-point) à la fin de mélodies connues (colonne de gauche) ou inconnues (colonne de droite). Les enregistrements sont effectués à partir du site pariétal (Pz). Modifié d'après Besson & Faita (1995).

incongruités syntaxiques et harmoniques n'étaient pas significativement différentes.

2.4.2. Violations de rythme

Les résultats concernant l'incongruité rythmique sont présentés sur la Figure 6. Une composante positive de grande amplitude est associée à l'absence de la note, c'est-à-dire apparaît au moment où la note aurait dû être présentée. L' amplitude de cette composante n'est pas différente pour les mu-

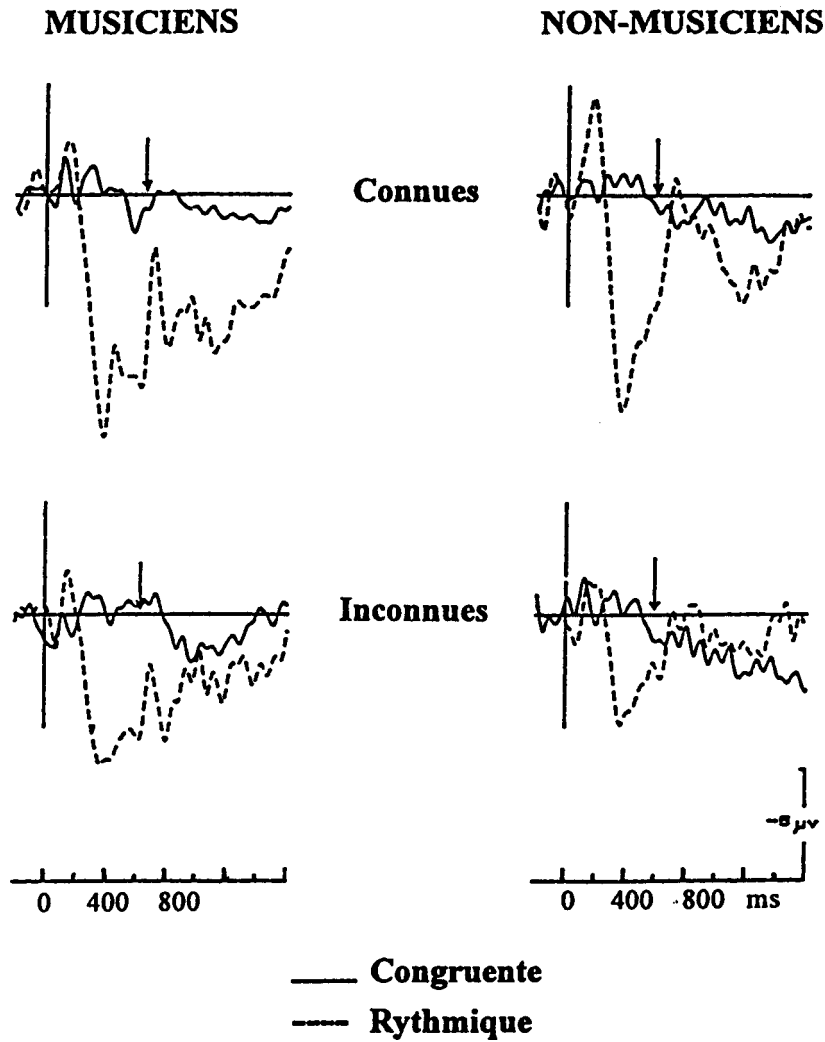


Figure 6. Les ERPs enregistrés chez des musiciens (15 participants) et des non musiciens (15 participants), lors de la présentation d'une note congruente (tracé plein) et d'une incongruité rythmique (tracé pointillé) à la fin de mélodies connues ou inconnues. La barre verticale représente le moment où la note aurait due être présentée, et la flèche le moment où elle était effectivement présentée. Les enregistrements sont effectués à partir du site pariétal (Pz). Modifié d'après Besson & Faita (1995).

siciens et les non musiciens mais est plus grande pour les mélodies connues que pour les mélodies inconnues.

