

CHRONOMÉTRIE MENTALE DES PROCESSUS COGNITIFS IMPLIQUÉS DANS LA LECTURE APPORTS DES POTENTIELS ÉVOQUÉS

Grégory SIMON

Laboratoire PSY.CO EA 1780 — Université de Rouen
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex
Mél : gregory.simon@univ-rouen.fr

Résumé

Ces dernières décennies ont vu un nombre exponentiel d'études employant l'imagerie fonctionnelle cérébrale telle que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou bien encore la Tomographie par Émission de Positons (TEP). L'utilisation de ces techniques a permis d'identifier les substrats cérébraux de différentes tâches cognitives. Elle est également à l'origine de nombreux échanges entre les différentes disciplines des sciences cognitives. La technique des Potentiels Évoqués (PE) permet quant à elle d'obtenir des indices sur la chronométrie mentale des processus cognitifs. Cette revue de littérature se propose de tirer partie de la grande résolution temporelle des PE afin d'obtenir un aperçu de la dynamique chronométrique des différentes étapes impliquées dans la lecture. Une telle approche est intéressante car elle permet notamment de confronter les modèles issus de la psychologie et de l'intelligence artificielle avec des indices fonctionnels cérébraux.

Abstract

MENTAL CHRONOMETRY OF COGNITIVE PROCESS INVOLVED IN READING: CONTRIBUTIONS OF EVENT-RELATED POTENTIALS

In the last decades, an exponential number of studies using neuro-imaging have been carried out. The use of these techniques has allowed to identify the cerebral substrates involved in various cognitive tasks. It was also a thrust for many exchanges between the various fields of cognitive sciences. Event-Related Potentials allow to obtain indices about the mental chronometry of cognitive processes. This literature review tries to summarize the different steps involved in reading and to understand their temporal dynamics. Such an approach is particularly interesting in order to confront models from psychology and artificial intelligence with functional neural correlates.

Resumen

*CRONOMETRÍA MENTAL DE LOS PROCESOS COGNITIVOS INVOLUCRADOS EN LA LECTURA :
CONTRIBUCIONES DE LOS POTENCIALES EVOCADOS*

Las últimas décadas han visto un número exponencial de estudios que usan las imágenes funcionales cerebrales tales como la imagen por resonancia magnética (IRM) o bien la tomografía por emisión de positones (TEP). El uso de estas técnicas ha permitido identificar substratos cerebrales de varias tareas cognitivas. Igualmente se han iniciado numerosos intercambios entre las diferentes disciplinas de la ciencias cognitivas. La técnica de los

potenciales evocados (PE) permite obtener índices sobre la cronometría mental de los procesos cognitivos. La presente revista literaria pretende sacar partido de la resolución temporal elevada de los PE para obtener una visión de la dinámica cronométrica de las diversas etapas involucradas. Tal enfoque es interesante porque permite especialmente confrontar los modelos producidos por la psicología y la inteligencia artificial con índices funcionales cerebrales.

Riassunto

CRONOMETRAGGIO MENTALE DEI PROCESSI COGNITIVI IMPLICATI NELLA LETTURA : APPORTI DEI POTENZIALI EVOCATI

Questi ultimi decenni hanno visto un numero esponenziale di studi che usano l'imaging funzionale come l'imaging a risonanza magnetica (IRM) o ancora la tomografia ad emissione di positroni (TEP). L'uso di queste tecniche ha permesso di identificare i substrati cerebrali di diverse funzioni cognitive. È anche l'origine di numerosi scambi tra le varie discipline delle scienze cognitive. La tecnica dei potenziali evocati (PE) permette di ottenere indici sul cronometraggio mentale dei processi cognitivi. Questa recensione di letteratura si propone di tirare parte della grande risoluzione temporale del PE per ottenere una descrizione della dinamica cronometrica delle diverse tappe implicate nella lettura. Tale approccio è interessante poiché permette in particolare di confrontare i modelli derivati dalla psicologia e dall'intelligenza artificiale con indici funzionali cerebrali.

Resumo

CRONOMETRIA MENTAL DOS PROCESSOS COGNITIVOS IMPLICADOS NA LEITURA: CONTRIBUIÇÃO DOS POTENCIAIS EVOCADOS

Essas últimas décadas presenciaram um número exponencial de estudos empregando a imagem funcional cerebral como a imagem por ressonância magnética (MRI) ou ainda a tomografia por emissão de pósitrons (PET). A utilização dessas técnicas permitiu identificar os substratos cerebrais de diferentes tarefas cognitivas. A técnica dos potenciais evocados (EP) permite, quanto a ela, índices sobre a cronometria mental dos processos cognitivos. Esta revisão da literatura se propõe a tirar partido da grande resolução temporal dos EP a fim de obter uma visão geral da dinâmica cronométrica das diferentes etapas implicadas na leitura. Uma tal abordagem é interessante pois permite sobretudo confrontar os modelos oriundos da psicologia e da inteligência artificial com os índices funcionais cerebrais.

1. Introduction

Les potentiels évoqués sont une technique électrophysiologique qui permet d'enregistrer de façon non invasive des différences de potentiels sur le scalp correspondant à l'activité corticale (voir Picton *et al.*, 2000, pour une synthèse méthodologique). Contrairement à des techniques telles que l'imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) ou la Tomographie par Émission de Positons (TEP), elle dispose d'une grande précision temporelle de l'ordre de la milliseconde qui permet de suivre de façon précise la chronométrie mentale des différents processus cognitifs. Cette appréciation s'effectue par l'étude des fluctuations de potentiels appelées composantes. Ces dernières se caractérisent par leur polarité négative ou positive, leur latence d'apparition (temps du pic d'amplitude maximale) et leur distribution topographique sur le scalp. Ainsi, la N170 représente

une composante négative dont l'amplitude est maximale 170 millisecondes après l'apparition du stimulus (figure 1).

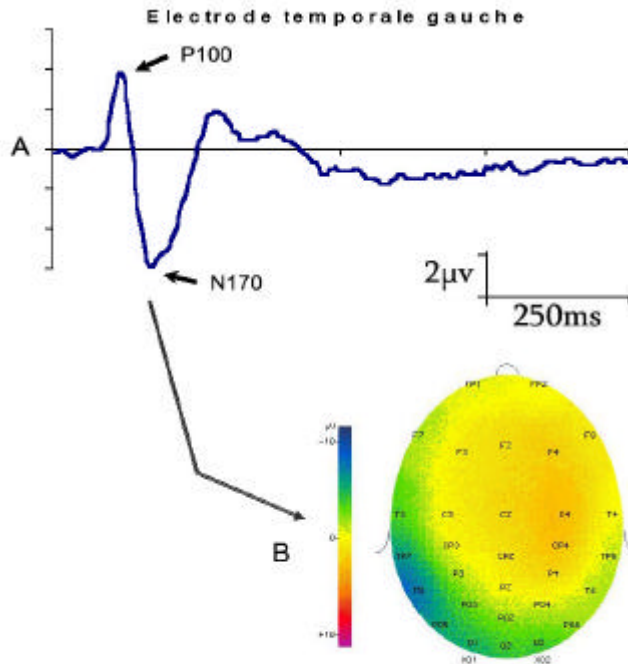


Figure 1 — Décours temporel et distribution topographique des potentiels évoqués.

