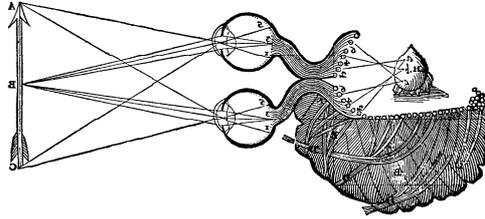


UNIVERSITÉ DE PROVENCE, AIX-MARSEILLE I  
U.F.R. des Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Environnement



THESE

Pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PROVENCE

Discipline : NEUROSCIENCES

*présentée et soutenue publiquement par*

Arnaud REY

Le 18 décembre 1998

Titre :

**ORTHOGRAPHE ET PHONOLOGIE  
DANS LA PERCEPTION DES MOTS ÉCRITS**

JURY

Dr. L. FERRAND, Chargé de Recherche, CNRS, Paris  
Dr. J. GRAINGER, Directeur de Recherche, CNRS, Aix-en-Provence  
Pr. A. JACOBS, Professeur d'Université, Marburg-Allemagne  
Pr. P. LEMAIRE, Professeur d'Université, Aix-en-Provence  
Dr. J. SEGUI, Directeur de Recherche, CNRS, Paris  
Pr. B. SOUMIREU-MOURAT, Professeur d'Université, Marseille

**RESUME :**

Dans les systèmes d'écriture alphabétiques, lire un mot implique d'identifier une suite de symboles visuels (des lettres) et de transcoder cette information visuo-orthographique en information phonologique afin de retrouver le sens de ce mot. L'objet de ce travail de thèse est de déterminer par quels processus un lecteur adulte réalise ce transcodage ortho-phonologique.

Dans une série d'expériences comportementales réalisées en Anglais et en Français, nous montrons que la structure phonologique des mots influence leur temps d'identification visuelle. Plus particulièrement, nous mettons en évidence le rôle crucial joué par certaines unités orthographiques, les graphèmes, dans la perception des mots écrits. Ces unités se situent à l'interface entre codes orthographiques et codes phonologiques, et établissent des ponts fonctionnels entre ces deux codes, constituant ainsi les éléments de base du système de lecture.

A la suite de ces résultats, nous présentons un modèle computationnel de la perception des mots écrits basé sur la notion d'*unités orthographiques fonctionnelles*. Avec ce modèle, nous faisons l'hypothèse que le système de lecture d'un adulte est constitué de différents niveaux d'unités orthographiques. Ces différents niveaux d'unités seraient mis en place au cours de l'acquisition de la lecture, facilitant ainsi le traitement global et parallèle des mots.

Afin d'évaluer les prédictions quantitatives de ce modèle et de les comparer aux prédictions d'autres modèles computationnels de la perception des mots écrits, nous rapportons une étude réalisée en Anglais où les temps d'identification de 120 mots sont mesurés pour un total de 140 sujets. Avec cette expérience, nous testons les prédictions des différents modèles computationnels existant en plaçant notre analyse au niveau des mots pris individuellement.

Enfin, dans une dernière série d'expériences réalisées en Allemand, nous montrons que la structure syllabique des mots influence également leur temps d'identification. Ces données expérimentales suggèrent ainsi que la syllabe pourrait également avoir le statut d'unité orthographique fonctionnelle au sein du système de lecture.

L'ensemble de ces expériences indiquent que les propriétés phonologiques des mots conditionnent la structure et la dynamique de leur perception visuelle et que la phonologie impose une certaine organisation fonctionnelle au traitement des informations orthographiques.

---

**MOTS CLEFS :** Lecture, perception, vision, orthographe, phonologie, unités fonctionnelles.

---

**ABSTRACT :**

In alphabetic writing systems, reading a word implies to identify a sequence of visual symbols (letters) and to transcode this visuo-orthographic information into a phonological information in order to retrieve the meaning of the word. The aim of the present work is to specify the processes by which adult readers do perform this visuo-orthographic transcoding.

We show, in behavioral experiments done in English and French, that identification times of visually presented words are affected by the phonological structure of these words. More specifically, our results suggest that graphemes play a crucial role in visual word recognition. We claim that these units can be considered as "minimal functional bridges" between orthographic and phonological codes, and constitute the elementary building blocks of the reading system.

Following these empirical results, a computational model of visual word perception based on the notion of functional orthographic units is presented. In this model, we assume that the reading system is composed of different levels of orthographic units. These reading units would emerge during reading acquisition, facilitating the global and parallel processing of words.

In order to test the quantitative predictions of this model together with the predictions of competing models of visual word recognition, we present a study done in English, in which we recorded identification times of 140 subjects for 120 words. This experiment was designed to focus the evaluation of model predictions at the level of items. The strength and limits of such approach are discussed in comparison to similar recent studies.

Finally, we show, in experiments done in German, that word identification times are affected by the syllabic structure of the word. These experimental data suggest that syllables may also have the status of functional orthographic units in the reading system.

Together, these experiments indicate that the structure and the dynamic of visual word recognition processes are constrained by the phonological properties of words, and that phonology imposes its functional organization on the processing of orthographic information.

---

**KEYWORDS :** Reading, perception, vision, orthography, phonology, functional units.

---

---

**DISCIPLINE :** NEUROSCIENCES

---

---

**LABORATOIRE :** CENTRE DE RECHERCHE EN NEURSOCIENCES COGNITIVES - CNRS - MARSEILLE

---

## Remerciements

à **Arthur Jacobs**, pour m'avoir donné à la fois le goût et les moyens d'être un acteur de la vie scientifique. Ce fût une grande chance pour moi, cher Arthur, de te rencontrer et de réaliser ce travail sous ta direction.

aux membres du jury, le Dr. **Ludovic Ferrand**, le Dr. **Juan Segui**, et le Pr. **Soumireu-Mourat**, pour leur évaluation de ce mémoire.

à **Jonathan Grainger**, pour son parrainage scientifique, son soutien et son aide amicale tout au long de cette thèse.

à **Patrick Lemaire**, pour son amitié et son enthousiasme scientifique toujours renouvelés.

à **Johannes Ziegler**, pour notre collaboration stimulante et amicale tout au long de cette thèse.

à **Valérie Aghababian**, **Marie Montant** et **Tatjana Nazir** pour avoir partagé et enrichi la vie quotidienne et scientifique de notre groupe de recherche.

à **Catherine Thinus-Blanc**, pour la qualité de son accueil au sein de son laboratoire.

à mes amis et collègues du CRNC. Un grand merci tout particulièrement à **Geneviève Blanchet**, **Frédérique Liégeois**, **Guillaume Masson**, **Daniel Mestre**, **Luce Moerman**, **Alexa Riehle**, **Gregor Schöner**.

à **Françoise Joubaud** pour sa lecture attentive de ce mémoire et son accueil amical au quotidien.

au surprenant **Hendrik Sturm**, à **Paolo Dominicci** et à **Katrin Suder**, pour leur amitié.

à mes amis et collègues d'outre-Rhin, **Kerstin Elerman**, **Ralf Graf**, **Dorothee Klueppel**, **HansChristoph Nuerk**, **Florian Schmidt-Weigand**, **Kai Richter**, pour leur contribution à différents niveaux dans ce travail.

à mes amis danseurs et danseuses pour les solutions qu'ils m'ont permis de trouver, au détour d'une milonga...

Cette thèse a été réalisée grâce au soutien financier du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, dans le cadre du programme "Sciences Cognitives", Allocation de Recherche n° 95124.

*Ce travail clôt un cycle de formation universitaire.  
Il n'aurait pas vu le jour sans*

*la confiance et le soutien de mes parents,  
la patience, la "pas-science", et l'amour de Hélène et de nos enfants, Maël et Léa.*

*Je le leur dédie donc ce travail.*

## TABLE DES MATIERES

<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
1.1. LANGAGES, ÉCRITURES ET LECTURES.....	8
1.2. PSYCHO- ET NEURO- LINGUISTIQUE DE LA LECTURE.....	10
1.3. PERCEPTION DES MOTS ÉCRITS ET PHONOLOGIE.....	11
<b>CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIES.....</b>	<b>15</b>
2.1. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX.....	18
2.1.1. <i>Tâche de décision lexicale</i> .....	18
2.1.2. <i>Tâche de prononciation</i> .....	21
2.1.3. <i>Tâches d'identification perceptive</i> .....	22
2.1.4. <i>La tâche de catégorisation sémantique</i> .....	25
2.1.5. <i>Les protocoles d'amorçage</i> .....	27
2.2. TÂCHE LIP.....	28
2.2.1. <i>Expérience 1 : Effet de Fréquence dans la tâche de LIP</i> .....	31
2.3. DISCUSSION.....	38
<b>CHAPITRE 3 : ORTHOGRAPHE ET PHONOLOGIE.....</b>	<b>40</b>
3.1. VARIABLES VISUO-ORTHOGRAPHIQUES.....	42
3.1.1. <i>La confusabilité des lettres</i> .....	42
3.1.2. <i>La visibilité des lettres</i> .....	45
3.1.3. <i>Le nombre de lettres</i> .....	47
3.1.4. <i>La fréquence d'occurrence</i> .....	48
3.1.5. <i>Les voisins orthographiques</i> .....	51
3.1.6. <i>Résumé</i> .....	52
3.2. VARIABLES PHONOLOGIQUES.....	53
3.2.1. <i>Homophonie</i> .....	55
3.2.2. <i>Régularité - consistance</i> .....	58
3.2.3. <i>La structure phonologique</i> .....	61
3.2.3.1. <i>Syllabes</i> .....	62
3.2.3.2. <i>Unités sous-syllabiques</i> .....	65
3.3. DISCUSSION.....	67
<b>CHAPITRE 4 : MODÈLES DE LA PERCEPTION VISUELLE DES MOTS.....</b>	<b>70</b>
4.0. DEUX PROBLÈMES POUR LA MODÉLISATION DES RAPPORTS ENTRE ORTHOGRAPHE ET PHONOLOGIE.....	73
4.1. MCCLELLAND ET RUMELHART, 1981.....	76
4.2. GRAINGER ET JACOBS, 1994, 1996 ; JACOBS ET GRAINGER, 1992.....	78
4.3. SEIDENBERG ET MCCLELLAND, 1989.....	80
4.4. COLTHEART ET AL., 1993.....	83
4.5. NORRIS, 1994.....	85
4.6. PLAUT ET AL., 1996.....	86
4.7. ZORZI ET AL., 1998.....	87
4.8. DISCUSSION.....	88
4.8.1. <i>Les modèles computationnels</i> .....	89
4.8.1.1. <i>Manipulation du lexique</i> .....	90
4.8.1.2. <i>Manipulation des paramètres</i> .....	91
4.8.2. <i>Modélisation des rapports ortho-phonologiques</i> .....	95
<b>CHAPITRE 5 : MROM-P.....</b>	<b>97</b>
5.1. PRÉSENTATION DU MODÈLE.....	97
5.1.1. <i>Structure interne</i> .....	98
5.1.2. <i>Dynamique</i> .....	101
5.2. DISCUSSION.....	103
<b>CHAPITRE 6 : UNITÉS DE LA LECTURE.....</b>	<b>105</b>
6.1. EXPÉRIENCE 2 : EFFET DU NOMBRE DES GRAPHÈMES EN ANGLAIS.....	106
6.2. EXPÉRIENCE 3 : EFFET DU NOMBRE DES GRAPHÈMES EN FRANÇAIS.....	109
6.3. EXPÉRIENCE 4 : LES UNITÉS GRAPHÈMES EN ANGLAIS.....	112
6.4. EXPÉRIENCE 5 : LES UNITÉS GRAPHÈMES EN FRANÇAIS.....	116
6.5. DISCUSSION.....	119

<b>CHAPITRE 7 : LE FUM</b> .....	<b>123</b>
7.1. STRUCTURE DU MODÈLE.....	124
7.2. PARAMÈTRAGE ET SIMULATIONS .....	130
7.2.1. <i>Coltheart et al. (77)</i> .....	131
7.2.2. <i>Seidenberg et al. (1996) - TDL</i> .....	132
7.2.3. <i>Seidenberg et al. (1996) - Prononciation</i> .....	133
7.2.4. <i>Stone et al. (1997)</i> .....	134
7.2.5. <i>Rastle et Coltheart, 1998</i> .....	135
7.2.6. <i>Rey et al. (1998)</i> .....	135
7.3. DISCUSSION.....	136
7.3.1. <i>Amélioration du modèle</i> .....	136
7.3.2. <i>La notion d'unité dynamique</i> .....	137
7.3.3. <i>Vers un consensus empirique pour tester les modèles</i> .....	138
7.3.4. <i>De nouvelles contraintes empiriques</i> .....	138
<b>CHAPITRE 8 : DES PRÉDICTIONS AU NIVEAU DES MOTS</b> .....	<b>140</b>
8.1. EXPÉRIENCE 6 : 144 SUJETS, 120 MOTS .....	143
8.2. QUESTIONS DE MÉTHODOLOGIE.....	148
8.3. PARAMÈTRES LINGUISTIQUES .....	154
8.4. DISCUSSION.....	159
<b>CHAPITRE 9 : LES MOTS POLYSYLLABIQUES</b> .....	<b>165</b>
9.1. EXPÉRIENCE 7 : FRÉQUENCE * SYLLABE.....	166
9.2. EXPÉRIENCE 8 : FRÉQUENCE * NOMBRE DE LETTRES .....	170
9.3. EXPÉRIENCE 9 : SYLLABE * NOMBRE DE LETTRES .....	173
9.4. DISCUSSION.....	176
<b>CHAPITRE 10 : CONCLUSION</b> .....	<b>178</b>
10.1. LES UNITÉS DE LA LECTURE .....	179
10.2. UNITÉS PERCEPTIVES ET ACQUISITION DE LA LECTURE.....	180
10.3. LES MOTS DISSYLLABIQUES.....	181
10.4. MODÈLES COMPUTATIONNELS ET TESTS EMPIRIQUES .....	181
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>183</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>202</b>
<b>APPENDICE I</b> .....	<b>223</b>
<b>APPENDICE II</b> .....	<b>249</b>
<b>APPENDICE III</b> .....	<b>256</b>

# Chapitre 1

## Introduction

*« Les lecteurs de livres, dans la tribu desquels j'entrais sans le savoir, développent ou concentrent une fonction qui nous est commune à tous. Lire des lettres sur une page n'est qu'un de ses nombreux atours.*

*L'astronome qui lit une carte d'étoiles disparues ; l'architecte japonais qui lit le terrain sur lequel on doit construire une maison afin de la protéger des forces mauvaises ; le zoologue qui lit les déjections des animaux dans la forêt ; le joueur de cartes qui lit l'expression de son partenaire avant de jouer la carte gagnante ; le danseur qui lit les indications du chorégraphe, et le public qui lit les gestes du danseur sur la scène ; le tisserand qui lit les dessins complexes d'un tapis en cours de tissage ; le joueur d'orgue qui lit plusieurs lignes musicales simultanées orchestrées sur la page ; les parents qui lisent sur le visage du bébé des signes de joie, de peur ou d'étonnement ; le devin chinois qui lit des marques antiques sur une carapace de tortue ; l'amant qui lit à l'aveuglette le corps aimé, la nuit, sous les draps ; le psychiatre qui aide ses patients à lire leurs rêves énigmatiques ; le pêcheur hawaïen qui lit les courants marins en plongeant une main dans l'eau ; le fermier qui lit dans le ciel le temps qu'il va faire - tous partagent avec le lecteur de livres l'art de déchiffrer et de traduire des signes.*

*(...)*

*La lecture, ai-je découvert, vient avant l'écriture. Une société peut exister - beaucoup existent - sans l'écriture, mais aucune société ne peut exister sans la lecture. »*

*Alberto Manguel*

**L**ire implique de déchiffrer et de traduire des signes. Nous recevons, nous percevons, nous décodons, à chaque instant un grand nombre de signes. Des signes de différentes natures, des signes aux formes et aux contenus multiples (Eco, 1973). Ces signes sont porteurs d'un sens ou d'une information. Ils sont le support d'un message auquel nous avons accès si nous parvenons à les décoder. La lecture, prise ici dans un sens général, apparaît donc comme la combinaison de trois éléments indissociables : des signes, un code et un lecteur.

Comme le souligne Alberto Manguel<sup>1</sup>, on peut envisager la lecture sous différentes formes, chaque forme dépendant des signes et des codes employés. Néanmoins, en dépit de cette diversité, toutes les formes de lecture font appel, du point de vue du lecteur, à une même activité mentale de perception, décodage-identification et accès au sens. L'objet du présent travail de recherche est de mieux comprendre le contenu de cette activité mentale et les processus cognitifs sous-tendant la compétence de lecture.

---

<sup>1</sup> dans « Une histoire de la lecture », Editions Actes Sud, 1998, pour la traduction française.

Pour cela, notre domaine d'étude se réduit à une forme de lecture particulière, en l'occurrence, la lecture de mots écrits. De même, nous n'envisageons l'étude de la perception des mots qu'au travers du système d'écriture latin. Toutefois, aussi restreints que soient notre champ d'investigation et les questions que nous abordons, il reste que ce travail s'inscrit – modestement - dans la lignée des études visant à mieux cerner les propriétés psychophysiologiques qui font de l'homme un animal symbolique.

## 1.1. Langages, écritures et lectures

Il existe autant de lectures possibles qu'il existe d'écritures, et donc de langages. En ce sens, bien que des processus mentaux similaires doivent certainement être mis en œuvre pour lire différents types d'écritures, il demeure que chaque lecture est dépendante du système d'écriture dans lequel elle s'exerce. En effet, chaque système d'écriture *code* différemment les rapports linguistiques entre sens, forme auditive et forme visuelle<sup>2</sup>. Ces différences de codification impliquent que les propriétés des systèmes mentaux mis en œuvre au cours de la lecture sont dépendantes des propriétés des systèmes d'écritures qu'ils doivent traiter.

Il existe, à l'heure actuelle, un grand nombre de langages et de systèmes d'écritures. Ces systèmes se distinguent les uns des autres notamment par la nature des unités linguistiques visuelles, auditives et sémantiques qu'ils utilisent (Martin, 1988 ; Etiemble, 1973). L'histoire de l'ensemble de ces systèmes semble avoir une racine commune qui se situerait dans l'activité de graphisme (Février, 1995 ; Leroi-Gourhan, 1964 ; Martin, 1988). Les premières formes symboliques visuelles correspondraient en effet à des graphiques représentant des scènes naturelles ou des histoires. Toutefois, les œuvres graphiques, bien que signifiantes, ne possèdent pas encore de véritable statut linguistique. Elles codent un récit ou une scène plutôt que les éléments d'un langage. Ces œuvres annoncent néanmoins le passage à une représentation du monde réel qui, aussi primitive soit-elle, engage déjà l'homme sur la voie des représentations symboliques.

---

<sup>2</sup> Ou encore, suivant les termes de Saussure (1916), chaque système d'écriture code différemment les rapports entre signifié et signifiant oral ou écrit. Contrairement à la conception classique qui définit le langage comme la désignation des choses par les mots, Saussure définit le signe linguistique comme l'union d'un concept et d'une image acoustique (et par extension, une image visuelle) : le son ou le symbole visuel sont la face signifiante, le concept la face signifiée, l'ensemble formant le signe.

Parmi l'ensemble des systèmes d'écritures, on peut distinguer deux grandes familles : les systèmes d'écritures idéographiques (e.g., sumérien, égyptien, chinois, précolombien) et les systèmes d'écritures phonétiques (e.g., phénicien, grec, arabe, hébreux, cyrillique, latin). Les systèmes d'écritures idéographiques ont pour unité linguistique de base le mot ou le morphème, c'est-à-dire une unité signifiante. Les symboles utilisés ici renvoient à des mots ou à des agrégats de mots. Aussi, dans de tels systèmes, forme visuelle, forme auditive et signification entretiennent une relation directe. Dans les systèmes d'écritures phonétiques, en revanche, l'unité linguistique de base est avant tout phonétique. La forme visuelle code certains ou tous les éléments de la forme auditive du langage et ce, indépendamment du sens. Le visuel traduit en quelque sorte l'auditif. Pour reprendre une expression de Voltaire, l'écriture se définit ici comme « la peinture de la voix ». Ainsi, l'unité linguistique « mot » correspond à une composition d'unités sonores et de symboles visuels équivalents. La taille et le type de ces unités peut varier d'un langage à l'autre : de la syllabe pour le phénicien, aux consonnes pour l'arabe et l'hébreu, jusqu'aux systèmes grec et latin composés de consonnes et voyelles.

Notre travail se limite à l'étude des processus de perception et d'identification des mots dans le système d'écriture latin et principalement pour les langues Allemande, Anglaise et Française. Ces langues ont en commun de posséder comme signes visuels distinctifs ou caractères visuels de base les lettres de l'alphabet latin. De même, sur le plan de la phonologie, l'unité sonore distinctive commune est le phonème. Il reste que ces langues se différencient :

- au niveau des rapports entre unités visuelles, prises individuellement, et unités phonologiques. En effet, le son des lettres, c'est-à-dire, la relation entre lettres et phonèmes, n'est pas la même d'une langue à l'autre. Par exemple, la lettre « A » se prononce /er/ en anglais, et /A/ en français<sup>3</sup>.
- au niveau des rapports entre groupes d'unités visuelles et leurs correspondants phonologiques. En d'autres termes, les langues Allemande, Anglaise et Française ne disposent pas des mêmes graphèmes, un graphème se définissant comme le correspondant visuel d'un phonème (e.g., Berndt, Lynne D'Autrechy, & Reggia, 1994 ; Coltheart, 1978 ; Venezky, 1970 ; Véronis, 1986). Par exemple, le phonème /u/ peut s'écrire "OO" en Anglais et "OU" en Français.

---

<sup>3</sup> On utilise ici la notation phonétique de l'IPA (International Phonetic Association)

- au niveau lexical. La plupart du temps, dans chaque langue, deux formes visuelles et auditives signifiantes différentes correspondront à un même signifié. Par exemple, les mots "PFERD" en Allemand, "HORSE" en Anglais et "CHEVAL" en Français ont une forme visuelle et une forme phonologique différentes bien qu'au sein de chaque langue ils se réfèrent au même animal.

On constate ainsi que les propriétés grapho-phonémiques et lexicales de ces langues divergent, bien qu'elles utilisent toutes l'alphabet latin. Ces similarités et divergences au niveau des systèmes d'écritures permettent de distinguer également des similarités et divergences au niveau des processus de lecture. Ceci est particulièrement important et approprié pour dissocier les processus généraux de lecture des processus spécifiques à chaque forme de lecture et d'écriture.

## 1.2. Psycho- et neurolinguistique de la lecture

Comment distinguer un lecteur de mots écrits d'un non-lecteur ? On peut énumérer trois propriétés nécessaires permettant de qualifier un individu de lecteur. Premièrement, cet individu doit avoir, au préalable, une expérience linguistique. Il a une pratique orale ou gestuelle (pour les non-entendants) d'un langage donné, pratique grâce à laquelle il a déjà initié un rapport signifiant-signifié. Ce rapport lui servira de pilier pour édifier sa lecture. Cet individu dispose donc de ce que l'on pourrait appeler un système linguistique. Il est capable de communiquer (oralement ou gestuellement) par l'intermédiaire d'un langage et cette capacité découle d'une organisation cérébrale et cognitive particulière. Deuxièmement, il lui faut disposer d'un système visuel lui permettant de traiter correctement les informations parvenant à la surface de sa rétine. Il est donc en mesure de voir et de distinguer les différentes formes de son environnement visuel direct. Troisièmement, il lui faut parvenir à coupler ces deux précédents systèmes. Il lui faut développer pour cela une organisation cérébrale et cognitive lui permettant de mettre en rapport des informations visuelles avec des informations linguistiques. Il s'agit donc d'établir ou 'd'implémenter' le code allant du visuel vers le linguistique, et réciproquement. Aussi, on peut dire qu'à l'interface entre système visuel et système linguistique, un individu, que l'on qualifie de lecteur, doit développer ce que l'on peut appeler un système de lecture.