Ces résultats sont importants car ils suggèrent que les ERPs sont sensibles au rythme et donc à la structure temporelle des phrases musicales. Nous avons réalisé une série d'expériences dans laquelle nous avons introduit des ruptures de rythme dans des énoncés linguistiques présentés dans la modalité visuelle ou dans la modalité auditive (Besson *et al*, 1997). Le dernier mot de ces énoncés était présenté soit au moment où il devait l'être, soit avec un délai de 600 ms. L'effet de cette violation de la structure temporelle des énoncés linguistiques était tout à fait similaire à celui obtenu dans les expériences musicales précédentes. Ainsi, il semble donc que les informations temporelles sont traitées de façon similaire, que le matériel utilisé soit linguistique ou musical. Des expériences sont actuellement en cours afin de comparer directement structures prosodique dans le langage et rythmique dans la musique.

2.4.3. L'opéra

Enfin, toujours dans le but de comparer directement musique et langage, nous avons sélectionné des extraits d'opéra que nous avons demandé à une chanteuse professionnelle de chanter *a capella*. Ces extraits, qui duraient entre 15 et 20 secondes, étaient terminés soit par un mot congruent par rapport au livret, chanté juste ou faux, soit par un mot sémantiquement incongru, chanté juste ou faux (Bizet, Carmen : *Les étoffes flottaient au vent/sang*). Ce matériel expérimental a été présenté à des musiciens professionnels de l'opéra de Marseille, qui devaient simplement écouter les extraits afin de détecter les différents types d'incongruité. Les résultats de cette expérience montrent qu'une composante N400 est associée aux mots incongrus, et qu'une composante positive tardive (LPC) est associée aux mots chantés faux. Le plus important est que les deux composantes, N400 et LPC, sont présentes lorsque l'incongruité est double (mots incongrus chantés faux). Ces résultats révèlent ainsi une additivité quasi parfaite des composantes ERPs associées au traitement des incongruités sémantiques et musicales, et soulignent donc l'indépendance de ces deux types de traitement.

Conclusion

La comparaison des processus impliqués dans le traitement du langage et de la musique révèle à la fois des similarités et des différences. Les différences sont essentiellement mises en évidence lorsque sont étudiées les re-

présentations sémantiques et les opérations qui permettent l'accès au sens des mots. En revanche, des similarités émergent au niveau du traitement des informations syntaxique, harmonique et temporelle. Sans pour autant parler d'identité fonctionnelle, les résultats présentés ci-dessus favorisent l'idée selon laquelle les opérations cognitives qui président au traitement du langage et de la musique obéissent à des principes de fonctionnement, sinon communs, du moins similaires. Une fois encore, nos données vont ainsi à l'encontre de l'hypothèse d'une forte modularité des représentations linguistiques et musicales.

Remerciements

Les travaux mentionnés dans ce chapitre ont été subventionnés par des actions du MRT, Science de la Cognition (92.C.0420) et G.I.S. « Sciences de la Cognition » (1995-1997) à Mireille Besson, et du NIMH (MH52893), NIA (AG08313), et NICHD (HD22614) à Marta Kutas. Nous sommes reconnaissantes à Abdelrhani Benraiss pour son aide dans la préparation des figures.

Références

- BESSON, M. & F. MACAR. 1987. An event-related potentials analysis of incongruity in music and other non-linguistic contexts. *Psychophysiology*, 24, pp. 14-25.
- BESSON, M. & al. 1992. An Event-Related Potential (ERP) analysis of semantic congruity and repetition effects in sentences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4, pp. 132-149.
- BESSON, M. & al. 1994. Brain waves associated with musical incongruity differ for musicians and non-musicians. *Neuroscience Letters*, 168, pp. 101-105.
- BESSON, M & F FAÏTA. 1995. An Event-Related Potential (ERP) study of musical expectancy : comparison of musicians with non-musicians. *Journal of Experimental Psychology*, 21 : 6, pp. 1278-1296.
- BESSON, M. & al. 1997. What's in a pause: Event-Related Potential analysis of temporal disruptions in written and spoken sentences. *Biological Psychology*, 46, pp. 3-23.
- BODDY, J. & H. WEINBERG. 1981. Brain potentials, perceptual mechanisms and semantic categorization. *Biological Psychology*, 12, pp. 43-61.