Après moyennage des signaux EEG, il est possible de suivre le décours temporel de l'activité électrophysiologique du cerveau. Ainsi, pour un type de stimulus donné, on constate au niveau de chaque électrode des fluctuations de potentiels électriques appelées composantes. Le graphique A représente ces fluctuations au niveau d'une électrode temporale gauche suite à la présentation d'un mot. En ordonnées figure l'amplitude de l'activité exprimée en μV et en abscisse le décours temporel permettant de visualiser l'évolution de l'activité électrique cérébrale milliseconde par milliseconde. La figure B montre qu'il est également possible d'obtenir une vue d'ensemble de la projection de cette activité sur le scalp à un instant précis. Il s'agit ici d'une représentation topographique de la composante N170.

L'activité électrique enregistrée à un moment donné à la surface du scalp est en fait la résultante d'un ou plusieurs dipôles électromagnétiques. Retrouver les générateurs d'une composante est important afin de localiser les sources de courant et de pouvoir comparer les résultats des potentiels évoqués à ceux de l'IRMf et la TEP. Cependant, le signal électrique en passant par des milieux de conduction très hétérogènes (liquide céphalo-rachidien, os du crâne, peau) va subir une déformation

lors de sa projection sur le scalp. Ainsi, pour retrouver ces générateurs, il faut faire appel à des logiciels utilisant des algorithmes mathématiques complexes tenant compte de ces différents paramètres. L'utilisation de ces logiciels nécessite également d'avoir des *a priori* forts quant à la localisation probable ainsi qu'au nombre de sources « suspectées ».

Cette revue de littérature propose d'exploiter la grande résolution chronométrique des potentiels évoqués afin de mieux appréhender la dynamique des processus impliqués dans la lecture. Elle est également prétexte à une confrontation entre certaines modélisations théoriques et les données électrophysiologiques, c'est-à-dire dans une certaine mesure, à une réalité fonctionnelle du cerveau humain. En références aux modèles connexionnistes (par exemple, Seidenberg et McClelland 1989 ; Plaut *et al.*, 1996), la reconnaissance visuelle des mots fait appel à trois types de processus fondamentaux, à savoir le traitement orthographique, phonologique et sémantique. La première partie de cet article sera donc consacrée à l'étude de ces trois différents traitements lors de la lecture de mots isolés. Cependant, puisque dans la plupart des cas les mots ne sont pas lus isolément mais dans des phrases, une deuxième partie traitera des effets du contexte, tant sémantique que syntaxique. Enfin, l'ensemble des résultats rapportés sera synthétisé et un modèle tentant de rendre compte de la dynamique chronométrique des processus mis en jeu lors de la lecture sera proposé.

2. La lecture de mots isolés

2.1. Le traitement orthographique

Dans son acception la plus basique, le traitement orthographique peut être assimilé à la reconnaissance des différentes lettres constituant un mot. Le lien étroit existant entre le traitement visuel et orthographique rend cependant son étude particulièrement complexe.

L'acquisition de la lecture et de l'écriture étant une activité culturelle récente, elle ne procède pas d'une évolution biologique et n'est par conséquent pas le fruit d'une modification structurelle de notre cerveau. Cependant, cela n'exclut pas la possibilité de réorganisations fonctionnelles sous l'effet de l'apprentissage. Ainsi, certains travaux ont suggéré qu'il existerait au sein de notre cerveau une zone qui se serait spécialisée dans le traitement orthographique : il s'agit de l'aire visuelle des mots (*visual word form area*). Ce concept découle notamment de l'observation des patients atteints d'alexie pure (Déjerine, 1892 ; Warrington et Shallice, 1980), pathologie faisant suite à une lésion occipito-temporale gauche (Déjerine, 1892 ; Greenblatt, 1976 ; Damasio et Damasio, 1983 ; Henderson, 1986 ; Leff *et al.*, 2001). Ce trouble se manifeste par un déficit unimodal de la lecture des mots en l'absence d'atteinte de l'écriture et de la compréhension auditive. Il serait dû à une déconnexion entre les traitements visuels précoces et les traitements phonologiques et/ou sémantiques. Plus récemment, de nombreux travaux utilisant l'IRMf ont localisé cette aire visuelle des mots au niveau du gyrus fusiforme médian (BA 37/19) de l'hémisphère gauche (Cohen *et al.*, 2000 ; Cohen *et al.*, 2002 ; Dehaene *et al.*, 2002). Ces données sont toutefois très controversées. En effet, Price et Devlin (2003) dans leur article au titre évocateur « *The myth of the visual word form area* », présentent de nombreux arguments issus de l'observation de patients cérébrolésés et d'études réalisées en imagerie fonctionnelle cérébrale contre l'existence d'une telle aire. En

effet, aucune étude n'a encore pu montrer un trouble spécifique de la lecture après une atteinte sélective du gyrus fusiforme médian gauche. De plus, l'activation de cette structure n'est pas spécifique aux mots puisqu'elle est également constatée lors de la vision et la dénomination d'objets ainsi que la génération d'un verbe à partir d'une image (voir Price et Devlin, 2003 pour revue).

2.1.1. La N170

La N170 est une composante visuelle dont les générateurs seraient situés au niveau du cortex extrastrié mais qui aurait également des générateurs plus dorsaux (lobe pariétal) et frontaux (Swick et Knight, 1999 ; Marzi *et al.*, 2000). Elle est modulée par l'attention sélective, c'est-à-dire qu'elle est d'amplitude plus importante lorsque les mots apparaissent dans une localisation spatiale attendue (McCarthy et Nobre, 1993 ; Awh *et al.*, 2000). D'après Hillyard *et al.* (1998), l'attention spatiale agirait comme un mécanisme de contrôle de gain ou d'amplification qui va moduler l'importance de l'activité neuronale évoquée par le stimulus. D'après ces auteurs, ce mécanisme servirait à améliorer le rapport signal/bruit des *inputs* se trouvant dans des localisations attendues, de façon à pouvoir en extraire plus d'informations ou des informations plus pertinentes.

Cette composante visuelle a longtemps été considérée de « bas niveau » puisqu'elle ne serait modulée ni par le statut sémantique des stimuli (voir par exemple, Nobre et McCarthy, 1994) ni par le niveau d'abstraction des mots, les mots concrets et abstraits produisant les mêmes *patterns* (voir par exemple, West et Holcomb, 2000). Durant ces dernières années, de plus en plus d'indices se sont pourtant accumulés laissant à penser que la N170, malgré sa latence précoce, représente déjà un traitement crucial dans la reconnaissance visuelle des mots.

Certaines études suggèrent que la composante N170 serait sensible à la dimension orthographique des stimuli. Les travaux de Bentin *et al.* (1999) montrent que les stimuli constitués de lettres suscitent une N170 plus importante en temporal gauche qu'en temporal droit tandis que ce *pattern* est inversé dans le cas de stimuli non-orthographiques (par exemple, pour les caractères ASCII). Ce résultat suggère donc que le traitement orthographique pourrait prendre place à partir de 170 millisecondes après la présentation du stimulus et va dans le sens d'autres études réalisées en MEG. Par exemple, les travaux de Kuriki *et al.* (1998) indiquent qu'entre 150 et 250 ms (ce qui correspond donc à la fenêtre temporelle de la N170), il existe une spécificité du traitement des mots par rapport à des pseudo-lettres au niveau du gyrus lingual et du gyrus fusiforme gauche. Dans l'hémisphère droit, les activations constatées semblent moins spécifiques, c'est-à-dire présentes à la fois pour les mots et les pseudo-lettres. De même, l'étude de Tarkiainen *et al.* (1999) montre des activités supérieures dans les régions occipito-temporales inférieures de l'hémisphère gauche pour les stimuli constitués de lettres, et ce entre 150 et 200 ms (voir également Pylkkanen et Marantz, 2003).