On peut définir la psycholinguistique de la lecture comme l'étude du système de lecture et ce, suivant un format de description fonctionnel. Il s'agit dans ce cas d'envisager la manière dont *fonctionne* ce système, c'est-à-dire, quelles opérations, quelles *fonctions*, il est en mesure de réaliser. Il s'agit notamment, de comprendre comment le système de lecture traite l'information issue du système visuel et parvient à combiner cette information avec des informations linguistiques. La psycholinguistique se contente donc d'avoir une compréhension "superficielle" des processus de lecture. Cette approche se justifie pleinement si l'on considère la complexité du système étudié, complexité qui est ainsi abordée suivant une démarche heuristique de simplification.

La neurolinguistique de la lecture aborde également l'étude du système de lecture dans la perspective d'une description de son organisation cérébrale. L'ambition de cette démarche est de parvenir à une description neurobiologique des processus de lecture. Néanmoins, bien que faisant référence au tissu cérébral, cette approche demeure encore confinée à des descriptions anatomo-fonctionnelles du système de lecture. Elle se contente de mettre en rapport certaines régions du cerveau avec certaines fonctions ou processus cognitifs (parfois révélés ou proposés par la psycholinguistique). Ainsi, si une personne présente un déficit fonctionnel à la suite de la lésion d'une région cérébrale, le neurolinguiste associe la région en question à la fonction perturbée, indiquant que cette région semble « impliquée » dans la réalisation de cette fonction. En ce sens, la neurolinguistique de la lecture permet de mettre à jour des dissociations entre certaines fonctions ou processus. Cette approche est donc complémentaire de la psycholinguistique et fournit des contraintes supplémentaires quant à l'organisation fonctionnelle des compétences de lecture.

La présente étude emprunte principalement les méthodes et concepts de la psycholinguistique. Toutefois, la lecture se situant au carrefour de disciplines telles que la linguistique et la neurolinguistique, ce travail, pluridisciplinaire de par son objet d'étude, s'en nourrit donc inévitablement.

### **1.3. Perception des mots écrits et phonologie**

Dans le système d'écriture alphabétique latin (i.e., en Allemand, Anglais ou Français), un mot écrit peut se définir suivant trois dimensions linguistiques principales :

- sa forme visuelle ou structure orthographique, c'est-à-dire, la séquence ordonnée des lettres qui le composent
- sa forme auditive ou structure phonologique, c'est-à-dire, la séquence ordonnée des phonèmes qui le composent
- sa signification ou sémantique, c'est-à-dire, ce que *représente* ce mot. Cette dimension regroupe également un ensemble d'informations notamment sur le genre du mot, sa classe grammaticale, s'il s'agit d'une forme plurielle ou singulière, etc.

Toutes ces dimensions sont accessibles à un lecteur adulte. En effet, si je rencontre un mot écrit familier, je suis en mesure de dire s'il est bien écrit (accès à ses propriétés orthographiques), comment il se prononce (accès à ses propriétés phonologiques) et ce qu'il signifie (accès à ses propriétés sémantiques). Tout ceci est rendu possible grâce à mon système de lecture qui, à partir d'une information visuelle particulière, me permet de retrouver l'ensemble des propriétés linguistiques associées à ce stimulus visuel.

L'objet de ce travail de thèse est de spécifier les rapports entre dimension orthographique et dimension phonologique au cours de la reconnaissance visuelle des mots. Depuis le début du siècle (Huey, 1908) et jusqu'à très récemment encore (e.g., Meyer, Schvaneveldt, & Ruddy, 1974 ; Van Orden, 1987), un grand nombre d'études ont cherché à montrer si, lors de la lecture silencieuse d'un texte, un lecteur adulte utilise la phonologie, ou encore, s'il recode en sons les symboles visuels qu'il lit et comprend. Certains auteurs, défenseurs de la théorie de l'accès direct, soutiennent que l'information phonologique n'est pas ou peu utilisée lors de la lecture silencieuse (Aaronson & Ferres, 1983 ; Baron, 1973 ; Becker, 1976, 1980 ; Bower, 1970 ; Goodman, 1969 ; Johnson, 1977 ; Frederiksen & Kroll, 1976 ; Kleiman, 1975 ; Kolers, 1970 ; Smith, 1971). Le principal argument en faveur de cette approche vient de mesures de la vitesse de lecture (Carver, 1972 ; McLaughlin, 1969). En effet, de bons lecteurs adultes peuvent lire un texte jusqu'à une vitesse de 20 mots par secondes. Aussi, le maximum de mots prononcés lors d'une lecture à voix haute ne pouvant dépasser 10 mots par seconde (Landauer, 1962 ; Sperling, 1967), les tenants de la théorie directe concluent que, dans de telles conditions, les lecteurs parviennent à comprendre le texte sans le convertir en code phonologique. Toutefois, comme le soulignent Meyer et al. (1974), cette interprétation ne tient pas compte du fait que la plupart des textes sont hautement redondants (Shannon, 1951) et

qu'il suffit de reconnaître simplement une fraction des mots présentés pour avoir une bonne compréhension de l'ensemble du texte (Pierce & Karlin, 1957).

Aujourd'hui, la question de l'implication ou non de la phonologie au cours de la lecture silencieuse n'est plus d'actualité. En effet, durant ces 20 dernières années, un grand nombre d'études ont montré que l'information phonologique est rapidement et automatiquement activée au cours du traitement visuel d'un mot (pour des revues, voir Ferrand, 1994, 1995 ; Frost, 1998 ; Ziegler, 1996. Nous détaillons ce point au chapitre 3).

En revanche, la question de fond, qui demeure débattue, concerne la nature du rapport entre informations visuo-orthographiques et informations phonologiques. En d'autres termes, par quels processus accède-t-on aux informations phonologiques à partir des informations visuelles ? L'objectif de notre travail est donc de poursuivre l'analyse de cette question, tant sur un plan empirique, en testant de nouvelles hypothèses sur le rôle de la structure phonologique des mots, que sur un plan théorique, en développant de nouvelles architectures computationnelles de la reconnaissance des mots, architectures de type connexionniste symbolique spécifiant les relations entre orthographe et phonologie au sein du système de lecture.

Dans la suite de cet exposé, nous abordons tout d'abord des questions de méthodologie (chapitre 2 : Méthodologies). La psychologie expérimentale fournit, en effet, un certain nombre de méthodes permettant d'explorer indirectement les différents systèmes cognitifs qu'elle étudie. Après avoir passé en revue et analysé les principaux protocoles expérimentaux employés en psycholinguistique, nous présentons le paradigme expérimental avec lequel une grande partie des études empiriques de cette recherche est réalisée.

Dans le chapitre suivant, nous décomposons les dimensions orthographiques et phonologiques des mots en sous-dimensions ou propriétés (par exemple, le nombre de lettres, le nombre de voisins orthographiques, la régularité ortho-phonologique, etc.), et examinons le rôle de ces différents facteurs sur les processus de perception des mots écrits (chapitre 3 : Orthographe et phonologie). Nous résumons ainsi les résultats empiriques obtenus dans la littérature expérimentale en manipulant ces différentes variables.

Ces données empiriques nous conduisent aux modèles des processus de reconnaissance des mots écrits (chapitre 4 : Modèles de la perception visuelle des mots). Nous présentons ici, suivant un plan chronologique, les principaux travaux théoriques dans ce domaine et en proposons un commentaire.

Après avoir posé les cadres empirique et théorique liés à notre question, nous présentons un premier travail de modélisation au cours duquel nous avons tenté d'apporter un certain nombre de réponses à la question des rapports entre orthographe et phonologie au sein du système de lecture (chapitre 5 : le MROM-P).

Ce travail de modélisation nous amène à la question des unités orthographiques fonctionnelles de la lecture (chapitre 6 : Unités de la lecture). Nous discutons ici plus particulièrement du rôle des unités graphèmes et présentons une série de travaux expérimentaux, réalisés en Anglais et en Français, visant à tester la validité fonctionnelle de ces unités.

Les résultats de ces expériences nous amènent, au chapitre suivant, à reconsidérer la modélisation des processus de transition visuo-phonologiques (chapitre 7 : le FUM). Nous proposons ainsi un autre cadre théorique basé cette fois sur la notion d'unité orthographique fonctionnelle.

Cette dernière modélisation s'inscrit ainsi dans la lignée des dernières générations de modèles computationnels de la perception des mots écrits. Elle fournit non seulement des outils conceptuels précis et des descriptions toujours plus détaillées, mais aussi des prédictions extrêmement fines des performances potentiellement observables chez un lecteur adulte. Aussi, ces modèles apparaissent-ils parfois bien trop puissants lorsqu'ils sont comparés aux données comportementales couramment rapportées dans la littérature expérimentale. Nous présentons ainsi une étude réalisée avec un grand nombre de lecteurs et visant à recueillir des données empiriques au niveau de l'identification de mots, pris individuellement (chapitre 8 : Des prédictions au niveau des mots). Nous étudions ici dans quelle mesure ce genre de données fournit des contraintes supplémentaires pour l'élaboration des modèles de la lecture.

Enfin, pour ouvrir notre travail sur de futures recherches, nous rapportons une série d'expériences préliminaires, réalisées en Allemand, sur la perception des mots polysyllabiques et sur la question de leur segmentation (chapitre 9 : Les mots polysyllabiques).

# Chapitre 2

## Méthodologies

« *Quel que soit l'objet propre de chaque procédure expérimentale, la méthode reste la même dans son principe. Si le premier mouvement de l'expérimentateur est la soumission au fait, il ne s'en satisfait cependant pas. Son idéal est d'arriver à produire le fait et il ne peut y parvenir que s'il en connaît toutes les conditions d'apparition. A ce moment-là, il est capable de prédiction. Mais pour arriver à ce terme, l'expérimentateur a dû tisser la toile des relations entre tous les faits caractéristiques et, plus son objet est complexe, plus la tâche est longue et difficile.* »

Paul Fraisse

Le système de lecture, comme l'ensemble des différents systèmes cognitifs, n'est pas accessible directement par un observateur. Ce système se trouve imbriqué dans un système plus large que l'on peut appeler : *système cognitif humain* (SCH). Le SCH reçoit à chaque instant des informations du monde environnant et réalise un traitement de ces informations (grâce aux sous-systèmes cognitifs qui le composent). Ce traitement a pour conséquence de changer l'état du SCH, ce qui induit des modifications au niveau d'indices externes – observables et mesurables - produits par le SCH. Un expérimentateur peut ainsi manipuler les informations fournies au SCH et mesurer les variations de différents indices externes (Figure 2.1.a). Il peut de cette manière établir des relations entre certaines propriétés des informations fournies (classiquement appelées variables indépendantes) et les variations des indices externes (appelées variables dépendantes). Ainsi, en « tissant la toile des relations » qui lient les variables indépendantes aux variables dépendantes, on obtient une description de la façon dont *fonctionne* le SCH (Figure 2.1.b). A partir de ces descriptions fonctionnelles, on peut ensuite induire un certain nombre d'hypothèses sur l'architecture du SCH, mais également sur l'architecture du sous-système qui nous intéresse, en l'occurrence, le système de lecture (Figure 2.1.c). En effet, on peut attribuer plus spécifiquement les variations des indices externes à certains sous-systèmes cognitifs. Il faut pour cela s'assurer que les mani-

pulations sur les informations fournies au SCH vont affecter plus spécifiquement tel ou tel sous-système.

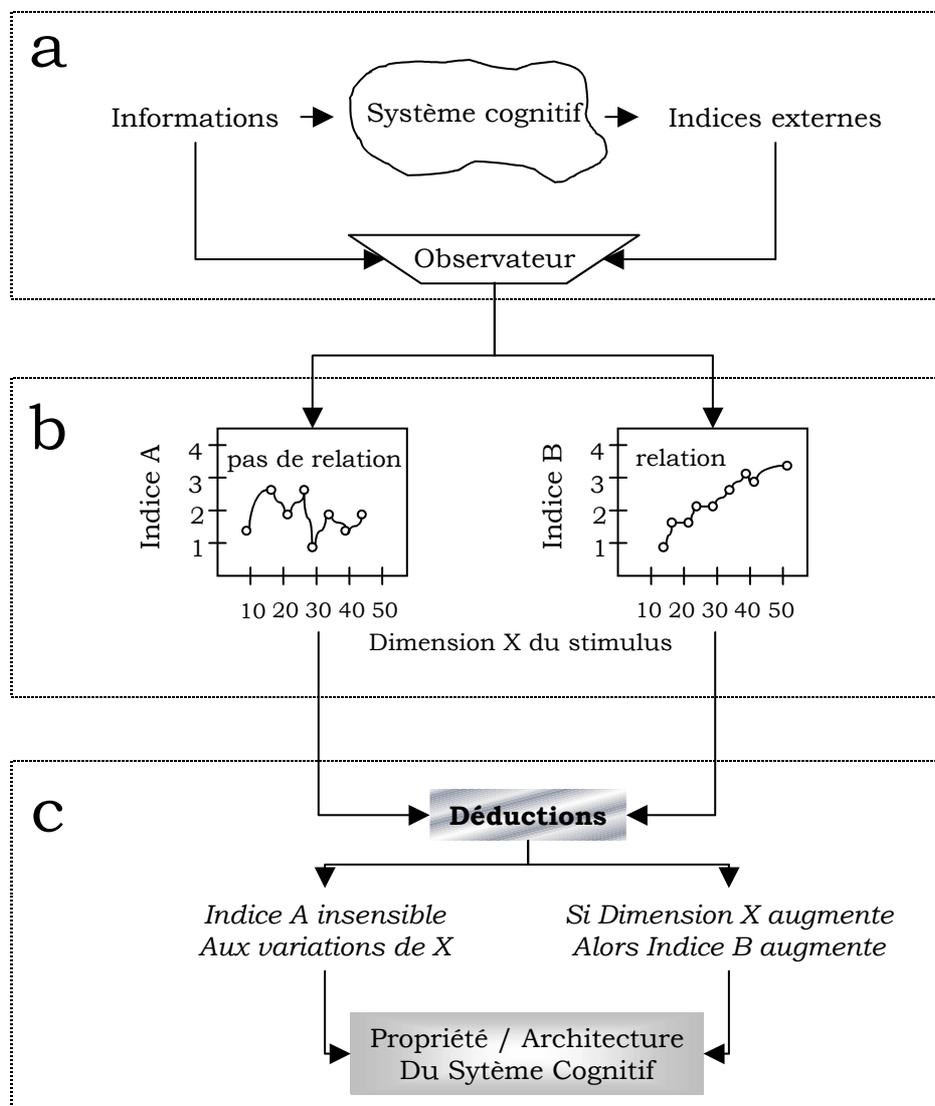


Figure 2.1. : (a) Expérimentation, (b) analyse fonctionnelle, et (c) modélisation du système cognitif.

En psycholinguistique, on peut distinguer deux types d'indices externes, ou variables dépendantes mesurables :

- Le premier indice correspond au temps mis par le système pour réaliser un traitement donné. On parle couramment du temps de réaction ou temps de réponse (TR). Le TR correspond à l'intervalle de temps séparant le moment où l'information (le stimulus) est fournie au SCH et le moment où un indice de fin de traitement est enregistré (e.g., réponse motrice, appui sur un curseur). Le TR, généralement mesuré en millisecondes, renseigne ainsi sur la dynamique du système cognitif ayant réalisé le traitement (Luce, 1986 ;

Meyer, Osman, Irwin, & Yantis, 1988 ; Posner, 1978 ; Townsend & Ashby, 1983). Toutefois, cette mesure ne peut être envisagée comme une mesure « pure » des processus cognitifs mis en jeu dans un protocole expérimental. Elle est, en effet, considérée comme une variable aléatoire (« random variable »), la même expérience, réalisée par un même individu, ne donnant jamais le même TR. Aussi est-on amené à analyser des distributions de TR, ces distributions étant plus à même de représenter la signature des processus étudiés (e.g., Dzhamfarov, 1993 ; Heathcote, Popiel, & Mewhort, 1991 ; Hockley, 1984 ; Jacobs & Grainger, 1992 ; Mewhort, Braun, & Heathcote, 1992 ; Ratcliff, 1979 ; Ratcliff & Murdock, 1976). Cependant, cette approche reste peu développée en psycholinguistique, comme nous le verrons plus tard.

- Le second indice compare le traitement réalisé par le SCH au traitement souhaité. Il s'agit ici d'une mesure des erreurs de traitement produites par le SCH. On rapporte ainsi le pourcentage de réponses correctes/incorrectes. On peut également analyser le type d'erreurs produites dans des protocoles où les indices enregistrés correspondent à des réponses verbales par exemple (e.g., Dell, 1986). Par ailleurs, ce type de variable est particulièrement pertinent pour l'étude de systèmes cognitifs défaillants (i.e., en neuropsychologie : Caramazza, 1992) et permet de mieux situer le niveau du déficit fonctionnel.

Dans ce chapitre, nous décrivons différents protocoles expérimentaux utilisés pour étudier les performances et le fonctionnement du système de lecture. Une analyse détaillée des méthodes employées nous semble effectivement importante afin de tenter de déterminer le domaine de validité des résultats obtenus dans ces différents protocoles. Pour chaque protocole, nous présentons donc les variables dépendantes enregistrées et analysons leur lien avec le système de lecture. Avec cette analyse, nous tentons ainsi de voir dans quelle mesure ces variables reflètent le fonctionnement du système de lecture et des processus d'identification des mots. Nous discutons d'abord des protocoles les plus couramment utilisés comme la tâche de décision lexicale, la tâche de prononciation, la tâche de catégorisation sémantique, les protocoles d'amorçage et les protocoles d'identification perceptive. Nous présentons ensuite un nouveau protocole d'identification perceptive que nous avons développé et qui présente un certain nombre d'avantages que nous détaillons.

## 2.1. Protocoles expérimentaux

### 2.1.1. Tâche de décision lexicale

La tâche de décision lexicale (TDL) est l'un des protocoles expérimentaux les plus employés dans le domaine de la perception des mots (pour des exemples récents : Carreiras, Perea, & Grainger, 1997 ; Kelly, Morris, & Verrechia, 1998 ; Schilling, Rayner, & Chumbley, sous presse ; Ziegler & Perry, sous presse). Dans cette tâche, on présente à un sujet une suite de lettres sur un écran d'ordinateur et on lui demande si cette suite correspond ou non à un mot. Le sujet doit alors répondre aussi rapidement que possible en pressant l'un des deux boutons réponse (cf. Figure 2.2). Une expérience contient la plupart du temps autant de mots que de non-mots.

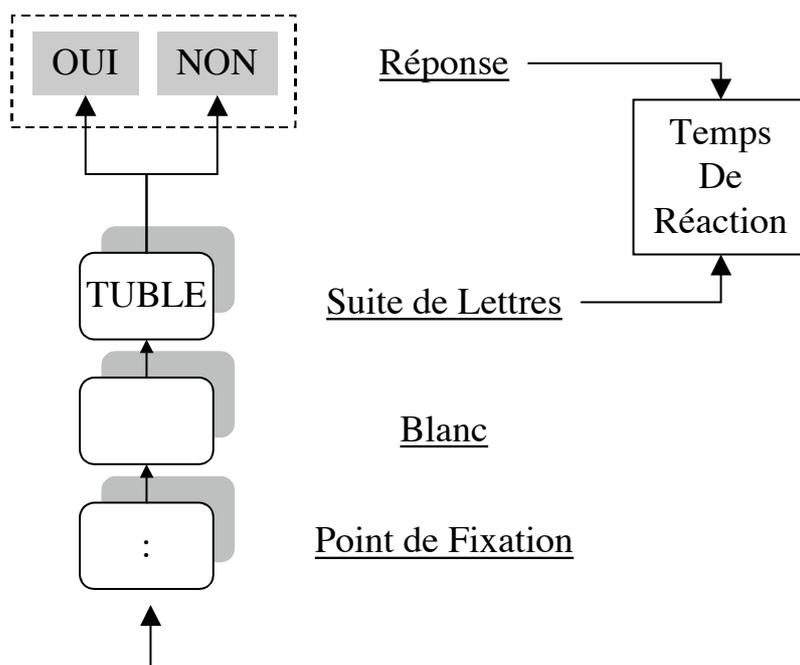


Figure 2.2. : Schéma de la tâche de décision lexicale.

Dans ce protocole, il est possible de mesurer deux variables dépendantes : le temps de réaction et le pourcentage d'erreurs. Le temps de réaction (TR) correspond ici au temps écoulé entre l'apparition du stimulus sur l'écran et la réponse du sujet. Cette mesure peut être considérée comme un indice du temps de traitement nécessaire (1) pour identifier un mot et (2) pour décider qu'une suite de lettres ne correspond pas à un mot. De même, le pourcentage d'erreurs (% Err) indique la proportion des réponses incorrectes par rapport à l'ensemble des réponses produites.

Plusieurs études ont proposé une analyse de la TDL et ont tenté de montrer dans quelle mesure ce protocole est relié aux processus de reconnaissance des mots (Atkinson & Juola, 1973 ; Balota & Chumbley, 1984 ; Gordon, 1983 ; Grainger & Jacobs, 1996 ; Stone & Van Orden, 1993). La plupart de ces études suggèrent en fait de démasquer la simplicité apparente de la TDL pour révéler la complexité des interactions entre processus de perception et processus de décision. Si l'on suit, par exemple, la description proposée par Balota et Chumbley (Figure 2.3), il est possible de représenter les deux ensembles de mots et de non-mots utilisés au cours d'une expérience sur un continuum de *familiarité lexicale* (Atkinson & Juola, 1973). On attribue ainsi à chaque chaîne de lettres une valeur sur cette dimension de familiarité lexicale en fonction de ses propriétés orthographiques et/ou phonologiques. On obtient ainsi deux distributions pouvant se chevaucher plus ou moins, selon le type de mots et de non-mots employés dans l'expérience. La tâche des sujets est ensuite de discriminer rapidement ces deux populations de stimuli en commettant le moins d'erreurs possible.

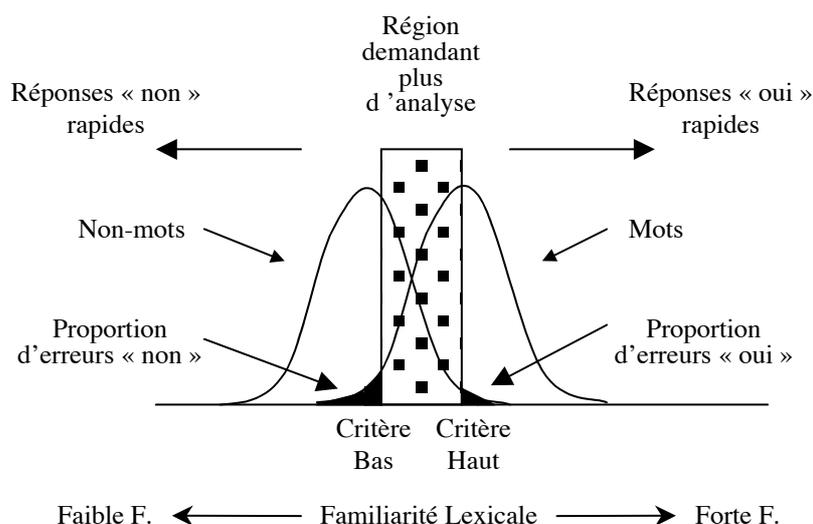


Figure 2.3. : Distribution des mots et non-mots sur une dimension de familiarité lexicale (suivant Balota & Chumbley, 1984).