- COULSON, S. & *al.* à paraître. Expect the unexpected : Event-related brain responses to morphosyntactic violations.
- FISCHLER, I., & *al.* 1983. Brain potentials related to stages of sentence verification. *Psychophysiology*, 20, pp. 400-409.
- HEINZE, H. & *al.* sous presse. Context effects in a category verification task as accessed by Event-Related brain Potentials measures. *Biological Psychology*.
- KING, J. & M. KUTAS. 1995a. Who did what and when ? Using word- and clausal-level ERPs to monitor working memory usage in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7 : 3, pp. 376-395.
- KING, J. & M. KUTAS. 1995b. A Brain Potential whose latency indexes the length and frequency of words, *CRL Newsletter*, October, 10 : 1.
- KLUENDER, R. 1991. *Cognitive constraints on variables in syntax*. Dissertation, University of California, San Diego.
- KLUENDER, R. & M. KUTAS. 1993a. Bridging the gap: evidence from ERPs on the processing of unbounded dependencies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5 : 2, pp. 196-214.
- KLUENDER, R. & M. KUTAS. 1993b. Subjacency as a processing phenomenon. *Language and Cognitive Processes*, 8 : 4, pp. 573-633.
- KUTAS, M. & S. HILLYARD. 1980. Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207, pp. 203-205.
- KUTAS, M. & S. HILLYARD. 1983. Event-Related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory & Cognition*, 11, pp. 539-550.
- KUTAS, M. & S. HILLYARD. 1984. Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature*, 307, pp. 161-163.
- KUTAS, M. & *al.* 1984. Word expectancy and event-related brain potentials during sentence processing. In S. Kornblum & J. Requin (eds.), *Preparatory states and processes*, Hillsdale : Erlbaum, pp. 217-237.
- KUTAS, M. & C. VAN PETTEN. 1994. Psycholinguistics electrified Event-related potential investigations. In M.A. Gernsbacher (ed.), *Handbook of Psycholinguistics*, Academic Press, pp. 83-143.
- KUTAS, M. & J. W. KING. 1996. The potentials for basic sentence processing : differentiating integrative processes. In T. Inui & J. L. McClelland (eds.), *Attention and Performance*, M.I.T. Press.
- MOLLER, H.M. & *al.* sous presse. Even-related potentials elicited by spoken relative clauses, *Cognitive Brain Research*.
- MONTE, T. & H. HEINZE. 1994. Event-related negativities during syntactic processing of written words. In H. Heinze & *al.* (eds.), *Cognitive electrophysiology*. Boston : Birkhauser.

- PATEL, A. & *al.* sous presse. Processing syntactic relations in language and music : an Event-Related Potential study. *Journal of Cognitive Neurosciences*.
- OSTERHOUT, L. & P. HOLCOMB. 1992. Event-Related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31, pp. 785-806.
- VAN PETTEN, C. & M. KUTAS. 1990. Interactions between sentence context and word frequency in event-related potentials. *Memory and Cognition*, 18, pp. 380-393.
- VAN PETTEN, C. & M. KUTAS. 1991. Influences of semantic and syntactic context on open- and closed-class words. *Memory and Cognition*, 19, pp. 95-112.
- VAN PETTEN, C. 1993. A comparison of lexical and sentence-level context effects in event-related potentials. *Language and Cognitive Processes*, 8, pp. 485-531.
- WECKERLY, J. 1995. *Object relatives viewed through behavioral, electrophysiological, and modeling techniques*. Dissertation. University of California, San Diego.
- WECKERLY, J. & M. KUTAS. à paraître. The interaction of grammatical role and noun animacy in object relatives.