Cependant les différences constatées entre les stimuli orthographiques et non-orthographiques pourraient également provenir d'une variable confondue qui est celle de la familiarité (Tagamets *et al.*, 2000). En effet, le traitement orthographique est souvent étudié en comparant les activités suscitées par des mots et des pseudo-lettres, or ces dernières ont un statut bien particulier puisqu'elles sont généralement rencontrées uniquement lors d'une expérience de psychologie et représentent de ce fait des stimuli très peu familiers. Actuellement de nombreuses recherches sont conduites afin d'étudier les effets de cette familiarité sur la N170 avec cependant des

résultats relativement contradictoires. La N170 étant une composante visuelle sensible aux caractéristiques physiques des stimuli, il est également possible que les différences obtenues entre les activités suscitées par les mots et les pseudo-lettres soient dues à des différences visuelles. En effet, l'étude MEG de Eulitz *et al.* (2000) montre que si la M180 (que nous pouvons assimiler à la N170 des potentiels évoqués) présente des activités supérieures lors de la vision de mots par rapport à des formes géométriques ou des pixels, il n'existe pas de différences entre des mots et des pseudo-lettres qui ont la même luminance et le même nombre moyen de pixels.

2.1.2. La N200

L'utilisation d'électrodes intracérébrales chez des sujets épileptiques a permis de mettre en évidence une composante N200 bilatérale au niveau du gyrus fusiforme postérieur qui serait spécifique à la présentation de lettres car absente pour des objets ou des visages (Nobre *et al.*, 1994 ; Allison *et al.*, 1999). Cette composante présente des caractéristiques identiques quel que soit le type de chaîne de lettres présenté, c'est-à-dire que sa latence et son amplitude restent inchangées lors de la présentation de mots ou de non-mots constitués de lettres. L'amorçage sémantique n'a aucun effet sur elle. La N200 n'est pas sensible à l'attention sélective et n'est pas affectée par l'adéquation ou non avec le contexte en cours d'une phrase (Nobre *et al.*, 1998). Les nombreuses études réalisées par cette équipe à l'aide d'électrodes intracérébrales les ont amenés à effectuer une cartographie des régions postérieures du cerveau humain présentant des réponses spécifiques aux lettres, aux objets et aux visages. Cette spécificité de traitement apparaît cependant critiquable aux yeux de Price, Gorno-Tempini *et al.* (2003) car Nobre *et al.* (1994) ont employé des tâches différentes pour les stimuli orthographiques et les objets, ce qui pourrait être à l'origine des réponses sélectives constatées au niveau du gyrus fusiforme.

2.1.4. Conclusion

Les études s'intéressant à l'étape d'encodage orthographique ont fourni une littérature relativement conflictuelle et la question d'une spécificité de traitement des mots suscite encore de très nombreux débats. Il apparaît cependant possible d'affirmer qu'une étape visuo-orthographique importante impliquant le gyrus fusiforme gauche est initiée vers 170-200 millisecondes. Cependant, les processus exacts présents dans cette étape cruciale pour une lecture efficace restent à déterminer.

2.2. Le traitement phonologique

Le traitement phonologique occupe une place très importante dans la lecture. En effet, de nombreuses études ont montré une grande corrélation entre les aptitudes méta-phonologiques et l'apprentissage de la lecture (Wagner et Torgesen, 1987 ; Share et Stanovich, 1995 ; Duncan *et al.*, 2000). À l'aide des potentiels évoqués, plusieurs composantes sensibles à la dimension phonologique des stimuli ont été mises en évidence.

2.2.1. La composante N450

La N450 a été l'une des premières « composantes phonologiques » rapportées dans la littérature (Rugg, 1984a, 1984b ; Rugg et Barrett, 1987). Lors d'une tâche de décision de rime, cette N450 pariétale présente une amplitude plus importante quand le dernier mot d'une paire ne rime pas avec le précédent.

Dans une tâche de décision sémantique cette fois (exemple : « Ces items sont-ils des fruits ? »), Bentin *et al.* (1999) ont obtenu une onde N450 de distribution fronto-temporo-pariétale. Cette dernière est bien modulée par les caractéristiques phonologiques des stimuli mais elle est également sensible à leur dimension lexico-sémantique puisqu'elle présente des amplitudes supérieures pour les pseudo-mots par rapport aux mots. Pour Bentin *et al.* (1999) la N450 correspondrait à une étape phonologique tardive post-lexicale.

2.2.2. Les composantes N320 et N350

Ces deux composantes ont des distributions topographiques proches. On peut supposer qu'elles peuvent représenter une seule et unique composante mais qui connaît des décalages de latence notamment en fonction de la tâche proposée aux sujets.

La N320 a été mise en évidence par Bentin *et al.* (1999) lors d'une tâche de décision de rime. Dans cette étude, elle apparaît uniquement lorsque les stimuli sont prononçables et ce, au niveau temporal médian. Bien que présente dans les deux hémisphères, la N320 présente une amplitude significativement plus importante en temporal gauche que dans l'hémisphère droit. Bentin *et al.* (1999) font également référence à une composante N350 lors d'une tâche de décision lexicale ayant les mêmes propriétés que la N320, avec cependant des activations plus diffuses qui incluent les régions temporo-pariétales.

2.2.3. Un ou plusieurs traitements phonologiques ?

La littérature des potentiels évoqués suggère l'existence de plusieurs composantes impliquées dans le traitement phonologique. La question d'une dissociation fonctionnelle entre la N320 et la N450 peut donc légitimement être posée. D'après Bentin *et al.* (1999), la N450 représenterait un processus post-lexical alors que la N320 correspondrait à un processus lexical ou pré-lexical de conversion graphème-phonème. Cette dernière affirmation repose cependant uniquement sur la topographie de la composante.

Depuis de nombreuses années, de multiples recherches ont été conduites dans le but de savoir si le traitement phonologique des stimuli orthographiques procède d'un processus unitaire ou s'il est possible de distinguer un traitement lexical et sub-lexical. La première position est défendue par les premiers modèles de type PDP (*Parallel Distributed Processing*) à l'image de Seidenberg et McClelland (1989) ainsi que Plaut *et al.* (1996). La deuxième émane de la théorie du codage dual (Coltheart *et al.*, 1977) dont le modèle *dual-route cascaded* (Coltheart *et al.*, 1993) est le représentant le plus influent. Dans ce dernier, la phonologie d'un mot peut être obtenue soit par adressage au sein d'un lexique, soit par une transcription graphème-phonème sérielle. Tandis que la première voie serait surtout impliquée dans le traitement des mots fréquents et irréguliers, la deuxième interviendrait surtout dans la lecture des mots peu familiers et des pseudo-mots (voir pour revue Coltheart *et al.*, 2001). S'il existe véritablement plusieurs types de traitements phonologiques, que représente alors la composante N320 ? En effet, celle-ci pourrait tout aussi bien représenter l'accès à un lexique phonologique qu'un processus de transcription graphème-phonème.

2.2.4. Conclusion

La composante N450 étant certainement post-lexicale, la N320 représente probablement l'étape de traitement communément appelée phonologique. Cependant, le traitement exact sous-tendu par la N320 n'est pas encore connu et elle pourrait tout aussi bien refléter l'accès à un lexique phonologique qu'une transcription graphème-phonème sub-lexicale. L'étude des différentes variables modulant le recours à la conversion graphème-phonème dans les modèles à double-voie ainsi que l'étude des effets de ces variables sur cette composante permettront probablement à l'avenir de connaître plus précisément les processus sous-tendus par la N320.