Ces auteurs font l'hypothèse que les sujets trouvent deux critères de décision les plus efficaces possibles (sur le plan du rapport vitesse/exactitude de la réponse), l'un permettant d'accepter le stimulus comme « mot » (critère haut), l'autre permettant de le rejeter dans la catégorie « non-mot » (critère bas). Ainsi, des stimuli situés en amont du critère haut sont rapidement classés comme « mots » et réciproquement pour des stimuli situés en aval du critère bas. Reste la zone intermédiaire entre les deux critères, pour laquelle les sujets doivent prendre plus de temps afin d'effectuer une analyse plus détaillée du stimulus. On voit ici que

si le stimulus se trouve à l'extérieur de cette zone intermédiaire, il n'est nullement nécessaire de le reconnaître parfaitement pour générer une réponse, une réponse rapide pouvant être donnée simplement sur la base d'une estimation de familiarité lexicale du stimulus (pour une analyse similaire en termes d'activité lexicale globale : Grainger & Jacobs, 1996).

On peut ainsi déduire de cette description que la production d'une réponse « mot » dans la TDL (réponse qui est sensée fournir une mesure temporelle des processus impliqués dans l'identification d'un mot) est dépendante :

1. des propriétés de la distribution des non-mots (i.e., la lexicalité des non-mots : Grainger & Jacobs, 1996 ; Hudson & Bergman, 1985 ; Shulman & Davidson, 1977 ; Stone & Van Orden, 1993). Ainsi, si la liste de non-mots est constituée, par exemple, uniquement de chaînes de consonnes (e.g., NBRLT), les deux distributions mots/non-mots sont très facilement dissociables et les réponses pour les mots ne demandent pas une analyse détaillée du stimulus (James, 1975).
2. des propriétés de la distribution des mots (e.g., Dorfman & Glanzer, 1988 ; Glanzer & Ehrenreich, 1979 ; Gordon, 1983 ; Stone & Van Orden, 1993). Si la liste de mots n'est constituée que de mots extrêmement fréquents (manipulation bloquée), là également, les deux distributions sont facilement discriminables et les réponses peuvent être données sur la base d'un traitement global, ou de surface, du stimulus.
3. des consignes pour réaliser la tâche (i.e., favoriser la vitesse ou l'exactitude de la réponse : Grainger & Jacobs, 1996). En demandant aux sujets, par exemple, de ne pas craindre de produire des erreurs et de répondre très rapidement, on peut influencer directement leurs critères de réponses et donc la qualité du traitement réalisé.

Ces différents facteurs induisent ainsi une variabilité sur l'établissement des critères de décisions pris par le sujet pour réaliser la tâche. Les temps de réponse enregistrés sont donc fortement dépendants de ces facteurs et les résultats obtenus dans une expérience sont à analyser en fonction des options prises par l'expérimentateur. La TDL pose donc un certain nombre de difficultés d'interprétation.

En résumé, la TDL, parce qu'elle correspond avant tout à une tâche de discrimination entre deux populations de stimuli (Green & Swets, 1966), des mots et des non-mots, présente un certain nombre d'inconvénients dus aux interactions possibles entre processus de perception et processus de décision. L'interprétation des données enregistrées grâce à ce protocole de-

mande ainsi de prendre en compte un certain nombre de facteurs extérieurs aux processus d'identification des mots. Nous illustrons plus précisément ce point au chapitre suivant à propos de données expérimentales contradictoires concernant le rôle du voisinage orthographique d'un mot (Grainger & Jacobs, 1996).

### 2.1.2. Tâche de prononciation

A l'instar de la TDL, la tâche de prononciation ("naming task") est dans son principe relativement simple. Le sujet est face à un écran d'ordinateur sur lequel apparaît un mot qu'il doit lire à voix haute aussi rapidement que possible. Le mode de présentation du stimulus est identique à celui de la TDL, par contre la réponse requise est différente : il ne s'agit plus d'une réponse motrice binaire mais d'une réponse motrice plus sophistiquée, faisant appel au réseau des muscles permettant l'articulation et l'émission d'une séquence de sons particulière. On enregistre la réponse orale produite par le sujet à l'aide d'un microphone.

Dans ce protocole expérimental, on peut mesurer différentes variables dépendantes :

- le temps de réaction (TR) qui correspond à l'intervalle de temps séparant la présentation du stimulus du début de la réponse orale ;
- le temps de prononciation qui correspond à l'intervalle de temps situé entre le début de la réponse orale et la fin de cette réponse. Cet indice est rarement exploité pour ce qui est de la reconnaissance des mots car il apparaît plus relié aux processus de production qu'aux processus de perception/identification ;
- les erreurs produites par le sujet.

Comme on peut le constater, la tâche de prononciation fait appel à la fois à des processus d'identification des mots et à des processus de production des mots. Les mesures du TR, calées sur le début de la prononciation du mot, ne permettent pas de dissocier le temps dédié à l'un ou l'autre de ces processus. D'où un problème d'interprétation quant aux différences observées dans les temps de dénomination de mots ou de groupes de mots. En effet, ces différences résultent-elles (1) de différences dans le temps d'identification d'un mot, (2) de différences dans le temps nécessaire à réaliser la programmation motrice associée à la dénomination (programmation motrice différente d'un mot à l'autre), ou (3) de différences associées à l'exécution du programme moteur ?

Certaines études tentent de résoudre ce problème d'interprétation en proposant de coupler la tâche de prononciation à une variante de cette tâche : la tâche de prononciation différée (Balota & Chumbley, 1985 ; Connine, Mullenix, Chernov, & Yelen, 1992 ; Inhoff & Topolski, 1994 ; Monsell, Doyle, & Haggard, 1989 ; Ziegler, Montant, & Jacobs, 1997). Dans ce protocole, le sujet ne doit pas prononcer le mot présenté à l'écran dès que ce dernier apparaît. Il doit attendre l'apparition d'un second stimulus visuel non-lexical (par exemple, une suite de « X ») pour donner sa réponse verbale. Le temps de réaction mesuré ici correspond à l'intervalle de temps situé entre l'apparition du second stimulus et le début de la réponse du sujet. Ainsi, on peut faire l'hypothèse que cette mesure du TR élimine le temps dédié aux processus d'identification des mots pour ne donner une estimation que des processus liés à leur production. Une différence observée en tâche de prononciation et ne s'observant pas dans une tâche de prononciation différée indique alors que cette différence peut être spécifiquement rattachée aux processus de perception/identification. Une difficulté persiste toutefois. Certains auteurs rapportent une manipulation du temps séparant le stimulus-mot du second stimulus autorisant la prononciation (McRay, Jared, & Seidenberg, 1990) et montrent des effets sur les TR variables en fonction du temps inter-stimulus. Ce résultat complique donc l'interprétation en termes de présence ou absence des processus d'identification lors de la prononciation différée.

En résumé, la tâche de prononciation soulève également des problèmes d'interprétation liés cette fois au fait que cette tâche fait appel à la fois à des processus d'identification des mots, mais également à des processus de production (variables d'un mot à l'autre). Aussi, afin de tenter de dissocier ces processus, certains auteurs proposent-ils d'utiliser un protocole de prononciation différée. Néanmoins, le lien entre les indices comportementaux enregistrés dans ce protocole et les processus de reconnaissance des mots reste encore une question ouverte.

### **2.1.3. Tâches d'identification perceptive**

On peut regrouper sous les termes de « tâches d'identification perceptive » un ensemble de protocoles expérimentaux qui ont pour point commun de dégrader l'information visuelle fournie aux sujets (Rey, Grainger, Chesnet, Bijeljac-Babic, & Jacobs, soumis). L'effet d'une telle perturbation est de ralentir les processus de reconnaissance qui sont souvent masqués

par la rapidité et l'automatisme de la perception visuelle normale. En freinant les processus d'identification, on peut plus facilement mesurer des différences qui n'apparaissent pas dans des conditions de présentation normales.

On dénombre plusieurs variantes de cette approche dans le domaine de la reconnaissance des mots. Ainsi, certains auteurs proposent de dégrader l'information visuelle donnée aux sujets :

- 1) en limitant le temps de présentation des mots grâce, notamment, à la technique du tachistoscope (Haber & Hershenson, 1965 ; Howes & Solomon, 1951 ; Jacoby & Dallas, 1981) ;
- 2) en utilisant des masques placés avant ou après le stimulus (Marcel, 1983 ; Massaro & Klitzke, 1979 ; Turvey, 1973) ;
- 3) en immergeant le stimulus dans du bruit visuel (Vokey, Baker, Hayman, & Jacoby, 1986) ;
- 4) en démasquant progressivement la présentation d'un mot (Feustel, Shiffrin, & Salasoo, 1983 ; Grainger & Segui, 1990) ;
- 5) en fragmentant le stimulus présenté (Snodgrass & Poster, 1992 ; Warrington & Weiskrantz, 1968 ; Ziegler, Rey, & Jacobs, 1998).

Ces protocoles, bien qu'ayant en commun de dégrader l'information visuelle fournie aux sujets, se distinguent néanmoins sur le plan du type de dégradation employée et, également, sur le plan des variables dépendantes enregistrées. On peut classer ces différentes méthodes en trois catégories : les méthodes à présentation limitée (Haber & Hershenson, 1965 ; Howes & Solomon, 1951 ; Jacoby & Dallas, 1981 ; Marcel, 1983 ; Massaro & Klitzke, 1979 ; Turvey, 1973), les méthodes ajoutant du bruit visuel (Feustel et al., 1983 ; Grainger & Segui, 1990 ; Vokey et al., 1986), et les méthodes à présentation partielle (Snodgrass & Poster, 1992 ; Vokey et al., 1986 ; Warrington & Weiskrantz, 1968 ; Ziegler et al., 1998).

Premièrement, les méthodes à présentation limitée dégradent l'information visuelle en limitant le temps d'apparition et, donc, le temps de traitement du stimulus. Toute l'information visuelle sur le stimulus est donnée, en revanche elle n'est disponible que pendant une fraction de secondes, ne permettant pas un traitement complet et une identification totale du stimulus. La variable dépendante typique dans ce genre d'expérience est le pourcentage de réponses correctes pour une durée de présentation donnée. De même, lorsque des erreurs sont produi-

tes, on obtient des informations complémentaires sur le type d'erreurs ou les confusions perceptives. En revanche, ce type de protocole ne fournit aucune information sur la dynamique des processus d'identification, c'est-à-dire sur le temps de traitement du stimulus.

Deuxièmement, les méthodes ajoutant du bruit visuel dégradent l'information visuelle en superposant certaines informations visuelles au stimulus à identifier. Par exemple, Vokey et al. (1986) proposent un protocole expérimental où le stimulus à identifier est tout d'abord recouvert par une nuée de points noirs distribués aléatoirement. Progressivement, le nombre de points noirs diminue, démasquant petit-à-petit le stimulus. La tâche des sujets est d'arrêter le démasquage dès l'identification du stimulus. On mesure ainsi le seuil d'identification pour chaque stimulus (qui correspond au rapport signal/bruit pour lequel les sujets réalisent une identification correcte). L'utilisation d'un bruit visuel ajouté au stimulus à traiter soulève toutefois la question de la variabilité accompagnant cette information bruitée. Par définition, l'ajout d'un signal bruité aléatoire implique que ce signal est différent d'un essai à l'autre, ce qui peut induire certaines modifications dans le traitement effectué. Une autre possibilité proposée par Grainger et Segui (1990) consiste à alterner la présentation du stimulus cible avec la présentation d'un masque. Dans ce protocole, en plus de l'alternance stimulus/masque, le temps de présentation du stimulus augmente d'une présentation à l'autre alors que le temps de présentation du masque diminue respectivement. Le sujet interrompt ce processus dès qu'il reconnaît le stimulus cible. Cette procédure étant réalisée en temps réel, on peut alors mesurer le temps d'identification du stimulus et évaluer l'exactitude de l'identification du sujet. Cependant, on peut se demander si la présentation du masque interagit avec le traitement du stimulus cible, ce qui demande alors de préciser la nature de cette interaction afin qu'elle n'intervienne pas dans l'analyse de la performance comme facteur incontrôlé.

Troisièmement, les méthodes à présentation partielle proposent de dégrader le stimulus visuel en ne présentant qu'une partie de ce stimulus puis en augmentant progressivement le taux d'informations visuelles disponibles. Ces protocoles débutent généralement par la présentation d'une forme extrêmement dégradée du stimulus (ne permettant pas de l'identifier la plupart du temps). Puis, les sujets peuvent demander à recevoir un peu plus d'informations visuelles jusqu'à ce qu'ils puissent reconnaître le stimulus. Là encore, il est possible de mesurer le seuil d'identification pour chaque stimulus. Vokey et al. (1986) présentent une variante de ce protocole dans laquelle l'information visuelle manipulée est le pourcentage de

pixels contenus dans le stimulus cible. L'expérience débute avec un écran blanc. Puis, un certain pourcentage de pixels appartenant au stimulus apparaît. Si le sujet ne parvient pas à identifier le stimulus, plus de pixels sont fournis (le choix des pixels présentés étant aléatoire). De manière similaire, Snodgrass et Poster (1992) proposent de fragmenter le stimulus en blocs de pixels. Là aussi, un certain pourcentage de blocs est présenté et ce pourcentage augmente tant que le sujet n'identifie pas le stimulus. Une critique que l'on peut émettre à l'égard de ce type de méthode concerne le choix aléatoire des informations visuelles fournies au sujet. Ceci est particulièrement important dans la tâche de Snodgrass et Poster, où tous les blocs de pixels ne contiennent pas le même degré d'informativité par rapport au stimulus. Ce qui ajoute une source de variabilité incontrôlée aux mesures enregistrées. Par ailleurs, il est à noter que ces protocoles enregistrent généralement des mesures discrètes des seuils d'identification (comparées à des mesures continues comme le temps de réaction) et qu'il n'y a pas de contrainte temporelle lors de l'exécution de la tâche. Les processus d'identification mis en œuvre dans ce genre de situation expérimentale risquent ainsi de se mêler à des processus stratégiques et non-automatiques (Ziegler, Rey, & Jacobs, 1998).

Pour résumer, les tâches d'identification perceptive permettent de mesurer les performances d'identification de stimuli dans des conditions de présentation où l'information visuelle est dégradée. L'intérêt de tels protocoles est de solliciter plus directement les processus d'identification (Snodgrass & Mintzer, 1993) et, également, de demander au sujet ce qu'il a effectivement vu (ce qui n'est pas le cas dans la tâche de décision lexicale où un sujet peut très bien produire une réponse correcte sans avoir correctement identifié le stimulus, ce qui ne peut pas être détecté par l'expérimentateur). Néanmoins, certains de ces protocoles présentent certaines faiblesses liées au type de dégradation utilisée et aux variables dépendantes enregistrées.

#### **2.1.4. La tâche de catégorisation sémantique**

Dans cette tâche, on présente initialement au sujet le nom d'une catégorie sémantique, par exemple "couleur" (cf. Figure 2.4). On remplace ensuite ce premier stimulus par un second mot (par exemple, "bleu") et on demande au sujet de répondre si ce second mot appartient ou n'appartient pas à la catégorie sémantique. On enregistre ainsi le temps séparant la présentation du second mot et la réponse du sujet (e.g., Bosman & de Groot, 1996 ; Forster & Shen,

1996 ; Peter & Turvey, 1994 ; Monsell, Doyle, & Haggard, 1989 ; Van Orden, 1987). Ce protocole est utilisé comme indice des processus de reconnaissance des mots car, contrairement à la tâche de décision lexicale, il semble nécessiter un accès direct à la sémantique du mot (Besner, Davelaar, Alcott, & Parry, 1984 ; Van Orden, 1987). Parce qu'elles demandent un jugement sémantique, les réponses produites dans ce protocole ne peuvent donc, d'après ces auteurs, être données seulement à partir d'une estimation de la familiarité du mot cible (Balota & Chumbley, 1984). Ce protocole permet ainsi d'éviter un traitement superficiel du mot et assure de bien mesurer le temps d'accès lexical.

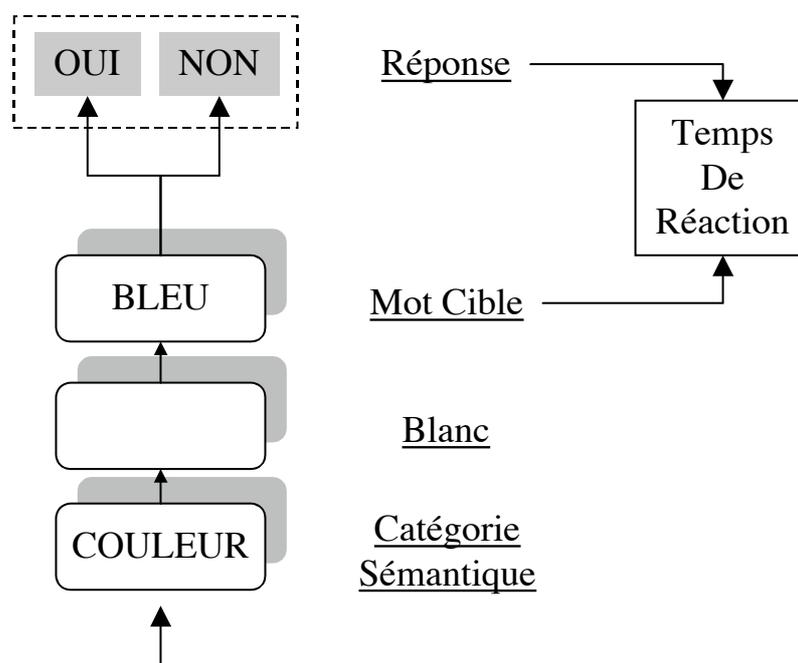


Figure 2.4. : Schéma de la tâche de catégorisation sémantique.

Toutefois, parce qu'il nécessite une réponse binaire (à l'instar de la tâche de décision lexicale), ce protocole ne garantit pas que le sujet a bien identifié le mot. De plus, ce protocole associe très clairement des processus d'identification à des processus de jugement sémantique. Là encore, est-on en mesure de dissocier, au niveau des variables dépendantes enregistrées, les deux processus mis en jeu ? Enfin, le traitement du stimulus cible peut interagir avec la présentation de la catégorie sémantique, cette dernière pouvant avoir un effet d'amorçage sur le mot à traiter. Cet effet peut dépendre, par exemple, des relations de prototypicalité entre le mot et la catégorie (Monsell, 1991). Afin de résoudre ce problème d'amorçage, Forster et Shen (1996), proposent de ne considérer dans ce protocole que les latences des réponses négatives. Aussi, comme on peut le constater, la tâche de décision sémantique présente égale-

ment un certain nombre de difficultés quant à la mise en correspondance des mesures enregistrées et des processus d'identification des mots écrits.

### 2.1.5. Les protocoles d'amorçage

Un autre protocole expérimental souvent utilisé pour l'étude des processus d'identification des mots est le paradigme d'amorçage (e.g., Evett & Humphreys, 1981 ; Forster & Davis, 1984 ; Grainger & Jacobs, sous presse ; McNamara, 1992, 1994 ; Neely, 1991 ; Sereno, 1991). Le principe de ce paradigme est de présenter un stimulus (dit stimulus amorce) juste avant le stimulus cible à traiter. On peut réaliser ce type de manipulation au sein de différents protocoles, comme la tâche de décision lexicale (cf. Figure 2.5, par exemple), la tâche de prononciation, etc. L'intérêt d'une telle approche est de pouvoir influencer différenciellement le traitement du stimulus cible par la présentation du stimulus amorce.

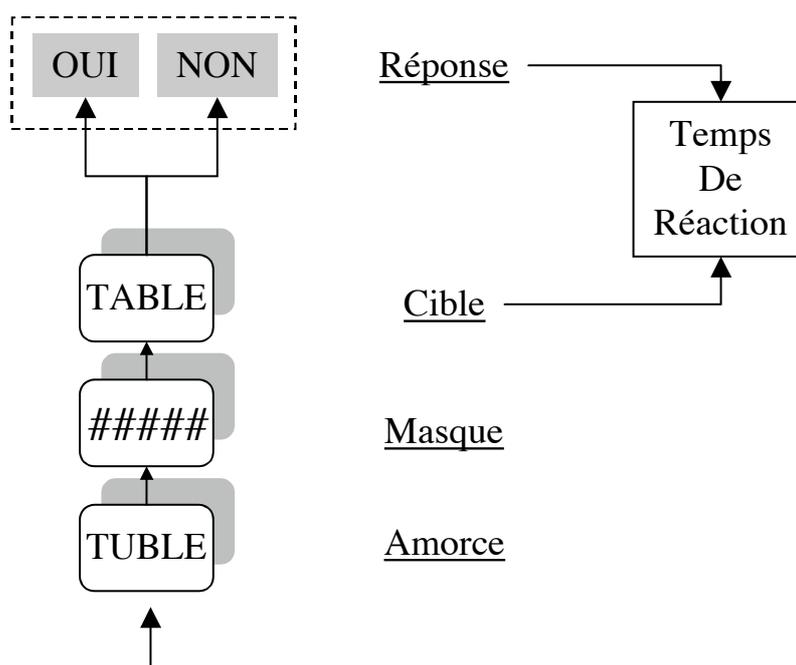


Figure 2.5. : Schéma d'une tâche de décision lexicale incluant une procédure d'amorçage.

Dans le paradigme d'amorçage, les manipulations expérimentales s'effectuent au niveau de certaines propriétés de l'amorce. On compare ainsi l'influence d'une amorce ayant une propriété donnée X par rapport à l'influence d'une amorce contrôle. L'amorce contrôle doit présenter les mêmes propriétés que l'amorce manipulée, moins la propriété X. En comparant

les performances dans ces deux conditions d'amorçage, on peut ainsi préciser le rôle de la propriété manipulée *X* dans les processus d'identification.

Une question importante dans le paradigme d'amorçage est de savoir si une amorce facilite ou inhibe le traitement du stimulus cible. Or, la comparaison à la condition contrôle ne permet pas de définir clairement le rôle facilitateur ou inhibiteur de l'amorce manipulée. En effet, considérons le cas où l'amorce ayant la propriété *X* conduit à un traitement du mot cible plus rapide que l'amorce contrôle. Faut-il alors déduire de ce résultat que l'amorce *X* facilite le traitement du mot cible ou bien que l'amorce contrôle inhibe ce traitement ? Afin de résoudre cette difficulté, Jacobs, Grainger et Ferrand (1995) ont proposé la technique d'amorçage incrémental. Le principe de cette technique est de présenter l'amorce à différents niveaux d'intensité lumineuse ou différents temps de présentation. Ainsi, pour la même amorce, on peut évaluer son effet sur le traitement du mot cible et, ce, pour différents niveaux de présentation de l'amorce. Aussi, en comparant chaque niveau de présentation de l'amorce à un niveau minimum où l'amorce est invisible pour le sujet, il est possible de dessiner l'évolution des effets facilitateurs ou inhibiteurs.

Le paradigme d'amorçage permet donc de tester, de manière indirecte, le rôle de certaines propriétés des mots sur leur identification. Toutefois, les conclusions qui peuvent être tirées de ce genre de manipulation restent assez générales. On est en mesure de discerner les facteurs qui facilitent ou inhibent le traitement d'un mot sans pour autant pouvoir déterminer précisément la nature de l'interaction entre l'amorce et la cible. C'est pourquoi les mesures enregistrées de cette interaction ne doivent certainement pas être considérées comme des mesures pures de facilitation ou d'inhibition de l'amorce sur la cible, mais comme les résultantes des interactions entre forces facilitatrices et inhibitrices. L'utilisation d'un tel paradigme doit donc être accompagnée d'une analyse précise de l'ensemble de ces interactions complexes.

## 2.2. Tâche LIP

Si l'on compare les tâches d'identification perceptive à la tâche de décision lexicale (TDL) et à la tâche de prononciation, on peut affirmer que ces tâches fournissent des mesures comportementales plus directes des processus d'identification (Snodgrass & Mintzer, 1993). En effet, l'objectif de la TDL est avant tout de discriminer deux populations de stimuli et non nécessairement, ou uniquement, de les identifier. De même, l'objectif de la tâche de pronon-

ciation est de dénommer une suite de lettres, c'est-à-dire produire une séquence sonore à partir d'une information visuo-orthographique. Il s'agit donc ici d'un transcodage d'une modalité à l'autre, transcodage qui suppose une reconnaissance du stimulus, mais pas uniquement. La TDL et la tâche de prononciation mêlent ainsi les processus d'identification à d'autres processus (décision/discrimination et production orale), ce qui demande de pouvoir distinguer, au niveau des indices comportementaux externes, la part attribuée aux processus d'identification de celle dédiée aux processus associés.

Les protocoles d'identification perceptive semblent moins sujets à ce genre de critique et les mesures qu'ils permettent d'enregistrer apparaissent plus directement liées aux processus d'identification. Pourtant, comme nous l'avons vu, on peut noter encore quelques limitations à ce type de protocole. Sur le plan de la dégradation du stimulus, les méthodes ajoutant du bruit visuel ou les méthodes ne fournissant qu'une information partielle utilisent des procédures aléatoires, lesquelles posent la question de la variabilité ajoutée, ou encore, de l'homogénéité de la perturbation visuelle d'un essai à l'autre. Sur le plan des variables dépendantes, ces protocoles fournissent dans l'ensemble des mesures discrètes des seuils d'identification. Ils ne renseignent pas, pour la plupart, ou de manière indirecte seulement, sur la composante temporelle des processus d'identification.

Afin de tenter de résoudre certaines difficultés décrites ci-avant, nous avons testé une nouvelle procédure expérimentale que l'on peut considérer comme une variante des tâches d'identification perceptive à présentation partielle : la tâche LIP (pour « Luminance Increasing Procedure »). Dans cette tâche, un essai débute par la présentation d'un écran noir sur lequel aucune information visuelle n'est donnée. Puis, progressivement et en temps réel, on augmente la luminance d'un mot situé au centre de l'écran. Ainsi, graduellement, l'information visuelle est disponible au sujet, lequel interrompt cette procédure dès qu'il identifie le stimulus présenté (Figure 2.6). Il peut alors entrer au clavier le mot identifié puis, passer à l'essai suivant.

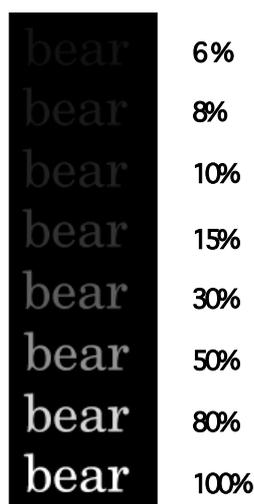


Figure 2.6. : Exemple d'augmentation de la luminance dans le protocole LIP.

La tâche LIP se différencie des autres protocoles d'identification perceptive à présentation partielle pour les raisons suivantes :

- premièrement, l'augmentation de l'information visuelle fournie au sujet se fait de manière homogène et non aléatoire. En effet, la dégradation du stimulus visuel ne provient pas de l'élimination ou du masquage de certaines parties du stimulus (sélectionnées au hasard), mais d'un masquage uniforme dû au peu de lumière émise par le stimulus (et, en conséquence, au contraste trop faible pour permettre de discerner des lignes ou des formes blanches sur un fond noir).
- deuxièmement, l'augmentation de la luminance est continue et n'est pas contrôlée par le sujet. Ce dernier ne peut qu'arrêter la procédure, qui se déroule en temps réel. On se trouve là dans les mêmes conditions de pression temporelle que dans les protocoles de TDL ou de prononciation : la tâche du sujet est d'identifier le stimulus et de répondre aussi rapidement que possible.
- troisièmement, l'augmentation continue de la luminance, interrompue par le sujet dès qu'il a identifié le stimulus, permet d'enregistrer un temps de réponse (TR). Ce TR correspond au temps écoulé entre le début de l'augmentation de luminance et l'interruption de la procédure par le sujet. Ce temps fournit une mesure du déroulement temporel des processus d'identification mis en œuvre dans ce protocole.
- quatrièmement, contrairement à la TDL, on peut faire l'hypothèse que l'identification du mot est directement reliée à la réponse fournie par le sujet. Ce protocole n'inclut donc pas

de choix binaire qui appelle des processus décisionnels se surajoutant aux processus perceptifs.

- enfin, la réponse produite est une réponse motrice simple et identique d'un essai à l'autre, contrairement à la tâche de prononciation où la réponse motrice est différente pour chaque mot prononcé. Grâce à cette constance dans la procédure de réponse, on peut faire l'hypothèse qu'aucune variance ajoutée n'est à envisager pour cette étape de traitement (ce qui n'est pas le cas pour la tâche de prononciation).

La tâche de LIP présente, comme on peut le constater, un certain nombre d'atouts qui en font un protocole, a priori, fort intéressant pour l'étude des processus de perception des mots en particulier, et de perception visuelle plus généralement. Néanmoins, en dépit de l'ensemble des avantages énumérés ici, nous ne pouvons pas savoir, a priori, si ce protocole est sensible aux facteurs linguistiques classiquement employés comme variables indépendantes en psycholinguistique. Pour cette raison, nous présentons maintenant une expérience préliminaire visant à répliquer un effet standard et généralement robuste dans le domaine de la perception des mots : l'effet de fréquence.

Nous reviendrons plus en détail sur l'effet de fréquence au chapitre suivant. Il nous suffit de dire ici qu'il s'agit de l'un des quatre effets majeurs rapportés dans le domaine de la perception des mots écrits, d'après la classification proposée par Jacobs et Grainger (1994). Cet effet indique que, dans la TDL, dans la tâche de prononciation et dans les tâches d'identification perceptives, les performances pour des mots de haute fréquence sont meilleures que pour des mots de basse fréquence. Dans l'expérience qui suit, nous testons la sensibilité de la tâche LIP face à une manipulation de la fréquence des mots à identifier. Nous détaillons également la procédure de LIP et les conditions expérimentales dans lesquelles cette tâche doit être réalisée.

### **2.2.1. Expérience 1 : Effet de fréquence dans la tâche de LIP**

#### Méthode

Sujets. Vingt-huit personnes du centre de Recherche en Neurosciences Cognitives participent à cette expérience. Ils sont tous de langue maternelle française et ont une vision normale ou corrigée.

Matériel expérimental . Les stimuli utilisés se divisent en trois groupes de fréquence : 26 mots de basse fréquence (BF), 26 mots de moyenne fréquence (MF) et 26 mots de haute fréquence (HF). La fréquence d'occurrence des mots provient de la base de données Brulex (Content, Mousty & Radeau, 1990). Les mots BF ont une fréquence d'occurrence inférieure à 10 par million (moyenne, 1.4). Les mots MF ont une fréquence d'occurrence située entre 10 et 100 par million (moyenne, 48.4). Les mots HF ont une fréquence d'occurrence supérieure à 100 par million (moyenne, 889.6). Tous les mots sont composés de 5 lettres. Les trois groupes de fréquence sont contrôlés pour le nombre de leur voisins orthographiques (c'est-à-dire le nombre de mots obtenus en changeant une lettre du mot cible, Coltheart, Davelaar, Jonasson, & Besner, 1977 ; cf. section 3.1.5). Les trois groupes ont ainsi, en moyenne, 1.96 voisins orthographiques par mot. Par ailleurs, 12 autres mots sont sélectionnés pour la phase d'entraînement (4 de chaque fréquence).

L'expérience est réalisée avec un ordinateur Compac Pentium Prolinea 575e et un écran couleur Compac 140. Les mots sont écrits en minuscules avec la typographie numéro 0 de BIOS, laquelle représente chaque lettre dans une matrice de 8\*14 pixels. L'expérience a lieu dans une pièce noire éclairée par une lampe placée derrière le sujet (l'utilisation d'une lampe est nécessaire pour permettre aux sujets de voir le clavier de l'ordinateur, sur lequel il doivent taper leur réponse).

Un facteur important à contrôler pour réaliser la tâche de LIP est le contraste de l'écran. Afin d'obtenir une augmentation progressive de l'information visuelle, le contraste est réglé au maximum. En effet, pour des valeurs de contraste faibles, nous obtenons des effets de seuil, c'est-à-dire non pas une augmentation progressive de l'information visuelle mais une augmentation en tout-ou-rien, où l'information visuelle apparaît entièrement en une seule fois. Ainsi, nous faisons en sorte que le fond de l'écran soit aussi noir que possible. Inversement, la luminance du stimulus est réglée à son maximum. Ces ajustements sont réalisés manuellement en tournant les boutons de luminance de l'écran et de luminance du texte à leur valeur maximale. Nous mesurons ensuite la luminance de l'écran à l'aide d'un luminance-mètre Minolta L5-100<sup>4</sup>. Cette mesure est réalisée dans les mêmes conditions lumineuses que celles de l'expérience. Le luminance-mètre est placé à un mètre de l'écran. Avec un écran complè-

---

<sup>4</sup> Merci à Daniel Mestre et Guillaume Masson pour leur aide dans la réalisation de cette mesure.

tement noir, nous obtenons une luminance de  $1.2 \text{ cd/m}^2$ . Avec un carré blanc placé au centre de l'écran, nous obtenons une valeur de luminance de  $107 \text{ cd/m}^2$ .

Il est à noter toutefois que l'objectif d'un tel protocole n'est pas d'obtenir des mesures de seuils d'identification absolus. En effet, la même expérience, réalisée dans les conditions expérimentales d'un autre laboratoire, ne donne pas les mêmes mesures et ce, à cause des variations possibles au niveau des conditions expérimentales (luminosité de la pièce, propriétés des écrans utilisés). En revanche, l'objectif est d'obtenir des mesures différenciées. C'est-à-dire, plutôt qu'une mesure absolue du temps moyen mis pour identifier des mots ayant telle propriété linguistique, il s'agit d'obtenir des mesures permettant de différencier deux populations de stimuli. L'accent est donc mis ici sur les différences obtenues au sein d'une manipulation donnée plutôt que sur des mesures absolues.

Procédure. Les sujets sont assis à 50 cm de l'écran d'ordinateur. Après avoir lu les consignes, ils débutent l'expérience avec 6 des 12 mots de la liste d'entraînement. Après une pause où nous répondons à leurs questions éventuelles, ils commencent l'expérience par les 6 mots restant de la liste d'entraînement, puis par les 78 mots de l'expérience, présentés dans un ordre aléatoire différent pour chaque sujet.

Chaque essai débute par la présentation d'un point de fixation (« + ») au centre de l'écran pendant une seconde. Le point de fixation est ensuite remplacé par le mot qui est écrit en noir et placé également au centre de l'écran. Le mot est donc totalement invisible à ce moment-là, le fond de l'écran étant lui-même noir. Puis, la luminance du mot est augmentée progressivement et, ce, grâce à une modification de sa couleur. Ceci est réalisé en changeant les valeurs des compteurs RVB (Rouge-Vert-Bleu) responsables de la coloration du mot. Chaque compteur peut ainsi prendre 64 valeurs entières différentes (de 0 à 63). Quand tous les compteurs sont à 0, la couleur du mot est noire, ce qui est le cas au début du processus d'augmentation de la luminance. Après 100 millisecondes (ms)<sup>5</sup>, le compteur Rouge est mis à 1 (les autres compteurs étant toujours à 0). Après 200 ms, les compteurs RVB sont à 1-1-0. Après 300 ms, RVB = 1-1-1 ; 400 ms, RVB = 2-1-1 ; etc. Dès que le sujet a identifié le stimulus, il interrompt l'augmentation de luminance en appuyant sur la barre ESPACE, ce qui

---

<sup>5</sup> Le délai de 100 ms est un délai arbitraire et une valeur de compromis. Un délai de 50 ms produisait un accroissement de la luminance trop rapide. Un délai de 200 ms rendait chaque essai beaucoup trop long.

entraîne le masquage du stimulus par la suite de symboles suivants : « ##### » (cette suite contenant deux caractères de plus que le nombre de lettres du mot cible). Un message s'inscrit alors à l'écran demandant au sujet d'entrer sa réponse (i.e., le mot qu'il a identifié) au clavier. Après quoi, le sujet passe à l'essai suivant en appuyant sur la touche RETURN. L'écran devient alors noir pendant 500 ms jusqu'à l'essai suivant. Pour chaque essai, on enregistre le temps de réponse qui correspond à l'intervalle de temps situé entre le début de l'augmentation de la luminance et l'appui sur la barre ESPACE. Ceci est réalisé à l'aide de la technique développée par Bovens et Brybaert (1990). L'expérience dure en moyenne 15 minutes.

### Résultats et Discussion

Les moyennes des temps de réponse (TR) et des pourcentages d'erreurs (%Err) pour les trois groupes de fréquence (HF, MF, et BF) sont présentées dans le Tableau 2.1. Les analyses réalisées à partir des données brutes et des données réduites (après exclusion des anticipations et des réponses très tardives ou « outliers ») donnent des résultats identiques. Seuls les résultats avec les données réduites sont rapportés ici. Nous obtenons ces données en excluant les TR supérieurs à 3 écarts types au-dessus et inférieurs à 2 écarts types au-dessous de la moyenne globale des réponses correctes par sujet. Des analyses de variances sont réalisées en prenant les sujets et les items comme facteurs aléatoires (Clark, 1973) et la fréquence d'occurrence comme facteur intra-sujet. De même, pour des raisons de visibilité des données, nous rapportons à la Figure 2.6 les différences en ms entre chaque condition de fréquence pour chaque sujet (ces différences sont ordonnées de la plus négative à la plus positive). Une telle représentation permet une visualisation des données au niveau des performances individuelles. Les temps de réponse et pourcentages d'erreurs pour chaque item sont donnés en Annexe I.

Comme indiqué au Tableau 2.1, nous obtenons une augmentation graduelle des temps de réponse à mesure que la fréquence d'occurrence diminue. Cet effet est significatif dans l'analyse par sujet et par item ( $F(2,27) = 49.96, p < .0001$  ;  $F(2,75) = 31.76, p < .0001$ ). Une différence significative de 86 ms est obtenue entre les conditions haute et basse fréquences ( $F(1,27) = 87.90, p < .0001$  ;  $F(1,50) = 55.45, p < .0001$ ) ainsi qu'entre les conditions moyenne et basse fréquences ( $F(1,27) = 59.14, p < .0001$  ;  $F(1,50) = 38.25, p < .0001$ ).

Une différence marginale est obtenue entre les conditions haute et moyenne fréquences par sujet ( $F(1,27) = 2.84, .05 < p < .10$ ) mais pas par item ( $F(1,50) = 1.59$ ). Nous obtenons la même tendance en effectuant une corrélation entre chaque moyenne de TR pour chaque item et les valeurs de fréquence de ces items :  $r = -.44$  ( $n=78$ ). Cette corrélation est plus importante en remplaçant la fréquence d'occurrence par son logarithme :  $r = -.66$ .

Tableau 2.1. : Moyennes des temps de réponse (TR) et des pourcentages d'erreurs (%Err) pour les trois groupes de fréquence : Haute-F, Moyenne-F, et Basse-F. Les erreurs standard sont données entre parenthèses.

	Fréquence d'occurrence		
	HF	MF	BF
TR (ms)	2521 (65)	2537 (67)	2607 (69)
% Err	.98 (.48)	1.93 (.58)	4.01 (.90)

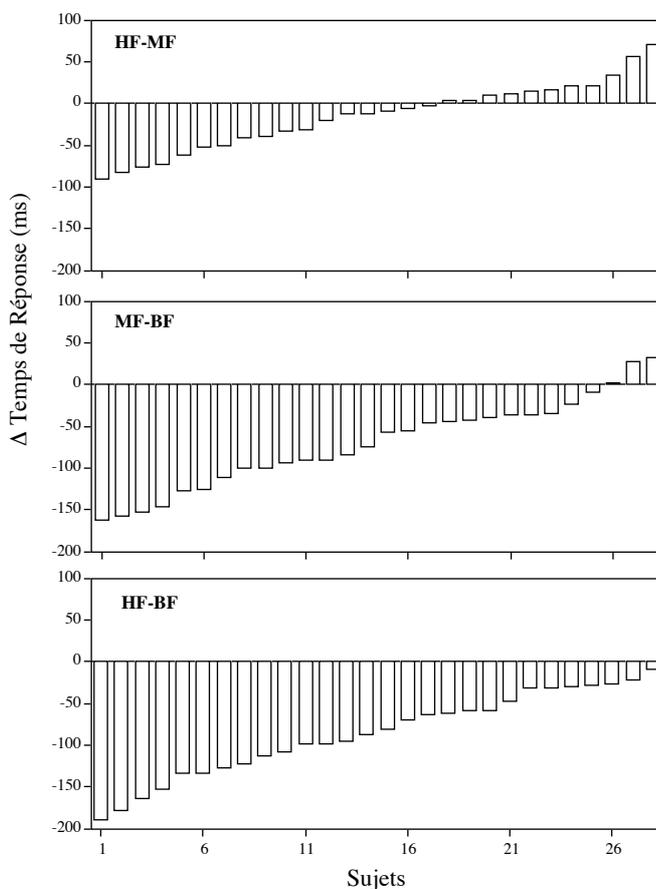
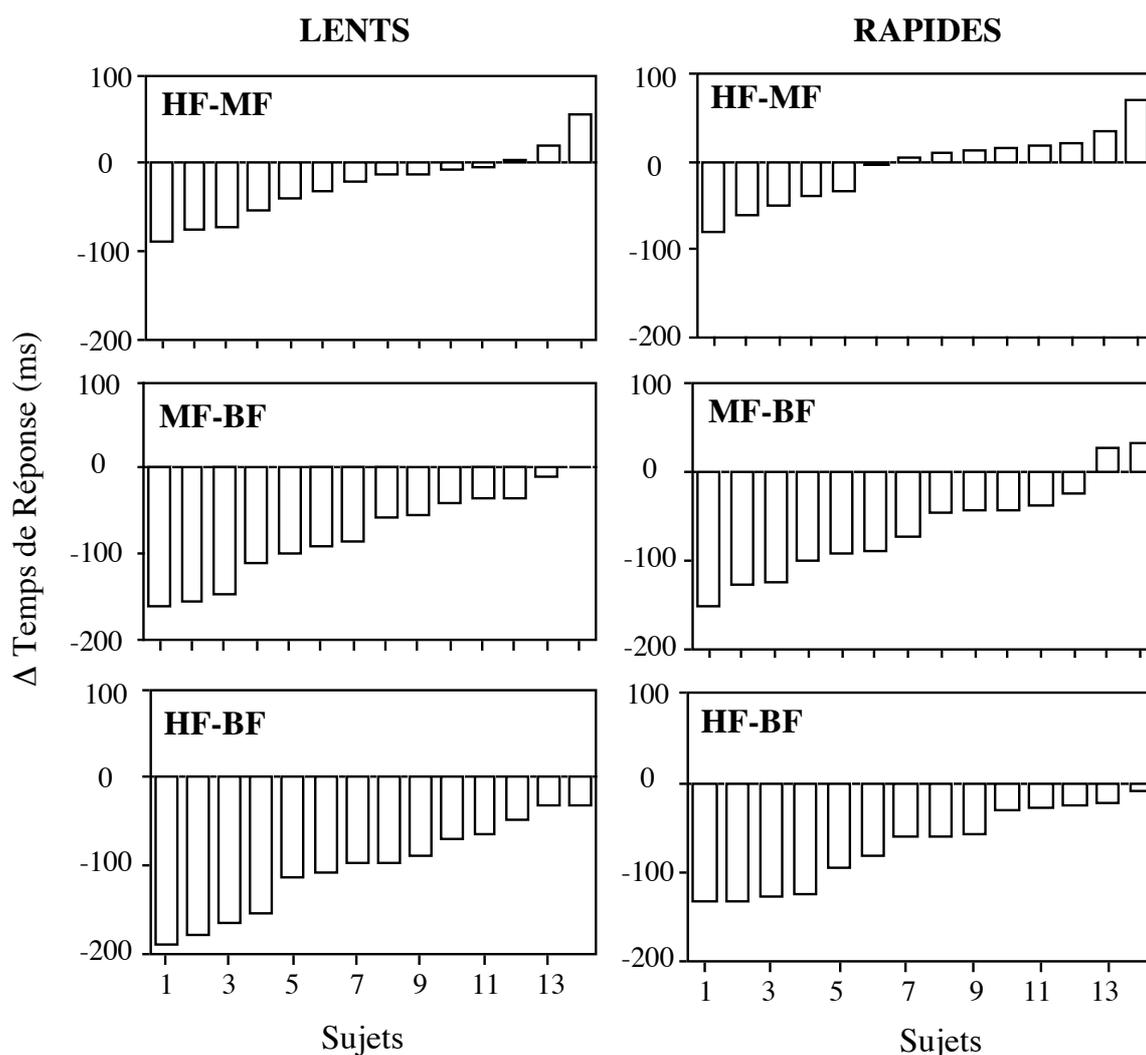


Figure 2.7. : Différences entre les trois conditions expérimentales (mots de Haute Fréquence : HF ; mots de Moyenne Fréquence : MF ; mots de Basse Fréquence : BF) pour chaque sujet.

Le même résultat graduel est observé pour les pourcentages d'erreurs ( $F(1(2,27) = 6.95, p < .01$  ;  $F(2(2,75) = 5.04, p < .01$ ). Ici aussi, seule les différences entre haute et basse, et moyenne et basse fréquences sont significatives. Une corrélation identique à celle réalisée ci-dessus, mais avec le pourcentage d'erreurs comme variable associée à la fréquence des items, indique également la même tendance :  $r = -.22$  (pour une mesure de la fréquence en occurrences par million) et  $r = -.33$  (en prenant le logarithme de la fréquence).

Si l'on considère maintenant les différences entre groupes de fréquence pour chaque sujet (Figure 2.7), on peut constater que l'ensemble des sujets présentent des temps d'identification moyens plus courts pour les mots de haute fréquence par rapport aux mots de basse fréquences. Le même résultat est obtenu au niveau des mots de basse vs. moyenne fréquence. La distribution des différences entre mots de haute et moyenne fréquences indique simplement une tendance globale à l'avantage des mots de haute fréquence.



**Figure 2.8.** : Chaque graphe représente des différences entre l'une des trois conditions expérimentales (mots de Haute Fréquence : HF ; mots de Moyenne Fréquence : MF ; mots de Basse Fréquence : BF) pour les sujets lents (à gauche) et rapides (à droite).