2.3. Traitement lexical et sémantique

Selon Coltheart *et al.* (2001), la notion de lexique mental est apparue pour la première fois en psycholinguistique dans la thèse de Treisman en 1961. Elle postule l'existence d'un « dictionnaire » dans lequel chaque entrée correspond à un mot. En remontant encore un peu plus loin dans le temps, on peut néanmoins déjà voir dans le terme *Wortschatz* (vocabulaire) de Wernicke (1874) un concept proche de celui de lexique. Cette notion suggère l'existence de représentations stockées en un endroit précis du cerveau. On parle alors de représentations locales, s'opposant aux représentations distribuées qui seraient le fruit d'un système non unitaire (donc disséminé) où le mot ne représente pas une unité de stockage pertinente. Dans ce dernier cas, c'est l'activation conjointe de plusieurs sous-unités graphémiques ou phonétiques qui vont « créer le mot ». De très nombreux travaux se sont intéressés au traitement lexical. Certains d'entre eux ont comparé les traitements induits par la lecture de mots à contenu sémantique à ceux de mots-fonctions afin de mieux comprendre l'organisation de notre lexique mental. Ce sont ces travaux que nous aborderons dans le cadre de cette synthèse.

2.3.1. Les composantes N280 et N350

Certaines études s'intéressant à l'accès lexical ont tenté de mettre en évidence des différences fonctionnelles dans le traitement des mots à contenu sémantique (les noms et les verbes) et celui des mots-fonctions (prépositions, conjonctions, ...). Cette dissociation au sein de l'organisation de notre lexique mental découle directement de l'étude des patients aphasiques qui peuvent présenter une atteinte sélective d'une ou de l'autre catégorie de mots. Ainsi, une lésion des régions antérieures de l'hémisphère gauche entraînerait surtout des troubles de la compréhension et de la production des mots-fonctions, tandis que des lésions postérieures perturberaient l'usage des mots à contenus (voir Osterhout *et al.*, 1997).

À l'aide des potentiels évoqués, Neville *et al.* (1992) ont mis en évidence une composante N280 observable dans les régions antérieures gauches qui serait spécifique aux mots-fonctions tandis que le traitement des mots à contenu sémantique serait associé à une composante N350 d'amplitude importante. Des résultats similaires furent également obtenus par Nobre et McCarthy (1994). Cette dissociation fonctionnelle électrophysiologique suggère donc que l'accès lexical serait initié dès 280 millisecondes et que tous les mots ne seraient pas traités de façon uniforme au sein de notre cerveau.

Cependant, ces données doivent être prises avec beaucoup de prudence car certaines études ont remis en cause l'existence d'une N280 spécifique aux mots-

fonctions. En effet certains travaux suggèrent que les deux catégories de mots suscitent une N280 mais la latence de cette dernière varie en fonction de la fréquence et la longueur des mots (King et Kutas, 1995 ; Osterhout *et al.*, 1997 ; Munte *et al.*, 2001 ; Osterhout *et al.*, 2002). Plus un mot est fréquent et court, plus la latence de cette négativité est précoce. Ainsi, ces études suggèrent que la N280 serait commune à la fois aux mots à contenu sémantique et aux mots-fonctions. Il n'existerait donc pas de traitements spécifiques pour chacune de ces deux catégories de mots au niveau de la N280 et les différences fonctionnelles constatées ne seraient pas d'origine linguistique mais viendraient plutôt de la fréquence et de la longueur des stimuli. La N280 représenterait cependant la trace la plus précoce d'un traitement lexical et pourrait refléter l'initialisation et l'orientation de la recherche en mémoire.

2.3.2. La N400

La littérature des potentiels évoqués suggère que les traitements phonologiques et sémantiques sont fortement imbriqués puisque la composante N450 serait modulée par ces deux types d'informations (Bentin *et al.*, 1999). Généralement le traitement sémantique est associé à la composante N400. Cependant, de nombreuses études utilisent pour l'analyser des fenêtres temporelles de taille très importante (en général de 250 à 500 ms post-stimulus) et il est donc probable que plusieurs composantes soient présentes à ces latences (Nobre et McCarthy, 1994). De ce fait, il est possible que la N450 (voir partie consacrée à la phonologie) corresponde à la composante communément appelée la N400.

La N400 est certainement la composante qui a été la plus étudiée. Si l'on se réfère à Kutas et Hillyard (1980, 1984, 1989) qui ont été les premiers à la mettre en évidence, son amplitude est plus prononcée quand le dernier mot d'une phrase est inattendu, c'est-à-dire hors du contexte servant de fil conducteur (par exemple, il beurre sa tartine avec son *vélo*), et d'une amplitude réduite voire quasi inexistante pour un mot « probable » (voir également Connolly *et al.*, 1995 ; Kutas et Federmeier, 2000 ; Federmeier *et al.*, 2001 ; Angrilli *et al.*, 2002). Cependant, la N400 ne serait pas spécifique à la lecture puisqu'elle peut être produite par n'importe quel stimulus ayant une représentation sémantique. Par exemple, des images qui terminent anormalement des phrases provoquent également l'apparition d'une N400 (Nigam *et al.*, 1992 ; Federmeier et Kutas, 2002).

De nombreuses études ont mis en évidence que cette composante est sensible à l'amorçage sémantique (Bentin *et al.*, 1985 ; Rugg, 1985 ; Nobre et McCarthy, 1994 ; Nobre et McCarthy, 1995) et à la répétition (Rugg, 1985 ; Rugg, 1990 ; Bentin et McCarthy, 1994 ; Kim *et al.*, 2001) qui, tous deux, font baisser son amplitude.

La N400 est également sensible à l'attention sélective (voir par exemple, McCarthy et Nobre, 1993). Ainsi, son amplitude est plus importante lorsque que le mot apparaît dans une localisation spatiale attendue. Ces résultats suggèrent que cette composante n'est pas si automatique et dépend aussi de l'attention sélective qui peut moduler le degré avec lequel un mot est traité. En effet, l'amplitude de la N400 est également fonction du niveau de traitement des stimuli induit par la tâche (voir par exemple, Chwilla *et al.*, 1995).

La question du traitement exact représenté par la N400 est toujours l'objet de nombreuses controverses. Un des grands débats actuels est de savoir si l'amorçage sémantique constaté pour cette composante s'effectue de façon automatique ou si, au contraire, il fait appel à des processus contrôlés qui sont stratégiquement

déterminés. Deacon *et al.* (2000), en utilisant un paradigme d'amorçage masqué où l'amorce n'est pas perçue consciemment car présentée pendant un temps extrêmement court, ont montré un effet d'amorçage suggérant ainsi un processus automatique. Cependant Brown et Hagoort (1993) en employant un paradigme similaire n'ont pas obtenu de tels effets d'amorçage sur la N400. De plus, la littérature a souvent associé la N400 à un traitement post-lexical (voir pour revue Silva-Pereyra *et al.*, 2003), ce qui irait également à l'encontre d'un traitement automatique. Le débat reste ouvert.