La Figure 2.8 présente les mêmes différences entre chaque groupe de fréquences mais en séparant cette fois les sujets rapides des sujets lents. Nous divisons pour cela simplement l'ensemble des sujets en deux populations sur la base de leur performance moyenne en TR. On obtient des TR moyens de 2267 ms pour les rapides et de 2844 ms pour les lents. De même, les pourcentages d'erreurs moyens sont de 2.1 pour les rapides et de 2.3 pour les lents, ce qui indique qu'il n'y a pas eu pour ces deux populations de déséquilibre significatif du rapport vitesse/exactitude de la réponse. Ces graphiques nous montrent que les sujets lents présentent un effet de la fréquence plus marqué par rapport aux sujets rapides. De plus, alors que la différence entre mots de haute et moyenne fréquences est cette fois plus claire pour les sujets lents, elle semble disparaître pour les sujets rapides. Cette analyse complémentaire suggère que le temps de réponse moyen des sujets conditionne la sensibilité des sujets à la manipulation de certaines variables. L'effet de fréquence en l'occurrence semble plus robuste pour des sujets ayant eu des temps de réponse moyens plus lents.

Sur le plan de la méthode, il est possible par ailleurs d'affiner encore la procédure d'augmentation de la luminance. Dans la Figure 2.9, on peut voir les valeurs de luminance obtenues lorsque l'on augmente tous les compteurs RVB en même temps (condition standard) par rapport à une augmentation d'un seul compteur (rouge, vert ou bleu). On voit ainsi que le compteur vert détermine à environ 80% la valeur de la luminance. On peut donc rendre encore plus graduelle l'augmentation de luminance et, ce, en manipulant le compteur vert de manière séparée des compteurs rouge et bleu.

En résumé, nous avons présenté ici une variante des protocoles d'identification perceptive à présentation partielle, la tâche de LIP. Nous avons énuméré un certain nombre d'arguments en faveur de ce protocole, soulignant son intérêt par rapport à la tâche de décision lexicale, la tâche de prononciation et d'autres protocoles d'identification perceptive. Enfin, nous avons rapporté une manipulation expérimentale de la fréquence d'occurrence des mots réalisée à l'aide de ce protocole. Nous montrons ainsi que ce protocole est sensible aux propriétés lexicales des stimuli linguistiques que nous avons utilisés. Pour l'ensemble de ces raisons, nous utiliserons principalement le protocole de LIP dans les expériences décrites dans la suite de cet exposé.

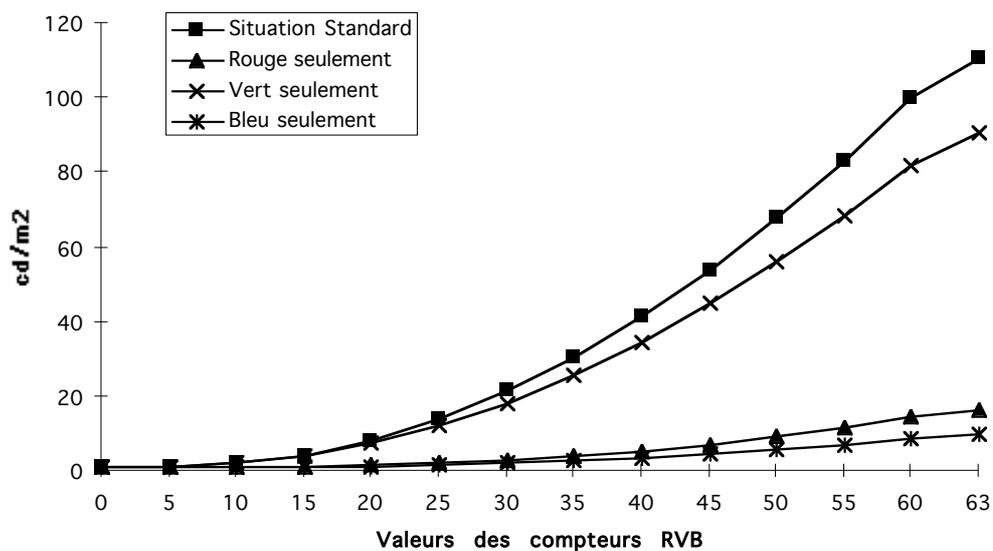


Figure 2.9. : Valeurs de luminance obtenues dans la condition standard où tous les compteurs sont augmentés simultanément et dans des conditions où chaque compteur est augmenté individuellement.

## 2.3. Discussion

Tous les protocoles que nous avons présentés, comme l'indique la Figure 2.10, font intervenir, d'une manière ou d'une autre, des processus de perception des mots. Il existe donc une sorte de recouvrement fonctionnel entre chacun de ces protocoles, recouvrement correspondant aux processus de reconnaissance des mots. Ainsi, il est possible de considérer chacun de ces protocoles comme une fenêtre particulière donnant un point de vue particulier sur les mêmes processus. La combinaison de ces différents points de vue permet un éclairage plus complet des processus étudiés. Toutefois, chaque protocole se distingue par un certain nombre de processus propres à la tâche. Ces processus peuvent interagir avec les processus de perception ou générer eux-mêmes des effets indépendants des processus de perception (ex. : dans la tâche de prononciation, les latences peuvent être liées aux mécanismes de production orale et non aux processus de reconnaissance, d'où l'utilisation de protocoles contrôles de prononciation différée). Nous reviendrons sur l'importance de spécifier et dissocier les processus que l'on étudie des processus liés aux méthodes que l'on utilise, lorsque nous aborderons la question de la modélisation des processus de reconnaissance des mots (Chap. 4).

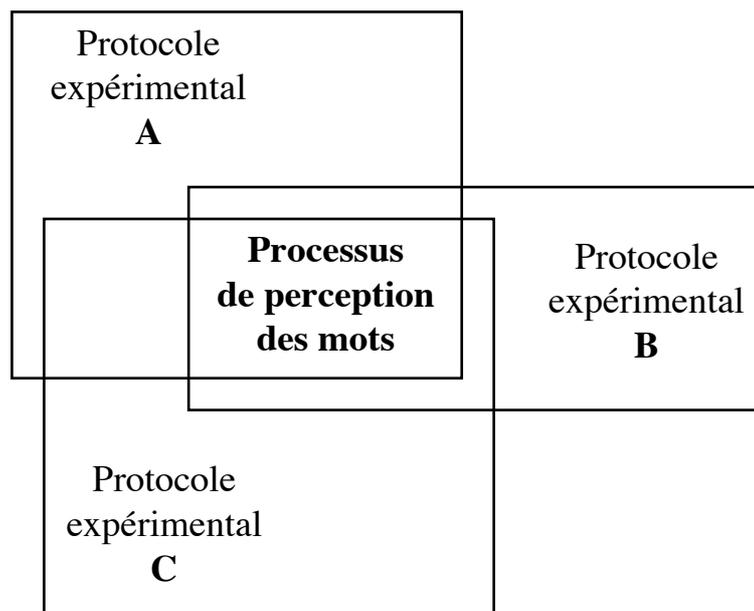
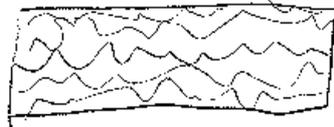


Figure 2.10. : Schéma représentant le principe de recouvrement fonctionnel (d'après Jacobs & Grainger, 1994).

D'une manière générale, on peut dire qu'il n'existe pas de méthode permettant une mesure "pure" des processus de reconnaissance des mots. Chaque protocole demande à être analysé précisément afin de spécifier le lien entre la mesure enregistrée et les processus étudiés. Si une variable indépendante X produit un effet sur la performance des sujets dans différents protocoles expérimentaux, ceci peut suggérer une influence directe de cette variable sur les processus communs de perception. Cet effet peut toutefois être plus ou moins important selon les protocoles (voir Chap. 3, effet de fréquence). Ce résultat fournit ainsi des renseignements sur les interactions entre processus étudiés et méthodes utilisées. Inversement, si une variable Y ne produit un effet que dans un seul protocole expérimental, cet effet peut être dû soit au protocole lui-même, soit à l'interaction entre le protocole et les processus de perception (c'est-à-dire, que cet effet peut être observé uniquement dans ce protocole). Ici encore, une analyse incluant une description fine des interactions entre méthode et processus est alors nécessaire. Ce point est illustré dans le chapitre suivant au regard de différents résultats expérimentaux obtenus dans différents protocoles.

# Chapitre 3

## Orthographe et phonologie



papa la frans à  
ganié j'esuis allé  
dans la piscine  
cé la piscine que tu  
vois la haut  
j'ai vu des  
plages de  
surf  
Maël

"papa la frans à ganié  
je suis allé dans la piscine  
cé la piscine que tu vois la haut  
j'ai vu des plages de surf  
Maël"

**B**ien comprendre les processus de perception implique de bien définir les propriétés des objets à percevoir. Ceci s'applique bien entendu à l'étude du système de lecture et plus particulièrement aux processus de reconnaissance des mots. Comme nous l'avons déjà dit, nous n'avons accès aux systèmes cognitifs que de manière indirecte. Nous ne pouvons envisager de comprendre la structure et la dynamique de ce système que sur la base d'inductions issues de manipulations expérimentales. Dans ces manipulations, on fournit au système un stimulus dont on spécifie au mieux les propriétés et on mesure des indices externes du traitement effectué sur ce stimulus. Aussi l'expérimentation nous permet-elle de trouver des relations parfois des lois reliant les propriétés du stimulus aux indices externes. Ces

relations peuvent être considérées à leur tour comme le reflet des propriétés du système ou, plus précisément, comme le reflet des interactions entre les propriétés du stimulus et les propriétés du système. Ainsi le degré de compréhension d'un système cognitif dépend du nombre des relations [(propriétés du stimulus) / (indices externes)] mises à jour au cours d'expérimentations. Toutefois, pour des stimuli aussi sophistiqués que des mots écrits, la nécessité de spécifier l'ensemble des propriétés de ces stimuli s'avère cruciale. En effet, afin qu'une relation, reliant les variations d'une certaine propriété du stimulus à des variations comportementales, soit validée, il faut s'assurer que ces variations ne sont pas confondues avec les variations d'une autre propriété. L'enjeu d'une manipulation expérimentale est donc de s'assurer que les relations établies entre une propriété du stimulus et une variable dépendante sont indépendantes de toute autre propriété de ce même stimulus.

Un mot écrit peut se décomposer suivant trois dimensions principales : orthographe, phonologie et sémantique. Au sein de chaque dimension, on peut définir un certain nombre de sous-composantes, indexant chacune une des propriétés des mots. Dans ce chapitre, nous présentons différentes propriétés ou variables orthographiques et phonologiques ainsi que les relations qu'entretiennent ces variables avec certaines variables expérimentales. Nous décrivons une série de résultats expérimentaux révélant l'influence de variables ortho-phonologiques lors de la reconnaissance d'un mot. Nous limitons ici notre examen à ces deux dimensions, l'analyse des dimensions sémantiques, ou encore morphologiques et syntaxiques, dépassant l'objectif du présent travail (pour des manipulations de ces dimensions, voir, pour la sémantique : Gernsbacher, 1984 ; James, 1978 ; Jastrzemski & Stanners, 1975 ; Jastrzemski, 1981 ; Millis & Button, 1989 ; Pavio & O'Neill, 1970 ; Richards, 1976 ; Rubenstein, Garfield, & Millikan, 1970 ; Rubenstein, Lewis, & Rubenstein, 1971 ; Whaley, 1978 ; pour la morphologie : Babin, 1996 ; Berent & Shimron, 1997 ; Colé, Segui, & Taft, 1997 ; Drews & Zwitserlood, 1995 ; Feldman & Bentin, 1994 ; Fowler, Napps, & Feldman, 1985 ; Frost, Forster, & Deutsch, 1997 ; Grainger, Colé, & Segui, 1991 ; Murrell & Morton, 1974 ; Taft & Forster, 1976 ; pour des manipulations des dimensions syntaxiques : Baayen, Dijkstra, & Schreuder, 1997 ; Deutsch, Frost, & Forster, 1998 ; Pulvermüller, Lutzenberger, & Birbaumer, 1995 ; Schmauder, 1996 ; Sereno, 1991 ; Sereno & Jongman, 1997). L'objectif d'une telle revue est de se placer à un niveau empirique et de déceler les résultats expérimentaux significatifs qui éclairent notre compréhension du système de lecture.

### 3.1. Variables visuo-orthographiques

Sur le plan visuel, et pour les systèmes d'écriture alphabétique, on définit un mot comme une séquence particulière de caractères alphabétiques. A partir de cette définition, on peut donc dériver un certain nombre de variables visuo-orthographiques spécifiant la position de chaque séquence de lettres possible dans l'espace multidimensionnel visuo-orthographique. Nous considérons ici des variables suivantes : la confusabilité des lettres, la visibilité des lettres, le nombre de lettres, la fréquence d'occurrence de certaines unités orthographiques et les voisins orthographiques.

#### 3.1.1. La confusabilité des lettres

Un mot est composé d'une certaine séquence de lettres. Aussi, la reconnaissance d'un mot est-elle dépendante, a priori, de la reconnaissance des lettres qui le composent et, donc, des propriétés de ces lettres. La question de la perception des lettres est, jusqu'à maintenant, abordée indépendamment de la question de la perception des mots. Peu ou pas d'études considèrent l'influence des propriétés structurales des lettres dans la reconnaissance des mots. D'ailleurs, comme nous le verrons au chapitre 4, la plupart des modèles de la perception des mots restent muets sur ces étapes de traitement précoces.

La plupart des études dans le domaine de la perception des lettres utilisent des protocoles d'identification perceptive où les sujets doivent identifier des lettres qui sont présentées tachistoscopiquement (e.g., Bouma, 1971 ; Fisher, Monty, Glucksberg, 1969 ; Geyer, 1977 ; Gilmore, Hersh, Caramazza, & Griffin, 1979 ; van der Heijden, Malhas, & van der Roovaart, 1984 ; Townsend, 1971). On obtient ainsi des matrices de confusions indiquant pour chaque lettre la répartition des réponses données. De ces matrices, on déduit trois résultats généraux : (1) certaines paires de lettres sont plus souvent confondues que d'autres ; (2) certaines lettres sont mieux identifiées que d'autres ; et (3) les erreurs de confusion entre deux lettres sont souvent asymétriques (Appelman & Mayzner, 1982). Les contributions théoriques réalisées à la suite de ces résultats expérimentaux suggèrent que la reconnaissance d'une lettre dépend (1) du nombre de traits visuels la constituant, (2) du nombre de traits partagés avec d'autres lettres, et (3) de la présence de traits distinctifs (Appelman & Mayzner, 1982 ; Keren & Rason, 1981 ; Krimhansl, 1978, 1982 ; Shimron & Navon, 1981 ; Tversky, 1977).

La perception d'une lettre est donc dépendante des propriétés de ses traits visuels. Selon cette analyse, on peut classer chaque lettre sur un continuum de confusabilité et prédire une relation inverse entre les performances d'identification d'une lettre et son degré de confusabilité.

Dans une étude récente, nous avons étendu un résultat obtenu pour la reconnaissance de lettres individuelles à la reconnaissance des mots (Ziegler, Rey, & Jacobs, 1998). Nous montrons que, dans une tâche d'identification perceptive (protocole de fragmentation de Snodgrass : Snodgrass & Mintzer, 1993 ; Snodgrass & Poster, 1992) le degré de confusabilité des lettres est négativement corrélé avec les performances d'identification des mots ( $r = -.42$ ). Dans ce protocole, un mot est présenté de manière hautement fragmentée et on demande au sujet de l'identifier. S'il n'y parvient pas, le sujet peut passer à un niveau de fragmentation moindre jusqu'à ce qu'il obtienne suffisamment d'indices visuels pour donner une réponse. Il existe huit niveaux de fragmentation et on mesure ainsi pour chaque mot le niveau auquel une identification correcte est donnée (Figure 3.1). Dans cette expérience, les sujets doivent identifier l'ensemble des mots français de 4 lettres ( $N = 580$ ). Nous obtenons alors des scores d'identification pour l'ensemble de ces 580 mots sur une moyenne de 10 sujets.

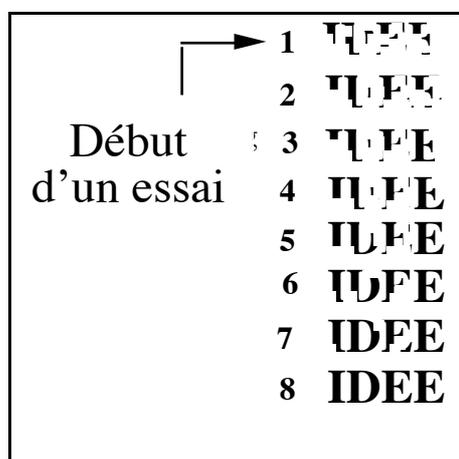
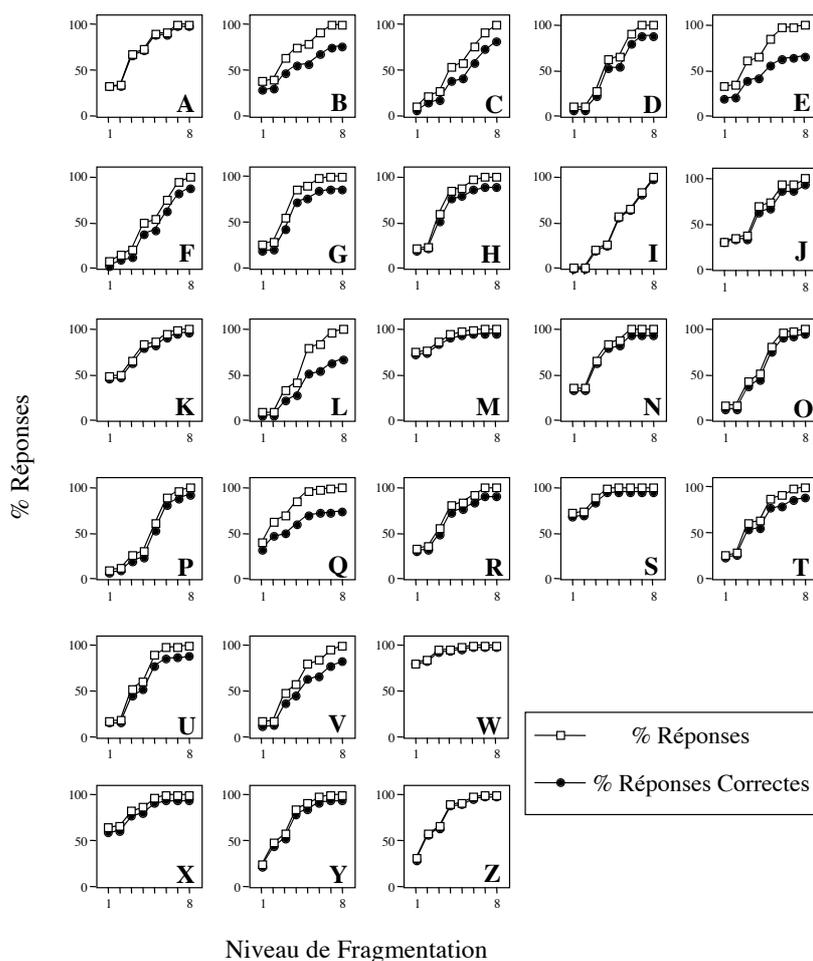


Figure 3.1. : Exemple du protocole de fragmentation. Les stimuli sont initialement présentés au niveau 1 de fragmentation (ici le mot IDEE). Les sujets démasquent le stimulus jusqu'à ce qu'ils puissent l'identifier.

Pour chaque mot, nous calculons ensuite un indice de confusabilité basé sur la confusabilité des lettres le composant. La confusabilité de chaque lettre est estimée empiriquement à partir d'une expérience d'identification de lettres réalisée avec le même protocole expérimental de fragmentation. Dans cette expérience, nous présentons chaque lettre 10 fois et à 10 sujets (soit 260 essais par sujet). Nous obtenons 100 seuils d'identification pour chaque lettre.

La Figure 3.2 résume les résultats obtenus dans cette expérience et montre les profils d'identification obtenus pour chaque lettre. On constate, par exemple, pour des lettres peu confusables comme M, S ou W, plus de 75% de réponses correctes dès le premier niveau de fragmentation et très peu d'erreurs d'identification ; pour des lettres très confusables comme I ou O, peu de réponses dès les premiers niveaux de fragmentation et peu d'erreurs ; pour un autre type de lettres confusables comme L ou Q, un plus grand nombre d'erreurs d'identification.



**Figure 3.2.** : Pourcentage de réponses et pourcentage de réponses correctes pour chaque niveau de fragmentation et pour les 26 lettres de l'alphabet, dans la tâche de fragmentation.

Nous déduisons de ces distributions un indice de confusabilité correspondant à la somme des bonnes réponses produites pour chaque niveau de fragmentation. Cet indice nous permet de calculer un score de confusabilité pour chaque mot en effectuant la somme des valeurs de confusabilité pour chaque lettre de ce mot. Nous normalisons finalement ces valeurs de 0 à 1, le mot ayant le score de confusabilité le plus élevé prenant la valeur 1. La Figure 3.3 illustre la

relation obtenue entre indice de confusabilité et niveau d'identification correcte du mot pour différentes classes de mots variant par leur indice de confusabilité.

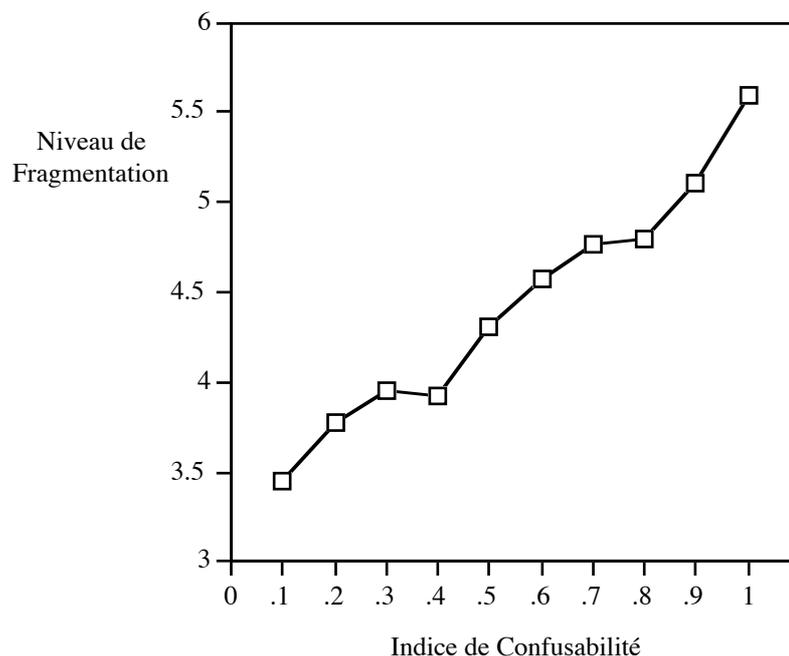


Figure 3.3. : Relation entre confusabilité des mots et seuils d'identification dans la tâche de fragmentation.

Cette étude souligne donc l'importance de facteurs visuels tels que la confusabilité des lettres dans les processus de reconnaissance des mots. Toutefois, cette étude est réalisée avec un protocole d'identification perceptive où l'information visuelle sur le stimulus est partielle. Il est probable que des facteurs comme la confusabilité des lettres ont un rôle exagéré dans ce type de protocole expérimental par rapport à des protocoles où la présentation du stimulus n'est pas altérée et le temps de présentation n'est pas limité. Aussi, la forte corrélation obtenue dans cette expérience entre confusabilité et seuil d'identification est-elle très certainement dépendante de la tâche utilisée. Il reste à déterminer dans quelle mesure la confusabilité des lettres influence les processus de reconnaissance des mots et, ce, dans des protocoles où l'information visuelle est complète.

### 3.1.2. La visibilité des lettres

En raison de la baisse uniforme de l'acuité visuelle du centre de la rétine vers sa périphérie (Olzak & Thomas, 1986), la visibilité d'une lettre est fonction de la distance séparant cette lettre du centre de la rétine, c'est-à-dire de son excentricité (Anstis, 1974 ; Bouma, 1970 ; Nazir, Heller, & Sussmann, 1992 ; Nazir, Jacobs, & O'Regan, 1998 ; Nazir, O'Regan, &

Jacobs, 1991 ; Townsend, Taylor, & Brown, 1971). La probabilité de reconnaître une lettre placée dans une suite de lettres (ne formant pas un mot) diminue donc de manière linéaire avec l'augmentation de l'excentricité rétinienne (Townsend et al., 1971). Par ailleurs, à excentricité égale, une lettre est mieux perçue dans le champ visuel droit que dans le champ visuel gauche (Bouma, 1973 ; Bouma & Legein, 1977 ; Nazir et al., 1991).

La position du regard dans un mot détermine la visibilité de chaque lettre et en conséquence la probabilité de reconnaître ce mot. Plusieurs études indiquent que la probabilité de reconnaître un mot est maximale lorsque le regard se trouve à gauche du centre du mot (McConkie, Kerr, Reddix, Zola, & Jacobs, 1989 ; O'Regan, Lévy-Schoen, Pynte, & Brugailère, 1984 ; O'Regan & Jacobs, 1992 ; Radach & Kempe, 1993 ; Underwood, Clews, Everatt, 1990 ; Vitu, O'Regan, & Mittau, 1990). Cette probabilité décroît de manière asymétrique au fur et à mesure que le regard s'éloigne de cette position optimale (cf. Figure 3.4).

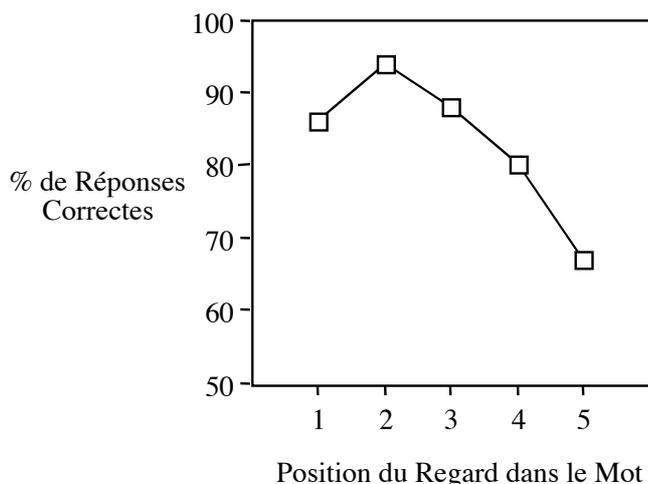


Figure 3.4. : Pourcentage de réponses correctes, dans une tâche de décision lexicale, en fonction de la position du regard dans le mot (d'après Nazir, 1993).

La position du regard dans un mot détermine donc la visibilité de chaque lettre et la probabilité de reconnaissance du mot. On voit ainsi que plus un mot contient un grand nombre de lettres, plus faible sera la visibilité des lettres les plus éloignées du point de fixation du mot. Inversement, alors que la visibilité de certaines lettres diminue si l'on augmente le nombre de lettres, la quantité d'informations fournie au système de reconnaissance des mots augmente. Le manque de visibilité de certaines lettres est alors compensé par une plus grande quantité d'information. L'informativité des lettres les plus visibles (i.e., situées le plus près du point de fixation) est un facteur déterminant pour la reconnaissance d'un mot puisque elle va per-

mettre de lever l'ambiguïté des lettres éloignées du point de fixation (Brybaert, Vitu, & Schroyens, 1996).

La visibilité des lettres par rapport à la position du regard dans un mot impose donc des contraintes visuelles de bas niveau aux processus de perception des mots écrits (pour une revue abordant l'effet de la position du regard d'un point de vue développemental et neuropsychologique, voir Aghababian, 1998 ; Aghababian & Nazir, soumis ; Montant, 1998 ; Montant & Nazir, 1998). Toutefois, l'importance de ce facteur est également très certainement liée au type de protocole expérimental utilisé. En effet, les effets de la position du regard dans un mot sont obtenus dans des expériences où les mots sont présentés très rapidement et où la position du mot sur la rétine est manipulée. On peut donc considérer que pour des mots composés de peu de lettres (4-6 lettres) et présentés systématiquement en position centrale, ce facteur de visibilité des lettres est négligeable (Nazir, 1993, Figure 3). Dans les expériences présentées dans ce travail, la taille des stimuli employés ne dépassera pas 6 lettres et leur présentation sera toujours centrée. On pourra donc faire l'hypothèse d'une influence négligeable de la visibilité des lettres sur les performances d'identification.

### **3.1.3. Le nombre de lettres**

Du fait des nombreux paramètres à contrôler dans une expérience impliquant un traitement des mots, la plupart des études en psycholinguistique limitent leurs investigations à des mots courts de 4-5 lettres par exemple. Relativement peu d'études se sont intéressées à la question de l'influence du nombre de lettres sur la reconnaissance d'un mot. Une des raisons expliquant cette carence vient du fait que la taille d'un mot est confondue avec un grand nombre d'autres variables, rendant une manipulation « pure » de la longueur des mots très difficile (Frauenfelder, Baayen, Hellwig, & Schreuder, 1993 ; Kroll, cité dans Henderson, 1982 ; Landauer & Streeter, 1973 ; Pisoni, Nusbaum, Luce, & Slowiaczek, 1985).

Les études rapportant une manipulation de la longueur des mots indiquent dans l'ensemble que le temps de traitement d'un mot augmente avec le nombre de lettres. Ce résultat est cependant à nuancer selon le type de protocole expérimental utilisé. Steward, James et Gough (1969 ; cité dans Gough, 1972) obtiennent une augmentation de 10-20 ms par lettre à la fois dans la tâche de décision lexicale (TDL) et la tâche de prononciation et ce, pour des mots de 3 à 10 lettres. Hudson et Bergman (1985) trouvent un effet de 3.2 ms par lettre

dans la tâche de prononciation. O'Regan et Jacobs (1992) obtiennent un effet de 15-19 ms par lettre à la fois en TDL et en tâche de prononciation lorsque le regard se trouve au début du mot. Cet effet est de 8-10 ms par lettre en TDL et de 13-23 ms par lettre en tâche de prononciation lorsque le mot est présenté en position centrale. Il faut noter que, dans cette condition de présentation centrale, l'effet de longueur n'apparaît que pour des mots ayant une longueur supérieure à 7 lettres. Plus récemment, Weekes (1997) obtient un effet de 11.3 ms par lettre dans la tâche de prononciation pour des mots de basse fréquence et de 19.6 ms par lettre pour des non-mots. Dans une seconde expérience, où les mêmes mots sont utilisés dans un tâche de prononciation différée (cf. Chapitre 2), Weekes soustrait les temps obtenus dans cette tâche à ceux obtenus dans la première expérience et obtient un effet de 9.1 ms par lettre pour les mots peu fréquents et de 18.2 ms par lettre pour les non-mots. Ce résultat lui permet de rejeter l'hypothèse que l'effet du nombre de lettres soit dû à des différences dans l'articulation des mots présentés dans la première expérience. Enfin, deux autres études présentent un effet de la longueur des mots dans la tâche de prononciation et aucun effet dans la TDL. Frederiksen et Kroll (1976), avec des mots de 4-6 lettres, observent un effet de 20 ms par lettre en tâche de prononciation seulement. Richardson, (1976) avec des mots de 5-11 lettres, trouve également un effet du nombre de lettres dans la tâche de prononciation uniquement.

L'ensemble de ces expériences montrent donc que le temps de traitement d'un mot augmente avec le nombre de lettres. Cependant, l'influence du nombre de lettres sur le temps d'identification d'un mot semble interagir avec un autre indice lexical qui est la fréquence d'occurrence des mots. Les mots de basse fréquence semblent plus sensibles au facteur nombre de lettres que les mots de haute fréquence (O'Regan & Jacobs, 1992 ; Weekes, 1997). Enfin, il apparaît que l'effet de longueur est moins marqué pour des mots contenant peu de lettres (4-6) (O'Regan & Jacobs, 1992). De ce fait, on considère généralement les mots de 4 et 5 lettres comme des populations homogènes du point de vue de la longueur.

### **3.1.4. La fréquence d'occurrence**

La fréquence d'occurrence est une mesure objective permettant d'estimer le nombre de fois qu'un lecteur a rencontré un mot donné. Cette estimation correspond au nombre d'occurrences d'un mot dans une large base de données comprenant une série de textes va-

riés (Baayen, Piepenbrock, & van Rijn, 1993 ; Content, Mousty, & Radeau, 1990 ; Kucera & Francis, 1967 ; Thorndike & Lodge, 1944). De nombreuses études ont testé l'influence de cette mesure sur les performances d'identification des mots et rapportent dans l'ensemble ce que l'on appelle un « effet de fréquence », c'est-à-dire de meilleures performances dans la traitement de mots de haute fréquence par rapport à des mots de basse fréquence (pour une revue, voir Monsell, 1991 ; Monsell, Doyle, & Haggard, 1989). Cet effet de fréquence est un effet robuste, avec une amplitude de l'effet plus ou moins importante selon les catégories de fréquence sélectionnées et les protocoles expérimentaux utilisés (Forster & Chambers, 1973 ; Frost, Katz, & Bentin, 1987 ; Monsell, 1991 ; Monsell et al., 1989 ; O'Regan & Jacobs, 1992 ; Richardson, 1976 ; Ziegler et al., 1998). Nous présentons ici seulement quelques résultats à titre d'exemples, l'effet de fréquence méritant un exposé à lui seul étant donné le nombre d'études qui ont manipulé ce facteur.

Parmi les premières études rapportant une manipulation de la fréquence d'occurrence des mots, on peut citer le travail de Howes et Solomon (1951). Ces auteurs présentent des mots à l'aide d'un tachistoscope et mesurent les temps de présentation à partir desquels les sujets peuvent identifier correctement les mots présentés. Ils obtiennent ainsi des coefficients de corrélations de  $-.68$  à  $-.79$  entre les seuils d'identification des mots et le logarithme de leur fréquence d'occurrence (la corrélation est négative car les seuils sont plus bas pour les mots de haute fréquence). Forster et Chambers (1973), utilisant des mots de très basse et très haute fréquence, obtiennent un effet de 71 ms dans la tâche de prononciation et de 196 ms dans la TDL. Frederiksen et Kroll (1976) observent un effet de fréquence de 35 ms en tâche de prononciation et de 90 ms en TDL (un résultat similaire est obtenu par O'Regan et Jacobs, 1992). De même, Frost et al. (1987) trouvent également un effet de fréquence différentiel selon le protocole expérimental, c'est-à-dire des différences de 20-60 ms pour la tâche de prononciation et des différences de 80-160 ms en TDL. Ce résultat est répliqué en différentes langues (Hébreu, Anglais et Serbo-Croate). Toutefois, comme le montrent Stone et Van Orden (1993), la taille de l'effet de fréquence en TDL dépend du type de non-mots employés dans l'expérience : ils obtiennent un effet de fréquence de 36 ms en TDL lorsque les non-mots sont des suites de lettres illégales, un effet de 76 ms en présence de non-mots légaux et de 159 ms en présence de pseudohomophones. La taille de l'effet de fréquence en TDL apparaît donc fortement dépendant des non-mots employés.

Dans l'ensemble, ces études confirment la présence systématique d'un effet de la fréquence d'occurrence sur les performances des sujets. Par ailleurs, certains auteurs suggèrent que la familiarité subjective d'un mot est un meilleur indice pour mesurer des effet de fréquence (Gernsbacher, 1984). Suivant cette procédure, on demande simplement à des sujets de donner une valeur de familiarité pour chaque mot sur une échelle de 1 à 5 par exemple (Frost et al., 1987). Bien que fréquence d'occurrence et familiarité subjective semblent être fortement corrélées (Gordon, 1985), Gernsbacher (1984) suggère que la familiarité subjective donne une estimation de la familiarité d'un mot plus précise que la fréquence d'occurrence.

D'autres mesures manipulent le facteur "fréquence d'occurrence" pour des unités orthographiques plus petites que le mot comme la fréquence des lettres (Grainger & Jacobs, 1993 ; Ziegler, Rey, & Jacobs, 1998) ou encore, la fréquence des bigrammes ou des trigrammes (Biederman, 1966 ; Broadbent & Gregory, 1968 ; Carreiras, Alvarez, & De Vega, 1993 ; Gernsbacher, 1984 ; Humphreys, Evett, & Quinlan, 1990 ; Massaro & Cohen, 1994 ; McClelland & Johnston, 1977 ; Mozer, 1987 ; Nuërk, Rey, Graf, & Jacobs, soumis ; Rice & Robinson, 1975 ; Rumelhart & Siple, 1974 ; Seidenberg & McClelland, 1989 ; Ziegler et al., 1998). Les résultats de ces expériences ne permettent néanmoins pas de conclure très clairement sur le rôle de ces différents indices dans la reconnaissance des mots. Concernant l'effet de la fréquence des bigrammes, Broadbent & Gregory (1968) et Rice & Robinson (1975) observent un effet de fréquence inverse (expliqué selon Gernsbacher, 1984, par un mauvais contrôle de la familiarité des mots). Par ailleurs, Biederman (1966), Rumelhart et Siple (1974), Gernsbacher (1984), et Massaro et Cohen (1994), obtiennent un effet facilitateur de la fréquence des bigrammes. Toutefois, Gernsbacher (1984) observe une interaction avec la fréquence lexicale, les mots de haute fréquence lexicale ne présentant pas d'effet de la fréquence des bigrammes. De même, Massaro et Cohen (1994) n'observent un effet de la fréquence des bigrammes que dans la TDL. Enfin, Carreiras et al. (1993), McClelland et Johnston (1977), Nuërk et al. (soumis) et Ziegler et al. (1998) rapportent des effets nuls pour cette variable sur la performance des sujets. En conclusion, ces mesures de fréquence d'unités sous-lexicales orthographiques présentent des relations encore peu claires vis-à-vis des indicateurs comportementaux. Ceci laisse supposer que ces facteurs ne sont pas des variables pertinentes pour le système de reconnaissance des mots comme nous le suggérerons plus tard.

En résumé, la fréquence d'occurrence ou la familiarité d'un mot sont de bons prédicteurs de la performance des sujets. L'effet de fréquence constitue l'un des quatre phénomènes empiriques majeurs pour l'étude des processus de reconnaissance des mots (d'après la classification de Jacobs et Grainger, 1994). En revanche, il ne se dégage pas de relation claire entre les mesures de fréquence appliquées à des unités orthographiques et les performances de reconnaissance des mots dans différents protocoles.

### **3.1.5. Les voisins orthographiques**

Dans un article de 1977, Coltheart, Davelaar, Jonasson, et Besner proposent de définir le voisinage orthographique d'un mot comme l'ensemble des mots de même longueur pouvant être obtenus en remplaçant une lettre par une autre et, ce, à la même position dans le mot. Par exemple, les mots BOIRE, FOIRE, VOIRE, et PAIRE sont autant de voisins orthographiques du mot POIRE. Dans cette même étude, Coltheart et al. manipulent dans une TDL le nombre de voisins orthographiques (VO) pour deux populations de mots et de non-mots (un groupe ayant peu de VO : 0-4 ; l'autre beaucoup de VO : 6-20) et obtiennent un effet inhibiteur du voisinage orthographique uniquement pour les non-mots : les non-mots ayant beaucoup de voisins orthographiques sont rejetés plus tardivement. Par la suite, plusieurs études ont exploré davantage le rôle du voisinage orthographique en manipulant deux indices liés au voisinage : 1) la présence dans le voisinage orthographique de voisins de plus haute fréquence et 2) la densité du voisinage (c'est-à-dire, le nombre de voisins orthographiques d'un mot).

Ainsi, dans un article de 1989, Grainger, O'Regan, Jacobs, et Segui montrent que l'élément critique dans le voisinage orthographique d'un mot est la présence d'un voisin dont la fréquence d'occurrence est supérieure à celle du mot cible. Ils obtiennent, dans une tâche de décision lexicale, des latences plus longues pour des mots ayant un voisin orthographique de plus haute fréquence (VOHF) que pour des mots n'ayant pas de VOHF. Cette effet est répliqué dans diverses études et dans différentes langues (Hollandais, Anglais, Français et Espagnol), toujours en utilisant la TDL (Carreiras, Perea, & Grainger, 1997 ; Grainger, 1990 ; Grainger & Jacobs, 1996 ; Grainger & Segui, 1990 ; Grainger et al., 1989 ; Grainger, O'Regan, Jacobs, & Segui, 1992 ; Huntsman & Lima, 1996 ; Perea & Pollatsek, 1998). Néanmoins, deux études réalisées en Anglais et utilisant la TDL n'obtiennent pas ce résultat (Forster & Shen, 1996 ; Sears, Hino, & Lupker, 1995), observant des effets nuls ou facilita-

teurs du voisinage. Par ailleurs, le même effet inhibiteur de la fréquence des voisins orthographiques est obtenu en mesurant les temps de fixation du regard sur un mot (Grainger et al., 1989 ; Perea & Pollatsek, 1998) et également dans des protocoles d'identification perceptive (Grainger & Jacobs, 1996 ; Grainger & Segui, 1990 ; Snodgrass & Mintzer, 1993 ; Ziegler et al., 1998). Dans la tâche de prononciation, la présence de voisins orthographiques de plus haute fréquence semble avoir un effet facilitateur sur les latences de prononciation (Grainger, 1990 ; Sears et al., 1995).

Concernant la densité du voisinage orthographique, les différentes études ayant manipulé ce facteur indiquent que des mots avec un grand voisinage orthographique ont des temps de réponses plus courts que des mots ayant peu de voisins. Cet effet facilitateur du voisinage est observé dans la TDL (Andrews, 1989, 1992 ; Forster & Shen, 1996 ; Johnson & Pugh, 1994 ; Laxon, Coltheart, & Keating, 1988 ; Sears et al., 1995) et semble interagir avec la fréquence des mots (les effets sont plus marqués pour les mots de basse fréquence), le type de non-mots, et les consignes données aux sujets portant l'attention soit sur la rapidité, soit sur l'exactitude des réponses (Andrews, 1989 ; Grainger & Jacobs, 1996 ; Sears et al., 1995). De même, un effet facilitateur du voisinage orthographique est également rapporté dans la tâche de prononciation (Andrews, 1989, 1992 ; Peereman & Content, 1995 ; Sears et al., 1995).

L'ensemble de ces résultats expérimentaux indiquent que le voisinage orthographique des mots semble être un facteur critique pour la reconnaissance des mots écrits. Toutefois, le rôle de cette variable paraît varier selon les protocoles et conditions expérimentales utilisées. Alors que la présence de voisins orthographiques de plus haute fréquence semble ralentir l'accès au mot à traiter et, ce, dans des tâches demandant une identification du mot (comme les tâches d'identification perceptive), le nombre de voisins orthographiques semble faciliter le traitement des mots dans la TDL et la tâche de prononciation.

### **3.1.6. Résumé**

Nous avons présenté jusqu'ici différentes études testant le rôle de différentes variables orthographiques sur les processus de reconnaissance des mots : la confusabilité des lettres, la visibilité des lettres, le nombre de lettres, la fréquence d'occurrence, et le voisinage orthographique. Des manipulations expérimentales de ces facteurs indiquent qu'ils influencent les

processus de traitement des mots écrits. Ces phénomènes empiriques fournissent autant de contraintes pour l'élaboration de modèles du système de reconnaissance des mots. Certains d'entre eux demeurent néanmoins encore discutables et d'autres études doivent être menées pour trouver une réponse claire quant à leur rôle. Nous pouvons cependant énumérer ces différentes contraintes :

- effet de fréquence : les mots les plus fréquents/familiers sont identifiés plus rapidement que les mots peu fréquents. Cet effet est robuste mais modulable selon certains critères expérimentaux.

- effet du nombre de lettres : on observe des différences dans le temps de traitement des mots si ces mots diffèrent d'au moins 2 lettres. Ces différences seront plus importantes pour des mots peu fréquents.

- effet du voisinage orthographique : un mot avec un grand nombre de voisins semble être traité plus rapidement dans certains protocoles (TDL, prononciation). Un mot ayant au moins un voisin de plus haute fréquence semble être identifié moins rapidement qu'un mot sans voisin de plus haute fréquence. Ces deux effets semblent très dépendants des choix expérimentaux et appellent des analyses prenant en compte ces choix (cf. Grainger & Jacobs, 1996).

- effet de la visibilité des lettres : selon l'endroit où le regard se pose dans le mot, certaines lettres sont de ce fait moins visibles que d'autres, limitant ainsi l'information fournie au système de lecture. Dans des conditions de présentation centrale et pour des mots courts, cet effet semble pouvoir être négligé.

- effet de la confusabilité des lettres : plus les lettres composant un mot sont confusables avec d'autres lettres, plus il faut de temps au système de lecture pour clarifier cette information. Cet effet n'est cependant pas encore mis en évidence dans des protocoles où l'information visuelle n'est pas perturbée (TDL, tâche de prononciation).

### 3.2. Variables phonologiques

Sur le plan phonologique, un mot se définit par une séquence de phonèmes donnée (Clements, 1985 ; Jakobson, Fant, & Halle, 1952 ; pour une vue alternative<sup>6</sup>, voir Browman &

---

<sup>6</sup> Contrairement à l'argumentation de Clements (1985), qui considère la phonologie comme une suite linéaire d'unités phonémiques, ces auteurs défendent l'idée d'une phonologie non linéaire, dont les éléments de base

Goldstein, 1986 ; Goldsmith, 1976, 1990). Comme les lettres pour l'orthographe, les phonèmes sont les plus petits éléments distinctifs constituant la représentation phonologique d'un mot. Parmi l'ensemble des phonèmes, on distingue généralement trois catégories : les voyelles (V), les consonnes (C) et les semi-consonnes (Y). Aussi, pour prendre un exemple, la représentation phonologique du mot VOIR est : /vwar/, ou encore, du point de vue de la succession des voyelles/consonnes/semi-consonnes : CYVC (le phonème /w/ étant une semi-consonne).

On peut segmenter également une séquence de phonèmes en syllabes. Classiquement, le nombre de syllabes est équivalent au nombre de phonèmes voyelles. Une syllabe se compose ainsi d'un noyau, la voyelle, auquel peuvent être associées une ou des consonnes se situant avant ou après la voyelle. Par exemple, le mot SORTIR se compose de la séquence de phonèmes : /sOrtir/, laquelle peut se décomposer en deux syllabes : /sOr-tir/. De même, la structure intra-syllabique de ce mot sera : CVC-CVC.

On voit donc que chaque mot a une structure phonologique particulière. Cette structure est indépendante du nombre de lettres composant la représentation d'un mot. A titre illustratif, le tableau 3.1 présente l'ensemble des structures phonologiques existantes pour les mots français monosyllabiques de 5 lettres. Comme on peut le voir, il existe une hétérogénéité assez importante du point de vue de la structure phonologique de ce sous-ensemble de mots ayant pourtant un même nombre de lettres.

Tableau 3.1 : Liste des différentes structures phonologiques pour l'ensemble des mots français monosyllabiques de 5 lettres (N=794) de BRULEX (Content et al., 1990). C = consonne ; V = voyelle ; Y = semi-voyelle.