Le lobe temporal antérieur médian a souvent été proposé comme générateur de la N400, qu'il ait été mis en évidence à l'aide d'électrodes intracérébrales (Halgren, 1990 ; McCarthy *et al.*, 1995 ; Nobre et McCarthy, 1995) ou par extrapolation en tentant de résoudre le problème inverse (Johnson et Hamm, 2000 ; Silva-Pereyra *et al.*, 2003). D'autres travaux ont également mis en évidence l'implication de l'amygdale et de l'hippocampe (Heit *et al.*, 1990), de zones à proximité du sillon collatéral et du gyrus fusiforme antérieur (McCarthy *et al.*, 1995 ; Nobre et McCarthy, 1995), du cortex rhinal du pôle temporal (Halgren *et al.*, 1994a). Certaines études ont également obtenu des générateurs dans des sites hors du lobe temporal tels que le cortex préfrontal ventral postérieur (Halgren *et al.*, 1994b), le gyrus fusiforme postérieur (Guillem *et al.*, 1995) et des sites pariétaux postérieurs (Halgren *et al.*, 1994a).

Cette composante entretient également des liens étroits avec la phonologie puisque les non-mots ne suivant pas les règles orthographiques et phonétiques du langage ne génèrent pas de N400. Ainsi, seuls les non-mots de type pseudo-mots et pseudo-homophones (pseudo-mots ayant un homophone lexical) généreraient cette composante (Holcomb et Neville, 1990). Ce résultat peut être interprété de deux façons. La première interprétation serait que la mémoire sémantique est stockée sous forme phonologique, la deuxième que l'accès au sens est médiatisé par la phonologie. Certaines études réalisées sur des patients dyslexiques peuvent également aller dans le sens d'un rôle important de la phonologie pour cette composante. En effet, la N400 est retardée d'environ 100 ms et d'amplitude réduite chez des dyslexiques souffrant de troubles phonologiques (Helenius *et al.*, 1999).

Cette composante est également sensible au voisinage orthographique (Holcomb *et al.*, 2002), la N400 étant plus importante pour les mots ayant de nombreux voisins orthographiques. Elle serait également sensible au niveau d'abstraction des mots, les mots concrets suscitant une N400 d'amplitude plus importante que les mots abstraits (West et Holcomb, 2000 ; Munte *et al.*, 2001).

La N400 est donc modulée par de très nombreuses variables, à tel point qu'il devient parfois difficile de connaître précisément sa signification fonctionnelle dans la reconnaissance visuelle des mots. Ceci pourrait notamment provenir de sa latence relativement tardive. En effet, il est probable que les traitements précédant cette composante aient un impact sur la N400, notamment sur sa latence. Enfin, la grande hétérogénéité des résultats pourrait également s'expliquer par la présence dans la fenêtre temporelle de la N400 de plusieurs « sous-composantes » modulées par des variables différentes (voir Pyllkanen et Marantz, 2003).

2.3.3. Conclusion

La littérature des potentiels évoqués suggère que le traitement lexical serait initié dès la N280. Le temps nécessaire pour accéder à une représentation donnée au sein de notre lexique mental serait notamment fonction de sa fréquence et sa longueur. À la

suite de cet accès lexical, succéderait un traitement sémantique lors duquel le sens ainsi que les différentes propriétés fonctionnelles du stimulus seraient obtenus. La N400 refléterait ce traitement sémantique.

3. Lecture de mots en contexte

La lecture ne peut se résumer à la simple reconnaissance d'un mot isolé. En effet, lors de la lecture les mots sont toujours rencontrés dans des phrases qui offrent une aide contextuelle à la fois sémantique et grammaticale.

3.1. Contexte sémantique et N400

L'implication de la N400 dans le traitement sémantique a déjà été abordée dans la partie précédente. Lors de la présentation de phrases, la N400 du dernier mot est sensible au contexte sémantique de celles-ci (Kutas et Hillyard, 1980, 1984 ; Kutas et Federmeier, 2000 ; Federmeier *et al.*, 2001). Ainsi, son amplitude est plus prononcée quand le dernier mot d'une phrase est inattendu, hors du contexte servant de fil conducteur. Ce résultat suggère donc que le sujet a des attentes par rapport à ce dernier mot qui est probablement déjà pré-activé avant sa lecture. Ce processus très adapté permet une lecture plus rapide et économique sur le plan cognitif.

En présentant des phrases segmentées en champs visuels divisés, Federmeier et Kutas (1999) ont montré que si les deux hémisphères sont sensibles au contexte (N400 qui apparaît pour des mots peu probables), ils utilisent des traitements de types différents. Au sein de l'hémisphère droit il n'y a aucun effet de la catégorie sémantique, seul l'adéquation avec le contexte compte. Au contraire, au sein de l'hémisphère gauche le fait que le mot non pertinent avec le contexte en cours appartienne ou non à la catégorie sémantique du mot attendu va avoir une influence. Par exemple, « il beurre sa tartine avec son *vélo* » va susciter une N400 d'amplitude supérieure à la phrase « il beurre sa tartine avec sa *fourchette* » mais uniquement lorsque ces phrases sont présentées dans l'hémichamp droit (donc traitées principalement par l'hémisphère gauche).

3.2. Le contexte syntaxique

Si une incongruité de type sémantique dans une phrase génère une N400 d'amplitude accrue, une violation de type syntaxique telle que l'accord en nombre du sujet et du verbe produit une composante P600 pariétale (Osterhout et Holcomb, 1990 ; Angrilli *et al.*, 2002). Cependant le traitement représenté par la P600 est extrêmement discuté, notamment concernant sa spécificité au langage mais également sa spécificité syntaxique à l'intérieur du langage (Friederici *et al.*, 1996 ; Munte *et al.*, 1997). En effet, nous sommes en droit de nous demander s'il s'agit bien là d'une composante à part entière ou seulement d'une composante P300 qui est décalée par rapport à sa latence d'apparition habituelle. Or, la P300 est une composante non spécifique à la lecture.

Selon Frisch *et al.* (2002), la P600 serait sensible à l'ambiguïté syntaxique des phrases et représenterait un indice des processus de révision dans la compréhension de ces dernières. Cette composante ne serait pas la seule sensible à la dimension syntaxique des stimuli. En effet, certaines études ont montré l'existence d'une composante *Left Anterior Negativity* (LAN) qui apparaît dans la région frontale gauche à des latences plus précoces, c'est-à-dire entre 300 et 500 ms et ce, lors de

la violation de la structure morphosyntaxique d'une phrase (Friederici et Mecklinger, 1996 ; Neville *et al.*, 1991 ; Angrilli *et al.*, 2002). Le générateur de cette composante serait situé au niveau de l'aire de Broca comme le suggère l'étude TEP réalisée par Moro *et al.* (2001). Cette LAN est également l'objet de nombreuses controverses. En effet, l'étude de Kluender et Kutas (1993) suggère que cette composante peut être obtenue lors de la présentation de phrases qui sont syntaxiquement correctes mais qui font appel à une charge cognitive importante en mémoire de travail. Ainsi, la LAN pourrait représenter un indice de la charge mnésique plutôt qu'un processus syntaxique en tant que tel.

Enfin, d'autres études suggèrent également l'existence d'une composante *Early Left Anterior Negativity* (ELAN) qui interviendrait vers 160 ms (voir par exemple, Friederici *et al.*, 1996). Selon Gunter *et al.* (1999), la latence de cette composante serait fonction de la qualité de l'input visuel. Ainsi, plus le contraste est élevé, plus la latence de celle-ci est précoce. Normalement lorsque l'on présente un mot hors contexte, la latence de l'ELAN correspond approximativement à son encodage orthographique. Un effet syntaxique aussi précoce peut donc apparaître surprenant. Cependant, certains travaux portant sur la reconnaissance visuelle des visages suggèrent que la composante N170 est modulée par des processus *top-down* (voir par exemple, Bentin et Golland, 2002). Il est donc possible que la composante visuelle N170 orthographique puisse également être influencée par des traitements cognitifs. Ainsi de façon spéculative, la syntaxe (mais peut-être également le contexte sémantique) pourrait influencer le traitement sous-tendu par la N170.

3.3. Conclusion

Lors de la lecture de phrases, des aides contextuelles à la fois sémantiques et syntaxiques existent. Le contexte sémantique a un effet sur la composante N400. Concernant la syntaxe, celle-ci semble intervenir lors de deux étapes distinctes. Une première (LAN) prendrait place entre 300 et 500 ms et pourrait intervenir dans le traitement des structures morpho-syntaxiques tandis que la composante P600 représenterait des processus de révision et de correction dans la compréhension de la phrase.

Le traitement syntaxique est l'objet de très nombreuses discussions. L'étude des différences interlangues pourrait à l'avenir nous faire progresser dans la compréhension des mécanismes en jeu. En effet, il existe des langues qui présentent des structures syntaxiques beaucoup plus complexes que d'autres. Par exemple dans la langue chinoise, la syntaxe et le sens ne seraient pas toujours dissociables. Or, les recherches de Kang-Kwong *et al.* (2002) menées à l'aide de l'IRMf montrent que si les zones cérébrales activées lors d'un traitement sémantique ou syntaxique sont bien distinctes chez des sujets anglais, cela n'est pas le cas pour des sujets chinois.

4. Synthèse et perspectives

Cette revue non exhaustive donne un aperçu de la chronométrie mentale des différents traitements mis en jeu lors de la lecture. Elle rapporte également d'importants débats inhérents à la littérature des potentiels évoqués et la psycholinguistique. L'ensemble de ces données peut être synthétisé sous la forme d'un modèle comprenant huit étapes principales (figure 2). Notons que cette modélisation doit être envisagée comme un support à la réflexion et non pas comme

un modèle fini. De plus, il convient de ne pas perdre de vue que les caractéristiques des mots ainsi que la tâche proposée aux sujets ont une influence sur la latence de certaines composantes.

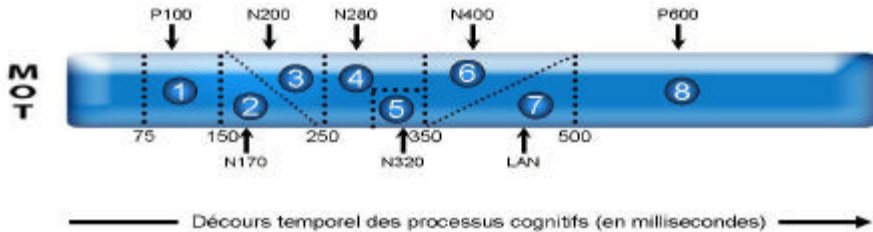


Figure 2 — Modélisation de la chronométrie des processus mentaux impliqués dans la lecture.

La première étape correspond à la composante P1 également appelée P100. Cette composante occipitale est sensible aux caractéristiques physiques des stimuli et à l'attention sélective (Hillyard *et al.*, 1998 ; Johannes *et al.*, 1995 ; Luck *et al.*, 2000 ; Martinez *et al.*, 2001). Elle représente le traitement visuel cortical, la perception d'un *pattern* visuel.

Après le traitement purement visuel, la N170 représente probablement le fonctionnement d'assemblées de neurones au sein des régions postérieures de l'hémisphère gauche dont le rôle est d'extraire des unités significatives d'un *pattern* visuel. Dans le cas de la lecture, ces unités correspondent aux lettres.

La troisième étape correspond à l'activité de la N200 (Nobre *et al.*, 1994) ainsi que l'activation de l'aire visuelle des mots qui interviendrait à des latences similaires (Cohen *et al.*, 2000). Nous avons évoqué les nombreuses controverses quant à l'interprétation fonctionnelle de la N200 et de l'activité de l'aire visuelle des mots. Il est probable que l'activation conjointe de ces régions du gyrus fusiforme représente une étape pré-lexicale qui s'effectuerait sur une base orthographique.

À partir de 250 millisecondes, il semble qu'une recherche lexicale soit initiée. L'activité de la N280 semble refléter ce processus, et sa latence varie en fonction de l'accessibilité de la représentation au sein du lexique. Cette accessibilité dépend notamment de la fréquence du mot.

La composante N320 représente la cinquième étape. Elle peut vraisemblablement être associée à un traitement de type phonologique. Cette composante a cependant un statut particulier puisque nous ne savons pas encore si elle représente l'accès à un lexique phonologique ou bien une transcription graphème-phonème sérielle. Si cette dernière hypothèse s'avère exacte, alors cette composante ne devrait pas être observée de façon systématique puisque selon Coltheart *et al.* (2001), l'engagement de la conversion graphème-phonème dépendrait de la fréquence et de la spécificité

de la langue considérée. Ainsi ce type de processus serait absent pour les mots très familiers et serait très peu utilisé lorsque la langue a une orthographe très opaque.

Lorsque l'accès lexical initié lors de la quatrième étape a abouti, le lecteur accède au sens du stimulus. La N400 serait le reflet de ce traitement sémantique. Cette étape serait également sensible à la dimension phonologique des stimuli (cf. N450). Lors de la présentation de mots en contexte, c'est-à-dire dans des phrases, un traitement syntaxique (la LAN) prendrait place à des latences proches de celles de la N400.

Il est possible que ces aides contextuelles à la fois sémantiques et syntaxiques puissent par des traitements descendants (*top-down*) influencer le traitement orthographique, ce qui faciliterait l'identification des mots suivants et permettrait une lecture plus rapide. La présence de tels processus reste cependant à démontrer.

Enfin la dernière étape correspondrait au maintien en mémoire de la représentation activée, ainsi que des probables processus de révision comme l'ont suggéré certains auteurs pour la P600.

Références bibliographiques

Allison T., Puce A., Spencer D. D., McCarthy G. (1999). Electrophysiological studies of Human Face Perception. I: Potentials generated in occipitotemporal cortex by face and non-face stimuli. *Cerebral cortex*. 9(5), 415-430.

Angrilli A., Penolazzi B., Vespignani F., De Vincenzi M., Job R., Ciccarelli L., Palomba D., Stegagno L. (2002). Cortical brain responses to semantic incongruity and syntactic violation in Italian language: An event-related potential study. *Neuroscience letters*. 322(1), 5-8.

Awh E., Anllo-Vento L., Hillyard, S. A. (2000). The role of spatial selective attention in working memory for locations: Evidence from event-related potentials. *Journal of cognitive neuroscience*. 12(5), 840-847.

Bentin S., Golland Y. (2002). Meaningful processing of meaningless stimuli: The influence of perceptual experience on early visual processing of faces. *Cognition*. 86(1), B1-14.

Bentin S., McCarthy G. (1994). The effects of immediate stimulus repetition on reaction time and event-related potentials in tasks of different complexity. *Journal of experimental psychology: learning, memory and cognition*. 20(1), 130-149.

Bentin S., McCarthy G., Wood C. C. (1985). Event-related potentials, lexical decision, and semantic priming. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 60, 343-355.