Structure phonologique	nombre de phonèmes	nombre d'occurrences
CVC	3	391
CCVC	4	139
CYVC	4	73
CYV	3	57
CCV	3	41
CV	2	32
CCYV	4	12
CVCC	4	11

auraient des propriétés temporelles spécifiques et correspondraient aux gestes articulatoires. Toutefois, la plupart des études sur la lecture gardent la segmentation classique en unités phonémiques, la pertinence de cette vue alternative pour les processus de lecture n'ayant pas encore été établie.

---

YVC	3	7
CCVCC	5	6
VC	2	6
CVY	3	4
CYVCC	5	3
YVCC	4	3
CVCVC	5	1
CVCCV	5	1
CVCCC	5	1
CCVYC	5	1
CCCVC	5	1
CYVY	4	1
CCCV	4	1
YV	2	1
V	1	1

---

Comme nous l'avons déjà dit au chapitre 1, un grand nombre d'études ont montré depuis une vingtaine d'années l'importance et le rôle de la phonologie pour la reconnaissance visuelle des mots. La plupart de ces études manipulent certaines propriétés phonologiques de mots ou non-mots et observent les modifications comportementales associées à ces manipulations dans divers protocoles expérimentaux. Nous résumerons ici les principaux résultats obtenus à la suite de ces expériences. Nous présenterons des études (1) utilisant la propriété d'homophonie, (2) portant sur la propriété de régularité/consistance ortho-phonologique et (3) questionnant le rôle de la structure phonologique des mots.

### 3.2.1 Homophonie

Orthographe et phonologie n'entretiennent pas une relation isomorphe. En ce sens, il n'existe pas toujours une et une seule manière de prononcer un mot écrit, comme il n'existe pas non plus une et une seule manière d'écrire un mot prononcé. Ainsi, si on examine le lexique Français de 5 lettres (N = 794 ; Content et al., 1990), on peut trouver 30 paires de mots ayant la même représentation phonologique pour une représentation orthographique différente. A titre d'exemple, citons le verbe TAIRE et le substantif TERRE. Ces mots s'écrivent avec deux séquences de lettres différentes et partagent néanmoins la même séquence de phonèmes sur le plan de leur représentation phonologique : /tEr/. On dit alors que ces mots sont homophones. De même, certains mots n'ayant pas un même nombre de lettres peuvent également partager la même représentation phonologique. Citons par exemple l'adverbe TANT et le substantif TEMPS, partageant la séquence de phonèmes : /tA)/. Sur la base de cette absence d'isomorphisme entre orthographe et phonologie, il est également possible de créer des séquences de lettres dont l'orthographe ne correspond pas à un mot, mais dont la prononcia-

tion est identique à celle d'un mot. Par exemple, le non-mot ROZE se prononce de la même manière que le mot ROSE (/roz/). On dit alors que ce non-mot est un pseudohomophone du mot de base ROSE.

Plusieurs études utilisent la propriété d'homophonie pour démontrer l'influence des informations phonologiques au cours de la perception visuelle d'un mot (pour une revue, voir Berent & Perfetti, 1995). On peut citer en premier lieu les expériences principes de Rubenstein, Lewis et Rubenstein (1971) réalisées avec la tâche de décision lexicale. Dans leur seconde expérience, ces auteurs obtiennent des latences de réponse plus longues pour rejeter des pseudohomophones (ex. : le non-mot Anglais BRANE dont le mot de base est BRAIN) par rapport à des pseudomots contrôles (ex. : SLUC). Dans l'expérience 3, ils observent des latences de réponse plus longues pour des mots homophones (ex. : en Anglais, SAIL/SALE) par rapport à des mots contrôles appariés en fréquence (LAMP). Cet effet est, par ailleurs, plus important pour le mot le moins fréquent de la paire d'homophones.

Cet effet de pseudohomophonie en tâche de décision lexicale est répliqué dans plusieurs études et fournit un argument en faveur de l'activation automatique des informations phonologiques au cours de la lecture (Coltheart, Davelaar, Jonasson, & Besner, 1977 ; Seidenberg, Petersen, MacDonald, & Plaut, 1996 ; Stone & Van Orden, 1993 ; Van Orden, Stone, Garlington, Markson, Pinnt, Simonfy, & Bricchetto, 1992). Plus précisément, plusieurs études montrent que l'apparition et la taille de cet effet dépendent (a) du type de contrôle orthographique utilisé (Martin, 1982 ; Taft, 1982), (b) de la proportion de pseudohomophones dans la liste des stimuli expérimentaux (McQuade, 1981) et (c) de la présence ou de l'absence d'homophones dans la liste des stimuli expérimentaux (Besner, Dennis, & Davelaar, 1985 ; Underwood, Roberts, & Thomason, 1988).

De même, l'effet d'homophonie, bien que n'ayant pas été répliqué par Coltheart et al. (1977) pour la tâche de décision lexicale, a largement été observé avec la tâche de catégorisation sémantique. Dans plusieurs études utilisant ce protocole, les sujets répondent plus souvent à tort que le mot MAIRE (homophone du mot MÈRE) appartient à la catégorie "membre de la famille" par rapport à un mot contrôle comme MARE (Coltheart, Patterson, & Leahy, 1994 ; Jared & Seidenberg, 1991 ; Peter & Turvey, 1994 ; Van Orden, 1987, 1991 ; Van Orden et al., 1992). Van Orden, Johnston et Hale (1988) rapportent également un effet de pseudohomophonie dans la tâche de catégorisation sémantique. Le pseudohomophone

MERT est classé plus souvent comme appartenant à la catégorie "famille" que le contrôle orthographique MESE. Par ailleurs, d'autres travaux précisent le degré d'apparition de l'effet d'homophonie pour la tâche de décision sémantique. Jared et Seidenberg (1991) montrent que le nombre d'erreurs est plus grand quand la catégorie sémantique contient peu d'exemplaires (ex. : "famille" vs. "animal"). De plus, la taille de cet effet dépend aussi du degré de similarité orthographique entre les homophones (Coltheart, et al., 1994).

Une autre démonstration de l'intervention automatique de la phonologie utilisant la propriété d'homophonie est proposée par Ziegler et Jacobs (1995), et Ziegler, Van Orden, et Jacobs (1997). Ces auteurs utilisent une tâche de recherche de lettres où les sujets doivent simplement détecter la présence d'une lettre au sein d'une séquence de lettres. Quand la lettre à chercher est la lettre A et les stimuli cibles, les pseudohomophones FRAIN et TREIN, ils obtiennent des pourcentages de réponses correctes plus faibles dans ces conditions par rapport à des conditions contrôles (FLAIN et TROIN). En effet, le pseudohomophone FRAIN a la même représentation phonologique que le mot FREIN, qui ne contient pas de A (ce qui est donc contraire à la réponse à fournir). De même, pour TREIN, les sujets ont tendance à répondre que la lettre A est présente dans ce stimulus dont le mot de base est TRAIN. Ces expériences indiquent ainsi que les informations phonologiques sont automatiquement activées dans une expérience qui peut être réalisée simplement sur la base des informations visuelles (cf. Ziegler, 1996).

La propriété d'homophonie est également utilisée dans des expériences d'amorçage (l'homophonie se situant parfois uniquement sur certaines parties du stimulus). Dans ces expériences, on présente un stimulus amorce avant un stimulus cible sur lequel est effectué une décision lexicale ou une prononciation orale. On peut manipuler ainsi les relations tant orthographiques que phonologiques entre l'amorce et la cible, et observer l'influence de ces différents facteurs sur le traitement du stimulus cible. Evett et Humphreys (1981) montrent que des mots cibles amorcés par des mots orthographiquement similaires (e.g., foire-POIRE) sont traités plus rapidement que lorsqu'ils sont précédés par des mots contrôles dissimilaires (arbre-POIRE). D'autres études montrent que l'identification du mot cible est également améliorée lorsque l'amorce est un non-mot orthographiquement similaire (polle-PELLE par rapport à cante-PELLE) ou un non-mot phonologiquement similaire (paile-PELLE par rapport à paibe-PELLE), ou encore un mot homophonique au mot cible (aile-AILE) (Grainger & Fer-

rand, 1994, 1996 ; Humphreys, Evett, & Quinland, 1990 ; Lukatela & Turvey, 1994a, 1994b ; Naish, 1980 ; Perfetti & Bell, 1991 ; Perfetti, Bell, & Delaney, 1988). Ces effets facilitateurs de la similarité orthographique et phonologique sont également décrits en décision lexicale (Ferrand & Grainger, 1992, 1993, 1994 ; Forster, 1987 ; Forster, Davis, Schoknecht, & Carter, 1987 ; Grainger & Ferrand, 1996 ; Sereno, 1991) et en tâche de prononciation (Forster & Davis, 1991 ; Sereno, 1991). De même, des manipulations du temps de présentation du stimulus amorce indiquent que les effets de similarité orthographique apparaissent pour des temps de présentation courts (35 ms) et restent constants au delà (de 45 à 65 ms), et que les effets de similarité phonologique apparaissent pour des temps de présentation du stimulus amorce plus longs (45-50 ms) (Ferrand & Grainger, 1992, 1993, 1994 ; Perfetti & Bell, 1991). Ces études montrent une graduation temporelle des effets liés aux facteurs orthographiques et phonologiques.

En résumé, les effets d'homophonie et de pseudohomophonie témoignent de l'influence des facteurs phonologiques et de leur activation automatique, irrépressibles, rapides et non-stratégiques lors de la reconnaissance visuelle d'un mot. De ces deux effets, on peut déduire que (a) la présentation d'un homophone semble activer non seulement la signification de ce mot mais également la signification du ou des homophones qui lui sont reliés ; et, (b) un non-mot est en mesure d'activer très rapidement la représentation phonologique d'un mot, tout en ne partageant pas la même structure orthographique.

### 3.2.2. Régularité - consistance

La notion de régularité/consistance est liée à celle d'homophonie. En effet, une séquence de lettres est homophone à une autre séquence lorsque toutes deux partagent la même représentation phonologique, tout en ayant des formes orthographiques différentes. Inversement, on parlera d'inconsistance ortho-phonologique lorsqu'une même séquence de lettres (par exemple, "ENS" ou "IX"), placée dans deux mots différents (ex. : GENS/SENS ou DIX/PRIX), conduit à deux séquences de phonèmes différentes (/JA)/ et /sA)s/ ; /dis/ et /pri/).

La question de la régularité se pose lorsque l'on tente de mettre en correspondance les sous-unités orthographiques (lettres ou groupes de lettres) avec les sous-unités phonologiques (phonèmes), unités reliées au sein de chaque mot d'une langue donnée (Hanna, Hanna, Hodges, & Ruderf, 1966 ; Venezky, 1970 ; Wijk, 1966). La notion de graphème a été propo-

sée afin de résoudre l'absence d'isomorphisme entre représentation orthographique et représentation phonologique. Un graphème est défini comme le correspondant orthographique d'un phonème (Berndt, Lynne D'Autrechy, and Reggia, 1994 ; Berndt, Reggia, and Mitchum, 1987 ; Coltheart, 1978 ; Henderson, 1985 ; Véronis, 1986). Ainsi, si l'on considère le phonème /o/, ce dernier est relié aux graphèmes suivants : O, AU, EAU.

Les premières définitions de la régularité établissent donc des règles de conversion des graphèmes en phonèmes, définissant pour chaque graphème le phonème lui étant associé le plus couramment dans le lexique (pour une discussion sur l'établissement de ces règles, voir Lange, 1997). Un mot irrégulier est alors un mot contenant au moins un graphème ne correspondant pas aux règles grapho-phonémiques établies.

L'une des premières démonstrations de l'influence de l'irrégularité grapho-phonémique sur le traitement des mots écrits vient d'une étude réalisée par Baron et Strawson (1976). Ces auteurs obtiennent, dans la tâche de prononciation, des latences de réponse plus élevées pour des mots irréguliers (PINT) comparés à des mots réguliers (MINT, TINT, LINT). Un grand nombre d'études ont répliqué par la suite cet effet de régularité sur les latences et les erreurs de prononciation (Andrews, 1982 ; Backman, Bruck, Hébert, & Seidenberg, 1984 ; V. Coltheart & Leahy, 1992 ; Content, 1991 ; Content & Peereman, 1992 ; Forster & Chambers, 1973 ; Frederiksen & Kroll, 1976 ; Glushko, 1979 ; Gough & Cosky, 1977 ; Jared, McRae, & Seidenberg, 1990 ; Laxon, Masterson, & V. Coltheart, 1991 ; Paap & Noel, 1991 ; Parkin, 1982, 1984 ; Parkin, McMullen, & Graystone, 1986 ; Rosson, 1985 ; Seidenberg, Waters, Barnes, & Tanenhaus, 1985 ; Stanovitch & Bauer, 1978 ; Taraban & McClelland, 1987 ; Waters & Seidenberg, 1985 ; pour des revues, voir Henderson, 1982 ; Humphreys & Evett, 1985 ; Venezky, 1981). Certaines études constatent, par ailleurs, une interaction avec la fréquence des mots, l'effet de régularité apparaissant uniquement pour des mots de basse fréquence (Andrews, 1982 ; Backman et al., 1984 ; Kai & Bishop, 1987 ; Stanhope & Parkin, 1987 ; Seidenberg et al., 1984 ; Taraban & McClelland, 1987).

Glushko (1979) propose une définition plus précise des inconsistances entre orthographe et phonologie. Selon cette définition, un mot est irrégulier/inconsistant s'il existe au moins un autre mot ayant une séquence de lettres commune qui se prononce différemment. GENS et SENS sont ainsi, tous les deux, considérés comme deux mots irréguliers/inconsistants. De même, Jared (1997) et Jared, McRae, et Seidenberg (1990), suggèrent qu'une mesure encore

plus adéquate consiste à calculer, pour les mots présentant une inconsistance grapho-phonémique, le nombre et la fréquence des mots "amis" (c'est-à-dire, les mots ayant la même correspondance grapho-phonémique que le mot cible) par rapport au nombre et à la fréquence des mots "ennemis" (mots n'ayant pas la même correspondance grapho-phonémique) (Ziegler, Jacobs, & Stone, 1996 ; Ziegler, Stone, & Jacobs, 1997). Jared (1997) démontre que l'effet de régularité-consistance apparaît également pour les mots de haute fréquence lorsque cette mesure est prise en compte (voir également, Treiman, Mullennix, Bijeljac-Babic, & Richmond-Welty, 1995). En revanche, cet effet semble être moins robuste dans des tâches comme celle de décision lexicale (pour des études ne trouvant pas d'effet : Berent, 1997 ; Jared, 1997 ; Parkin et al., 1986 ; pour des études obtenant un effet : Stone, Vanhoy, & Van Orden, 1997 ; Ziegler, Montant, & Jacobs, 1997).

L'effet de régularité-consistance semble donc émerger lorsque les sujets doivent produire une séquence phonologique. Dans ce cas, la présence d'une inconsistance grapho-phonémique ralentit le temps de traitement des mots. Le rôle de la consistance grapho-phonémique est en revanche moins bien établi avec la tâche de décision lexicale. Toutefois, comme le notent McClusker, Hillinger, et Bias (1981) ainsi que Van Orden et al. (1992), l'impossibilité de rejeter l'hypothèse nulle dans certaines expériences n'implique nullement le rejet de l'hypothèse alternative (i.e., l'effet de régularité).

Les relations entre orthographe et phonologie sont plus ou moins transparentes, du point de vue des correspondances graphèmes-phonèmes, selon les systèmes d'écriture. On distingue généralement les systèmes d'écriture "superficiels" ("shallow orthography"), comme le Serbo-Croate, l'Allemand, l'Italien ou l'Espagnol, où les correspondances grapho-phonémiques sont directes et sans ambiguïté, des systèmes d'écriture "profonds" ("deep orthography"), comme l'Anglais, l'Hébreu ou le Français, où les correspondances présentent un certain nombre d'inconsistances (Carello, Turvey, & Lukatela, 1992 ; Frost, 1994). Plusieurs études indiquent que le degré de superficialité/profondeur d'une langue induit des différences au niveau du traitement des mots (Frost, 1998 ; Frost, Katz, & Bentin, 1987 ; Katz & Feldman, 1983). Notamment, Frost et al. (1987) ont montré une graduation différente dans les latences de prononciation et de décision lexicale pour des stimuli hébreux, anglais et serbo-croates, soulignant ainsi les différentes relations entre orthographe et phonologie au travers de ces trois langues.

Deux études récentes indiquent par ailleurs non seulement l'influence de la consistance grapho-phonémique lors de la reconnaissance des mots, mais également une influence de la consistance phono-graphémique (Stone et al., 1997 ; Ziegler et al., 1997). Dans une tâche de décision lexicale, les latences de réponse pour les mots sont sensibles à ces deux types d'inconsistance. Ces études mettent l'accent sur le rôle des irrégularités entre orthographe et phonologie, indiquant que les irrégularités entre phonologie et orthographe conditionnent également le traitement des mots écrits (voir cependant Peereman & Content, 1998).

En résumé, la régularité-consistance des mots varie selon les systèmes d'écriture et semble induire des variations dans les processus de traitement des mots. Les mots ayant une séquence orthographique dont la prononciation est inconsistante avec celle d'autres mots sont prononcés moins rapidement que des mots totalement consistants. De même, les latences de décisions lexicale paraissent également sensibles à la régularité-consistance ortho-phonologique.

### **3.2.3. La structure phonologique**

La structure phonologique d'un mot est déterminée par la séquence de phonèmes consonnes, voyelles et semi-consonnes qui composent la représentation phonologique de ce mot. Cette structure phonologique s'organise ensuite autour des phonèmes voyelles. Le nombre de phonèmes voyelles détermine le nombre de syllabes dans un mot. La segmentation des syllabes s'effectue en fonction de leur prononciation orale (Liberman, Ingram, Lisker, Delattre, & Cooper, 1959 ; voir toutefois Taft, 1979, pour une discussion et Treiman & Zukowski, 1990, pour une analyse détaillée des questions de segmentation en Anglais). Chaque syllabe peut finalement être décomposée en plusieurs sous-unités : l'onset, la voyelle, le coda, le "lead" et la rime (Fudge, 1969 ; Selkirk, 1982 ; Treiman, 1989). L'onset correspond au groupe de consonnes situées avant la voyelle, le coda, au groupe de consonnes situées après la voyelle. Le "lead" se définit comme l'ensemble onset+voyelle. La rime équivaut à l'ensemble voyelle + coda. Au regard de ces segmentations syllabiques et sous-syllabiques, plusieurs études ont étudié l'influence de la structure phonologique d'un mot lors de son traitement et, plus particulièrement, le rôle des syllabes ainsi que le rôle de différentes sous-unités syllabiques.

### 3.2.3.1. Syllabes

L'une des premières études ayant posé la question du rôle des syllabes pour la reconnaissance des mots est celle de Spoehr et Smith (1973). Ces auteurs comparent les performances d'identification pour deux populations de mots différant par leur nombre de syllabes (1 vs. 2). Chaque mot est présenté à l'aide d'un tachistoscope et Spoehr et Smith obtiennent des pourcentages d'identification supérieurs pour les mots monosyllabiques par rapport aux mots dissyllabiques. De même, dans un autre protocole utilisant la procédure de Reicher (1969), ces auteurs observent également un effet du nombre de syllabes, c'est-à-dire des pourcentages d'identification de lettres supérieurs pour les mots monosyllabiques. Toutefois, Spoehr et Smith ne concluent pas que leur effet soit un effet du nombre de syllabes, mais un effet lié aux groupes vocaliques centraux (GVC, "vocalic center group") définis par Hansen et Rodgers (1965). Les GVC diffèrent légèrement des syllabes au niveau de la segmentation entre deux unités voyelles. Ils se définissent comme les groupes de lettres comprenant une unité voyelle et des unités consonnes placées avant et après la voyelle. L'appartenance d'un groupe consonantique à un GVC est déterminée par une série de règles proposées par Hansen et Rodgers (1965). En ré-analysant leurs données suivant une segmentation en GVC et non plus en syllabes, Spoehr et Smith (1973) montrent que les performances sont mieux expliquées à l'aide de cette seconde interprétation.

Mewhort et Beal (1977) montrent cependant que la segmentation en syllabes semble être fonctionnelle pour la reconnaissance d'un mot polysyllabique. Dans un protocole où des mots polysyllabiques sont présentés segment par segment, ces auteurs obtiennent des pourcentages d'identification supérieurs lorsque le segment correspond à la syllabe par rapport à une condition non-syllabique. Ils ne comparent pas toutefois la segmentation syllabique et la segmentation en GVC.

Dans la tâche de prononciation, Klapp, Anderson et Berrian (1973) obtiennent des latences d'initiation de prononciation supérieures pour des mots dissyllabiques par rapport à des mots monosyllabiques. Un effet similaire est rapporté par Butler et Hains (1979) et Eriksen, Pollack, et Montague, 1970. En revanche, Forster et Chambers (1973), et Frederiksen et Kroll (1976), n'observent pas d'effet du nombre de syllabes sur les temps d'initiation de prononciation. Jared et Seidenberg (1990) suggèrent toutefois que ces inconsistances dans les résultats

obtenus peuvent être dues au fait que l'effet du nombre de syllabe n'apparaît que pour des mots de basse fréquence.

D'autres études ont tenté de montrer la pertinence de l'unité syllabe pour la perception des mots en utilisant le paradigme des conjonctions illusoires (Prinzmetal, 1981 ; Treisman & Schmidt, 1982). Dans ce paradigme, les sujets doivent identifier la couleur d'une lettre placée dans une séquence de lettres également colorées. Ainsi, si le système de lecture est sensible à certains unités comme les syllabes, on peut faire l'hypothèse que les sujets vont grouper ou segmenter les séquences de lettres en syllabes. De même, sur le plan des couleurs des lettres, les sujets vont segmenter les lettres selon la couleur qui leur est donnée. Une erreur de conjonction peut donc apparaître si un type de segmentation l'emporte sur l'autre, par exemple, si la segmentation en syllabes l'emporte sur la segmentation en couleur : si le mot SORTIR est présenté avec SORT en vert et IR en rouge, une erreur de conjonction consistera à répondre que T était en rouge (T appartenant à la seconde syllabe, TIR). Millis (1986) observe un plus grand nombre d'erreurs de conjonction pour des mots monosyllabiques que pour des mots disyllabiques. Prinzmetal, Treiman, et Rho (1986) observent également qu'un plus grand nombre d'erreurs de conjonction ont lieu au sein d'une syllabe qu'entre deux syllabes (voir aussi Prinzmetal, 1990). Ces résultats indiquent donc que la syllabe jouerait un rôle de marqueur perceptif, limitant les erreurs de conjonction. Cependant, Jared et Seidenberg (1990), Seidenberg (1987), Seidenberg et McClelland (1989), et Srinivas, Roediger, et Rajaram (1992) suggèrent que les effets syllabiques observés dans ces expériences sont en fait des effets liés à la redondance orthographique de certaines séquences de lettres. Le nombre réduit d'erreurs de conjonction entre syllabes serait dû à la faible redondance orthographique ou à la faible fréquence des bigrammes séparant deux syllabes (par exemple RT dans SORTIR). Afin de tester cette hypothèse alternative, Rapp (1992), utilise une tâche de décision lexicale avec des stimuli composés de deux couleurs marquant ou non la jonction syllabique (c'est-à-dire, la segmentation en couleur étant SOR et TIR, ou bien SORT et IR). De plus, Rapp croise la manipulation syllabique avec une manipulation de la fréquence des bigrammes faisant la jonction entre syllabes et observe un effet de la segmentation syllabique sur les latences de réponse, mais pas d'effet de la fréquence des bigrammes. Cet auteur conclut donc en faveur d'un rôle des unités syllabiques lors de la perception des mots écrits.