Bentin S., Mouchetant-Rostaing Y., Giard M. H., Echallier J. F., Pernier J. (1999). ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: Time course and scalp distribution. *Journal of cognitive neuroscience*. 11(3), 235-260.

Brown C., Hagoort P. (1993). The processing nature of the N400: Evidence from masked priming. *Journal of cognitive neuroscience*. 5(1), 34-44.

Chwilla D. J., Brown C. M., Hagoort P. (1995). The N400 as a function of the level of processing. *Psychophysiology*. 32(3), 274-285.

Cohen L., Dehaene S., Naccache L., Lehericy S., Dehaene-Lambertz G., Henaff M. A., Michel F. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*. 123(2), 291-307.

Cohen L., Lehericy S., Chochon F., Lemer C., Rivaud S., Dehaene S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*. 125(5), 1054-1069.

- Coltheart M., Curtis B., Atkins P., Haller M. (1993). Models of reading aloud: Dual-route and parallel distributed processing approaches. *Psychological review*. 100, 589-608.
- Coltheart M., Davelaar E., Jonasson J. T., Besner D. (1977). Access to the internal lexicon. In Dornic S. (ed.), *Attention and performance*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates. Vol. VI, 535-555.
- Coltheart M., Rastle K., Perry C., Langdon R., Ziegler J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological review*. 108, 204-256.
- Connolly J. F., Phillips N. A., Forbes K. A. (1995). The effects of phonological and semantic features of sentence-ending words on visual event-related brain potentials. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 94(4), 276-287.
- Damasio A. R., Damasio, H. (1983). The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*. 33(12), 1573-1583.
- Deacon D., Hewitt S., Yang C., Nagata M. (2000). Event-related potential indices of semantic priming using masked and unmasked words: Evidence that the N400 does not reflect a post-lexical process. *Brain research cognitive brain research*. 9(2), 137-146.
- Dehaene S., Le Clec'h G., Poline J. B., Le Bihan D., Cohen L. (2002). The visual word form area: A prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport*. 13(3), 321-325.
- Déjerine J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité-verbale. *Mémoires société biologique*. 4, 61-90.
- Duncan L. G., Seymour P. H. K., Hill S. (2000). A small-to-large unit progression in metaphonological awareness and reading? *The quarterly journal of experimental psychology*. 53(4), 1081-1104.
- Eulitz C., Eulitz H., Maess B., Cohen R., Pantev C., Elbert T. (2000). Magnetic brain activity evoked and induced by visually presented words and nonverbal stimuli. *Psychophysiology*. 37(4), 447-455.
- Federmeier K. D., Kirson D. A., Moreno E. M., Kutas M. (2001). Effects of transient, mild mood states on semantic memory organization and use: an event-related potential investigation in humans. *Neurosciences letters*. 305, 149-152.
- Federmeier K. D., Kutas M. (1999). Right words and left words: electrophysiological evidence for hemispheric differences in meaning processing. *Brain research: Cognitive brain research*. 8(3), 373-392.
- Federmeier K. D., Kutas M. (2002). Picture the difference: electrophysiological investigations of picture processing in the two cerebral hemispheres. *Neuropsychologia*. 40(7), 730-747.
- Friederici A. D., Hahne A., Mecklinger A. (1996). Temporal structure of syntactic parsing: early and late event-related brain potential effects. *Journal of experimental psychology: Learning memory and cognition*. 22(5), 1219-1248.
- Friederici A. D., Mecklinger A. (1996). Syntactic parsing as revealed by brain responses: First-pass and second-pass parsing processes. *Journal of psycholinguistic research*. 25, 157-176.
- Frisch S., Schlesewsky M., Saddy D., Alpermann A. (2002). The P600 as an indicator of syntactic ambiguity. *Cognition*. 85(3), B83.
- Greenblatt S. H. (1976). Subangular alexia without agraphia or hemianopsia. *Brain and language*. 3(2), 229-245.
- Guillem F., N'Kaoua B., Rougier A., Claverie B. (1995). Intracranial topography of event-related potentials (N400/P600) elicited during continuous recognition memory task. *Psychophysiology*. 32, 382-392.

- Gunter T. C., Friederici A. D., Hahne A. (1999). Brain responses during sentence reading: visual input affects central processes. *Neuroreport*. 10(15), 3175-3178.
- Halgren E. (1990). Insights from evoked potentials into the neuropsychological mechanisms of reading. In Scheibel A., Wechsler A. (eds.), *Neurobiology of higher cognitive function*. New-York: Guilford. 103-150)
- Halgren E., Baudena P., Heit G., Clarke J. M., Marinkovic K. (1994a). Spatio-temporal stages in face and word processing. 1. Depth-recorded potentials in the human occipital, temporal and parietal lobes. *Journal of physiology. Paris*. 88, 1-50.
- Halgren E., Baudena P., Heit G., Clarke J. M., Marinkovic K. (1994b). Spatio-temporal stages in face and word processing. 2. Depth-recorded potentials in the human frontal and Rolandic cortices. *Journal of physiology. Paris*. 88, 50-80.
- Heit G., Smith M. E., Halgren E. (1990). Neuronal activity in the human medial temporal lobe during recognition memory. *Brain*. 113, 1093-1112.
- Helenius P., Salmelin R., Service E., Connolly J. F. (1999). Semantic cortical activation in dyslexic readers. *Journal of cognitive neuroscience*. 11(5), 535-550.
- Henderson V. W. (1986). Anatomy of posterior pathways in reading: a reassessment. *Brain and language*. 29(1), 119-133.
- Hillyard S. A., Teder-Salejarvi W. A., Munte T. F. (1998). Temporal dynamics of early perceptual processing. *Current opinion in neurobiology*. 8(2), 202-210.
- Holcomb P. J., Grainger J., O'Rourke T. (2002). An electrophysiological study of the effects of orthographic neighborhood size on printed word perception. *Journal of cognitive neuroscience*. 14(6), 938-950.
- Holcomb P. J., Neville H. (1990). Auditory and visual semantic priming in lexical decision: A comparison using event-related brain potentials. *Language and cognitive processes*. 5, 532-554.
- Johannes S., Munte T. F., Heinze H. J., Mangun G. R. (1995). Luminance and spatial attention effects on early visual processing. *Brain research: cognitive brain research*. 2(3), 189-205.
- Johnson B. W., Hamm J. P. (2000). High-density mapping in an N400 paradigm: Evidence for bilateral temporal lobe generators. *Clinical neurophysiology*. 111(3), 532-545.
- Kang-Kwong L., Ho-Ling L., Yo-Yo W., Yung-Liang W., Li Hai T. (2002). Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Human brain mapping*. 16(3), 133-145.
- Kim M., Kim J., Kwon J. S. (2001). The effect of immediate and delayed word repetition on event-related potential in a continuous recognition task. *Brain research: Cognitive brain research*. 11(3), 387-396.
- King J. W., Kutas M. (1995). A brain potential whose latency indexes the length and frequency of words. *CRL Newsletter*. 10(2), 1-9.
- Kluender R., Kutas M. (1993). Bridging the gap: Evidence from ERPs on the processing of unbounded dependencies. *Journal of cognitive neuroscience*. 5, 196-214.
- Kuriki S., Takeuchi F., Hirata Y. (1998). Neural processing of words in the human extrastriate visual cortex. *Brain Research: Cognitive brain research*. 6(3), 193-203.
- Kutas M., Federmeier K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in cognitive science*. 4(12), 463-470.
- Kutas M., Hillyard S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*. 207, 203-205.
- Kutas M., Hillyard S. A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature*. 307, 161-163.

- Kutas M., Hillyard S. A. (1989). An electrophysiological probe of incidental semantic association. *Journal of cognitive neuroscience*. 1, 38-49.
- Leff A. P., Crewes H., Plant G. T., Scott S. K., Kennard C., Wise R. J. (2001). The functional anatomy of single-word reading in patients with hemianopic and pure alexia. *Brain*. 124(3), 510-521.
- Luck S. J., Woodman G. F., Vogel E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in cognitive science*. 4(11), 432-440.
- Martinez A., DiRusso F., Anllo-Vento L., Sereno M. I., Buxton R. B., Hillyard, S. A. (2001). Putting spatial attention on the map: Timing and localization of stimulus selection processes in striate and extrastriate visual areas. *Vision research*. 41(10-11), 1437-1457.
- Marzi C. A., Girelli M., Miniussi C., Smania N., Maravita A. (2000). Electrophysiological correlates of conscious vision: evidence from unilateral extinction. *Journal of cognitive neuroscience*. 12(5), 869-877.
- McCarthy G., Nobre A. C. (1993). Modulation of semantic processing by spatial selective attention. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 88, 210-219.
- McCarthy G., Nobre A. C., Bentin S., Spencer D. D. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: Intracranial distribution and neural generators. *Journal of neuroscience*. 15(2), 1080-1089.
- Moro A., Tettamanti M., Perani D., Donati C., Cappa S. F., Fazio F. (2001). Syntax and the brain: Disentangling grammar by selective anomalies. *Neuroimage*. 13, 110-118.
- Munte T. F., Szentkuti A., Wieringa B. M., Matzke M., Johannes S. (1997). Human brain potentials to reading syntactic errors in sentences of different complexity. *Neuroscience letters*. 235(3), 105-108.
- Munte T. F., Wieringa B. M., Weyerts H., Szentkuti A., Matzke M., Johannes S. (2001). Differences in brain potentials to open and closed class words: class and frequency effects. *Neuropsychologia*. 39(1), 91-102.
- Neville H. J., Mills D., Lawson D. (1992). Fractionating language: Different neural subsystems with different sensitive periods. *Cerebral cortex*. 2, 244-258.
- Neville H. J., Nicol J., Brass A., Forster K. I., Garrett M. F. (1991). Syntactically based processing classes: Evidence from event-related potentials. *Journal of cognitive neuroscience*. 3, 151-165.
- Nigam, A., Hoffmann J. E., Simons R. F. (1992). N400 to semantically anomalous pictures and words. *Journal of cognitive neuroscience*. 4(1), 15-22.
- Nobre A., Allison T., McCarthy G. (1994). Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature*. 372, 260-263.
- Nobre A. C., Allison T., McCarthy G. (1998). Modulation of human extrastriate visual processing by selective attention to colours and words. *Brain*. 121, 1357-1368.
- Nobre A. C., McCarthy G. (1994). Language-related ERPs: Scalp distributions and modulation by word type and semantic priming. *Journal of cognitive neuroscience*. 6(3), 233-255.
- Nobre A. C., McCarthy G. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: II. Effects of word type and semantic priming. *Journal of neuroscience*. 15(2), 1090-1098.
- Osterhout L., Allen M., McLaughlin J. (2002). Words in the brain: Lexical determinants of word-induced brain activity. *Journal of the neurolinguistics*. 15, 171-187.
- Osterhout L., Bersick M., McKinnon R. (1997). Brain potentials elicited by words: Word length and frequency predict the latency of an early negativity. *Biological psychology*. 46(2), 143-168.

- Osterhout L., Holcomb P. J. (1990). Event-related potentials elicited by grammatical anomalies. In Brunia C. H. M., Gaillard A. W. K, Kok A. (eds.), *Psychological brain research*. Tilburg: Tilburg University Press.
- Picton T. W., Bentin S., Berg P., Donchin E., Hillyard S. A., Johnson R., Miller G. A., Ritter W., Ruchkin D. S., Rugg M. D., Taylor M. J. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*. 37,127-152.
- Plaut D. C., McClelland J. L., Seidenberg M. S., Patterson K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological review*. 103(1), 56-115.
- Price C. J., Devlin J. T. (2003). The myth of the visual word form area. *Neuroimage*. 19(3), 473-481.
- Price C. J., Gorno-Tempini M. L., Graham K. S., Biggio N., Mechelli A., Patterson K., Noppeney U. (2003). Normal and pathological reading: Converging data from lesion and imaging studies. *Neuroimage*. 20, suppl. 1, 30-41.
- Pylkkanen L., Marantz A. (2003). Tracking the time course of word recognition with MEG. *Trends in cognitive science*. 7(5), 187-189.
- Rugg M. D. (1984a). Event-related potentials and the phonological processing of words and non-words. *Neuropsychologia*. 22(4), 435-443.
- Rugg M. D. (1984b). Event-related potentials in phonological matching tasks. *Brain and language*. 23(2), 225-240.
- Rugg M. D. (1985). The effects of semantic priming and word repetition on event-related potentials. *Psychophysiology*. 22, 642-647.
- Rugg M. D. (1990). Event-related brain potentials dissociate repetition effects of high- and low-frequency words. *Memory and cognition*. 18(4), 367-379.
- Rugg M. D., Barrett S. E. (1987). Event-related potentials and the interaction between orthographic and phonological information in a rhyme-judgment task. *Brain and language*. 32(2), 336-361.
- Seidenberg M. S., McClelland J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological review*. 96(4), 523-568.
- Share D. L., Stanovich K. E. (1995). Cognitive processes in early reading development: accommodating individual differences into a model of acquisition. *Issues in education*. 1, 1-57.
- Silva-Pereyra J., Rivera-Gaxiola M., Aubert E., Bosch J., Galan L., Salazar A. (2003). N400 during lexical decision tasks: A current source localization study. *Clinical neurophysiology*. 114(12), 2469-2486.
- Swick D., Knight R. T. (1999). Contributions of prefrontal cortex to recognition memory: electrophysiological and behavioral evidence. *Neuropsychology*. 13(2), 155-170.
- Tagamets M. A., Novick J. M., Chalmers M. L., Friedman R. B. (2000). A parametric approach to orthographic processing in the brain: An fMRI study. *Journal of cognitive neuroscience*. 12, 281-297.
- Tarkiainen A., Helenius P., Hansen P. C., Cornelissen P. L., Salmelin R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*. 122(11), 2119-2132.
- Wagner R. K., Torgesen J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills. *Psychological bulletin*. 101, 192-212.
- Warrington E. K., Shallice T. (1980). Word-form dyslexia. *Brain*. 103, 99-112.
- Wernicke C. (1874). *Der aphasische symptomkomplex*. Breslau: Cohn and Weigart.

West W. C., Holcomb P. J. (2000). Imaginal, semantic, and surface-level processing of concrete and abstract words: An electrophysiological investigation. *Journal of cognitive neuroscience*. 12(6), 1024-1037.

L'auteur



Grégory Simon achève actuellement son doctorat de psychologie au sein du laboratoire PSY.CO et enseigne également à l'université de Rouen en temps qu'ATER. Ses recherches portent sur l'encodage orthographique ainsi que le traitement phonologique des mots et il utilise dans ce cadre la technique des potentiels évoqués. Il est le créateur du portail internet www.sciences-cognitives.net dédié à la psychologie et aux sciences cognitives. Il fait également partie du comité rédactionnel de la revue Arob@se.