Plus récemment, Carreiras, Alvarez, et De Vega (1993), rapportent un effet de la fréquence des syllabes en Espagnol, dans des tâches de décision lexicale et de prononciation (voir aussi, Perea & Carreiras, 1998). Des mots comprenant des syllabes de haute fréquence sont traités moins rapidement que des mots ayant des syllabes de basse fréquence. Dans une expérience où la fréquence des bigrammes est maintenue constante (expérience 3), cet effet de la fréquence des syllabes demeure (l'analyse statistique montre toutefois que cet effet n'est présent qu'en considérant les sujets comme facteur aléatoire et non les items).

Par ailleurs, Ferrand, Segui, et Grainger (1996) et Ferrand, Segui, et Humphreys (1997) abordent la question des syllabes comme unités de la lecture en utilisant le paradigme d'amorçage. Dans des expériences réalisées en Français, ils obtiennent des latences de prononciations plus rapides pour des mots poly-syllabiques lorsque l'amorce correspond à la première syllabe de ces mots, par rapport à des amorces correspondant à la syllabe plus ou moins une lettre. Par exemple, les latences de prononciation sont plus rapides pour les couples BA%-%-%-%-BALANCE que pour les couples BAL%-%-%-%-BALANCE, ainsi que pour les couples BAL%-%-%-BALCON par rapport aux couples BA%-%-%-%-BALCON. Cet effet est obtenu également pour des non-mots, mais n'est pas observé en TDL. Dans des expériences réalisées en Anglais, ces auteurs soulignent la plus grande difficulté de la syllabification dans cette langue. Certains mots contiennent en effet des syllabes dite "ambivalentes" dont la frontière n'est pas claire (par exemple, le mot anglais BALANCE). Néanmoins, ils répliquent l'effet observé en Français pour des mots avec des frontières syllabiques claires (i.e., le couple BAL%-%-%-%-BALCONY est prononcé plus rapidement que le couple BA%-%-%-%-%-BALCONY) et ne trouvent aucun effet du type d'amorce dans la tâche de décision lexicale. Concernant les syllabes ambivalentes, leur traitement semble facilité par les deux types d'amorces, BA%-%-%-%-% et BAL%-%-%-%, si on compare ces conditions à une condition contrôle composée uniquement de "%".

L'ensemble des études portant sur le rôle des syllabes dans la reconnaissance des mots écrits montrent que dans certaines langues (Espagnol, Français) la syllabe semble être une unité pertinente pour le système de lecture. En revanche, en Anglais, des résultats variés sont encore obtenus. L'inconsistance de ces résultats pourrait être due au fait que la syllabification en Anglais est moins claire que dans d'autres langues. En effet, la présence de frontières syl-

labiques ambivalentes (Ferrand et al., 1997) ne permet pas d'identifier clairement les unités syllabes, ce qui expliquerait les résultats contradictoires observés en Anglais.

### 3.2.3.2. Unités sous-syllabiques

Un certain nombre de travaux, initiés par E. Gibson, partent de l'hypothèse que la plus petite unité fonctionnelle de la perception des mots correspond à des groupements orthographiques (GO, "spelling patterns"). Ces GO, selon la définition de Gibson (1965), sont des groupes de lettres dont la prononciation est invariante et suit les règles de prononciation d'une langue donnée. De plus, ces GO sont définis à une position spécifique dans les mots. Gibson (1965) donne l'exemple, en Anglais, de GH qui se prononce comme un F à la fin d'un mot mais pas au début d'un mot. Dans une expérience d'identification de non-mots, Gibson, Pick, Osser, et Hammond (1962) construisent ainsi deux catégories de stimuli : des non-mots constitués de GO, par exemple GLURCK (décomposé GL-UR-CK), et des non-mots construits avec les GO de la première liste mais en inversant le GO initial et final (CKURGL, CK et GL n'ont plus alors valeur de GO, n'étant pas à leur position régulière dans la chaîne de lettres). Gibson et al. (1962) trouvent des pourcentages d'identification supérieurs pour la première liste de non-mots par rapport à la seconde liste, et concluent en faveur de la pertinence des unités GO pour le codage ortho-phonologique des mots.

La même hypothèse des GO comme unités fonctionnelles de la lecture est testée dans un paradigme de conjonction illusoire par Millis (1986). Cet auteur obtient plus d'erreurs de conjonction pour des mots monosyllabiques ayant 2 GO par rapport à des mots ayant 3 GO. Les résultats de Millis indiquent que le nombre d'erreurs de conjonction décroît à mesure que le nombre de GO augmente. Ce résultat est en faveur de l'hypothèse des GO, puisque la logique de ces expériences est de dire que la probabilité de produire une erreur de conjonction est plus forte au sein d'une unité perceptive qu'entre deux unités. Ainsi, plus un mot est composé de GO (i.e., d'unités perceptives fonctionnelles), plus ces unités seront petites et moins grande est la probabilité d'associer deux lettres entre elles. On le voit, contrairement aux définitions purement orthographiques présentées dans la section 3.1.4, les GO sont définis sur la base des relations entre orthographe et phonologie. Il s'agit donc bien là d'unités orthographiques fonctionnelles du point de vue de la phonologie, ou encore d'unités phonographiques.

Une autre approche des unités sous-syllabiques est développée, plus récemment, par R. Treiman et, ce, autour d'une segmentation de la syllabe en onset et rime. Treiman (1994) propose que la segmentation des lettres écrites soit le miroir de la segmentation phonologique des mots. Or, en Anglais, plusieurs résultats empiriques indiquent que les unités phonologiques correspondent à l'onset et à la rime (pour une revue, voir Treiman, 1989). Partant de cette hypothèse, Treiman et Chafetz (1987) montrent notamment des temps de réponse plus rapides, en TDL, pour des mots monosyllabiques de cinq lettres segmentés à la jonction onset-rime, que pour des mots segmentés une lettre après le début de la rime (i.e., CR//ISP est répondu plus rapidement que CRI//SP). De même, Treiman, Goswami, et Bruck (1990) enregistrent de meilleures performances, dans une tâche de prononciation de non-mots, pour des non-mots construits à partir de rimes partagées par un grand nombre de mots que pour des non-mots construits à partir de rimes peu fréquentes ou inexistantes dans le lexique anglais (ces deux groupes de stimuli étant composés globalement du même type de correspondances grapho-phonémiques). Dans une grande étude réalisée en Anglais mesurant les latences de prononciation d'un large corpus de mots, Treiman, Mullenix, Bijeljac-Babic, et Richmond-Welty (1995) montrent que la consistance de la prononciation de la rime explique une plus grande part de la variance des latences que n'importe quel autre indice sous-syllabique. Treiman et ses collaborateurs ont ainsi testé l'hypothèse des unités onset-rimes dans plusieurs protocoles expérimentaux et également dans un grand nombre d'études avec des enfants (e.g., Gattuso, Smith, & Treiman, 1991 ; Treiman & Zukowski, 1988, 1996 ; Wise, Olson, & Treiman, 1990). Cette même approche est poursuivie par J. Bowey dans différentes expériences utilisant la technique d'amorçage. Bowey (1990, 1993) obtient un effet facilitateur de l'amorce sur le traitement du mot cible lorsque les lettres contenues dans l'amorce correspondent à la rime du mot. Enfin, Peereman et Content (1997) suggèrent que la segmentation onset-rime est également fonctionnelle en Français. Dans une étude visant à préciser la nature des effets facilitateurs du voisinage orthographique, ces auteurs montrent (1) que ces effets sont dus principalement aux voisins orthographiques qui sont également des voisins phonologiques du mot cible, appelés "voisins phonographiques" (par exemple, AISE, MISE, BASE et BILE sont tous des voisins orthographiques de BISE, mais seuls MISE, BASE et BILE sont des voisins phonographiques), et (2) que, parmi l'ensemble des voisins phonographiques, seuls ceux qui partagent la rime avec le mot cible semblent influencer son traitement (suivant notre

exemple, le mot BISE a un seul voisin phonographique avec lequel il partage la rime : MISE). L'importance de la segmentation de la syllabe en unités onset-rime est montrée dans un nombre croissant d'études. Ce résultat, observé principalement en Anglais, semble pouvoir s'appliquer également au Français.

En résumé de cette section sur les unités sous-syllabiques, plusieurs études, conduites principalement en Anglais, indiquent que les processus de reconnaissance des mots écrits sont sensibles 1) aux groupements orthographiques ("spelling patterns") dont la prononciation est invariante et suit les règles de prononciation d'une langue donnée ; 2) à la segmentation en unités onset et rimes, au moins pour des mots monosyllabiques Anglais et Français.

### 3.3. Discussion

Dans ce chapitre, nous avons souhaité présenter les relations mises à jour entre certaines variables indépendantes, caractérisant certaines propriétés des stimuli linguistiques, et certaines variables dépendantes, indices mesurables de la réponse d'un sujet, dans le domaine de la perception des mots écrits. Plus particulièrement, nous avons focalisé notre attention sur le rôle des variables orthographiques et phonologiques. Nous avons abordé séparément ces deux types de variables. Toutefois, il apparaît clairement que ces variables sont fortement imbriquées l'une dans l'autre et qu'une analyse purement en termes de composante orthographique ou de composante phonologique n'est pas ou plus envisageable. Ce constat est relativement récent dans la littérature sur la perception des mots écrits. Si l'on considère, comme nous le verrons au chapitre suivant, les premiers modèles qui ont été proposés dans ce domaine, nous constatons qu'ils ne considèrent les informations phonologiques que comme un module indépendant, ayant ses propres représentations distinctes des représentations orthographiques. Certains modèles éludent même complètement la question des informations phonologiques, tentant de rendre compte des phénomènes empiriques sans recours à la phonologie. Pourtant, les résultats que nous avons résumés ici indiquent (1) que les informations phonologiques interviennent systématiquement dans la reconnaissance d'un mot ; (2) que la structure phonologique d'un mot influence son identification visuelle ; (3) que la phonologie semble donner forme à l'orthographe, ou encore, qu'orthographe et phonologie entretiennent une relation de couplage fonctionnel. Ainsi, cet ensemble de résultats conduit à reconsidérer la distinction classique entre orthographe et phonologie pour suggérer une approche où ces

deux variables s'entremêlent pour former des variables grapho-phoniques ou phono-graphiques.

Avant d'aborder la description des modèles qui sont proposés pour rendre compte de l'ensemble de ces relations empiriques, nous pouvons nous poser la question de la qualité des relations présentées. En effet, se poser la question de la qualité des données empiriques dont on dispose est crucial pour qui souhaite modéliser le système qui a produit ces données. Selon le degré de systématicité et d'invariabilité des données empiriques, il est possible de contraindre plus ou moins fortement les modèles que l'on formule. Or, au regard des données énoncées dans ce chapitre, il apparaît que l'ensemble des résultats dont nous disposons correspondent non à des lois révélant des propriétés invariantes du système de lecture, lois permettant de mettre en évidence des relations systématiques entre variables indépendantes et variables dépendantes, ou encore permettant de révéler des propriétés invariantes du système étudié, mais plutôt à des régularités indiquant des tendances dans les relations entre variables linguistiques et variables comportementales. D'ailleurs, si l'on se réfère à la terminologie employée, on parle généralement de "l'effet" d'une variable X sur une variable Y. Si l'on reprend les différents "effets" que nous avons présentés, on constate aisément que ces effets nous fournissent des indicateurs de tendance mais nullement des relations invariantes et systématiques.

Pourquoi un tel constat ? On peut invoquer plusieurs raisons pour expliquer la fragilité des données empiriques dont nous disposons. La première raison vient des propriétés multiples des stimuli. Les mots écrits sont en effet des stimuli multidimensionnels. Cette multidimensionnalité rend très difficile toute approche visant à spécifier et isoler tous les facteurs intervenant dans le traitement d'un mot. Ensuite, même s'il était possible de spécifier l'ensemble de ces facteurs, il serait sans doute très difficile de tous les contrôler afin d'isoler l'un d'entre eux et d'établir son rôle précis au cours du traitement d'un mot. Deuxièmement, il existe des interactions entre ces différentes propriétés ; ainsi l'influence d'une propriété X peut être modulée par une propriété Y (ex. : l'interaction entre la fréquence et la consistance grapho-phonémique, e.g., Taraban & McClelland, 1987). Troisièmement, l'effet d'une propriété est très souvent contextuel : l'influence d'une propriété X est parfois dépendante de facteurs externes conditionnant l'état général du système de lecture (ex. : la taille de l'effet de fréquence en TDL selon le type de non-mots utilisés, e.g., Stone & Van Orden, 1993). Par ailleurs, une

propriété doit se rapporter au contexte de chaque langue. Une propriété X n'aura pas la même influence selon la langue considérée (e.g., Frost et al. 1987). Quatrièmement, les méthodes employées interagissent elles-mêmes avec les propriétés manipulées ou encore sollicitent des processus qui masquent les processus que l'on tente de mesurer ; un effet s'inscrit généralement dans un protocole expérimental donné et requiert une analyse des processus liés à la tâche utilisée (e.g., Carreiras et al., 1997). Cinquièmement, il existe des différences interindividuelles dans la manière de réaliser une expérience. Peu ou pas d'analyses différentielles sont rapportées, il n'est donc pas possible de savoir si tous les sujets d'une expérience donnée présentent un effet particulier (ce qui est en fait rarement le cas). Il serait donc utile de connaître les limites individuelles dans lesquelles l'effet apparaît (l'effet le plus fort et le plus faible, voire la taille et le nombre des effets inverses).

Ainsi, avant d'aborder la question de la modélisation des processus de reconnaissance des mots écrits, il est bon de rappeler que les descriptions théoriques auxquelles on peut aboutir dépendent grandement de la qualité des moyens d'investigation empirique dont on dispose. La qualité des méthodes employées conditionnent la qualité des données que l'on peut enregistrer et que l'on doit considérer pour contraindre les modélisations du système étudié.

# Chapitre 4

## Modèles de la perception visuelle des mots

*« Beaucoup d'illusions ont disparu de nos jours sur les explications mécaniques que l'on peut donner de l'Univers. Or, tandis qu'on perdait l'espoir d'expliquer tous les phénomènes physiques par des lois analogues à celle de la gravitation universelle ou par un mécanisme unique, prenait corps une idée qui compensait presque l'écroulement de cet édifice d'espérances.*

*C'est l'idée des modèles mécaniques ; elle ne satisfait peut-être pas ceux qui cherchent de nouveaux systèmes de philosophie naturelle, mais elle suffit provisoirement à ceux qui, plus modestes, sont contents par toutes les analogies, et plus spécialement par les analogies mathématiques tendant à éclaircir les phénomènes naturels.*

*Un modèle mécanique d'un phénomène est, en effet, un appareil que l'on construit avec la seule préoccupation qu'une fois mis en mouvement certaines de ses parties se déplacent ou se modifient en suivant les mêmes lois de variation que certains éléments dans le phénomène.*

*L'expérience nous apprend que les modèles ont été très utiles. Ils ont servi et servent toujours à nous orienter dans les champs de la science les plus nouveaux et les plus obscurs dans lesquels on cherche sa route à tâtons. »*

*Vito Volterra  
Cité par Giorgio Israel*

Un modèle est une représentation, généralement simplifiée, d'un objet ou d'un système donné. C'est aussi un outil théorique permettant de synthétiser l'ensemble des données empiriques récoltées lors de l'étude - analytique - d'un système. Un modèle se caractérise par une structure et une dynamique particulières. Sa structure est définie par un ensemble de composants, mais également par un agencement et une organisation particulière de ces différents composants. Cette structure est censée répliquer la structure et l'organisation du système étudié. La dynamique d'un modèle définit les rôles, les relations et interactions des différents éléments composant ce modèle. Les propriétés fonctionnelles ou comportementales d'un modèle résultent donc de sa dynamique interne et sont censées reproduire le fonctionnement ou le comportement du système étudié.

Comme nous l'avons souligné au chapitre précédent, le degré d'élaboration d'un modèle dépend à la fois du système étudié et des méthodes empiriques permettant d'analyser la structure et la dynamique de ce système. Pour des systèmes simples composés de peu d'éléments et facilement accessibles par l'expérimentateur, il est possible d'atteindre des descriptions de la structure fine de ce système et également de sa dynamique interne. En revanche, pour des systèmes plus sophistiqués, comme c'est le cas du système de lecture, la structure interne du système (i.e., son organisation cortico-neuronale) n'est pas accessible directement par un observateur. Ou, si elle est accessible, elle présente un tel degré de complexité qu'il n'est pas possible d'en reproduire exactement la composition et l'organisation (Uttal, 1990). Aussi, n'est-il pas possible d'énumérer l'ensemble des composants de tels systèmes, il n'est pas non plus possible d'en caractériser la dynamique fine. Que reste-t-il alors ?

A défaut d'accéder à la structure et à la dynamique interne d'un système, on peut toujours se référer à sa dynamique externe, autrement dit à son comportement. Le comportement est, lui, directement observable et est le reflet, indirect, du système lui-même. Une étude détaillée du comportement d'un système permet d'envisager une modélisation de son fonctionnement, autrement dit, permet de proposer des descriptions fonctionnelles du système. Dans une telle perspective, la modélisation vise à spécifier et à formaliser les données comportementales produites par un système.

Selon l'analyse de Jacobs et Grainger (1994), on peut distinguer trois types de modélisations ou descriptions fonctionnelles proposées dans le domaine de la perception des mots. Le premier type de modélisation fournit des descriptions schématiques du système de lecture et propose une description verbale de la genèse des effets observés. Dans ce type de modélisation, le système de lecture est décomposé en différentes étapes de traitement. Ces étapes sont reliées entre elles suivant une architecture propre à chaque modèle. Chaque étape réalise un traitement de l'information qui lui parvient et exerce ainsi une fonction particulière. A titre d'exemple, on peut citer le modèle proposé par Carr et Pollatsek (1985) présenté dans la Figure 4.1. Au sein d'un tel modèle, un effet empirique est décrit en spécifiant l'étape de traitement qui est affectée par la variable manipulée. Par exemple, ce modèle peut expliquer l'effet de régularité grapho-phonémique en proposant que, pour des mots irréguliers, le système de conversion grapho-phonémique entre en conflit avec le système phonologique logogène au niveau de l'étape de décision phonologique. Néanmoins, bien que ce genre de modèle ait des

vertus synthétiques, il reste relativement imprécis et superficiel du point de vue des processus de perception et ne permet que des explications qualitatives des données comportementales.

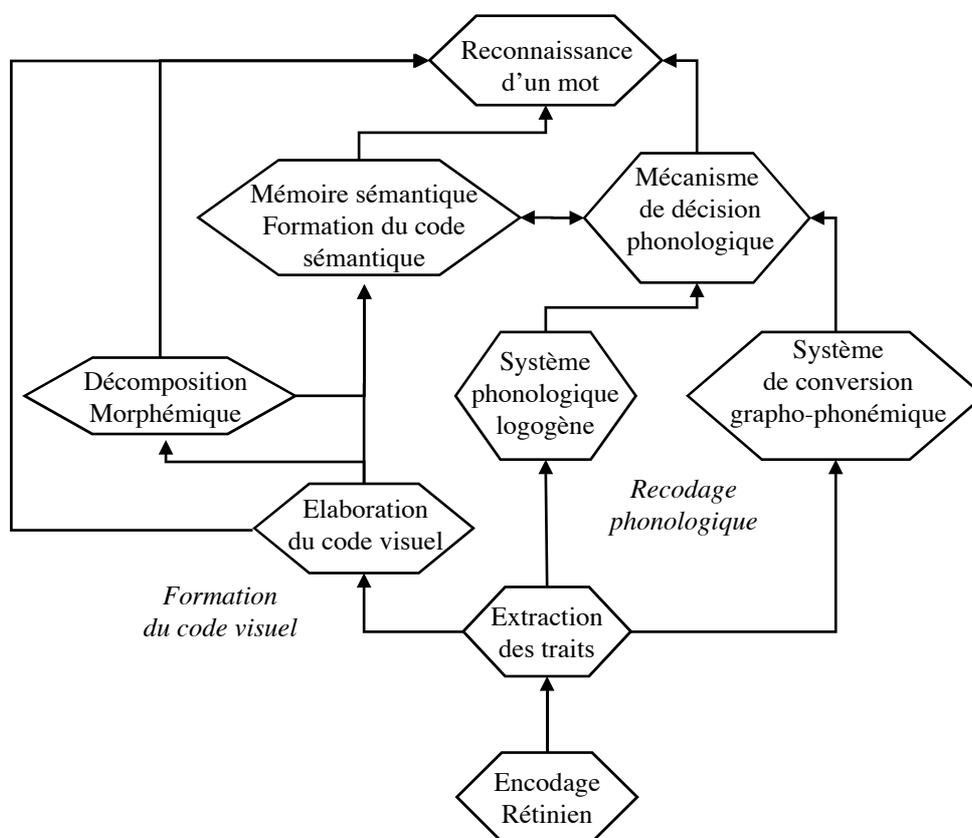


Figure 4.1. : Diagramme schématisé du système de reconnaissance des mots d'après Carr et Pollatsek (1985).

Le second type de modélisation fournit des descriptions mathématiques des performances du système de lecture. Il s'agit ici de trouver la formulation mathématique permettant de mettre en correspondance variables dépendantes et variables indépendantes. Ce type de modélisation est en fait assez peu représenté dans le domaine de la perception des mots écrits. On peut sans doute expliquer cette sous-représentation par la qualité des données empiriques (qui indiquent plus des tendances comportementales que des lois invariables et systématiques) mais aussi par la complexité des stimuli employés (voir la discussion au chapitre 3).

Le troisième type de modélisation propose des descriptions algorithmiques du système de reconnaissance des mots. Ces modèles peuvent être considérés comme des extensions des modèles schématiques puisqu'ils tentent de préciser la nature des transformations réalisées au sein de chaque étape de traitement. Ces modèles se distinguent des modèles schématiques en spécifiant, en détail, les composants du système de lecture. De plus, cette procédure de spécification permet de réaliser des programmes informatiques qui constituent de véritables im-

plémentations artificielles du système étudié. L'ambition de telles modélisations est de fournir non seulement des explications plus détaillées des processus impliqués dans la reconnaissance des mots écrits, mais aussi de pouvoir comparer les performances du système étudié avec celles du modèle par l'intermédiaire de simulations. De tels modèles fournissent donc des outils théoriques puissants et nous focaliserons notre attention sur ce type de modèle dans la suite de notre exposé.

Les modèles algorithmiques, appelés encore modèles computationnels (car ils précisent les différentes opérations ou *computations* réalisées au sein du système de reconnaissance des mots), ont une histoire encore récente. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les principaux modèles computationnels du système de lecture qui sont développés depuis une vingtaine d'années (Colteart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993 ; Grainger & Jacobs, 1994, 1996 ; Jacobs & Grainger, 1992 ; McClelland & Rumelhart, 1981 ; Norris, 1994 ; Plaut, McClelland, Seidenberg, & Patterson, 1996 ; Seidenberg & McClelland, 1989 ; Zorzi, Houghton, & Butterworth, 1998). Nous décrirons pour chaque modèle sa structure, les effets empiriques qu'il est en mesure de simuler et nous proposerons quelques commentaires et critiques. Toutefois, avant de rentrer dans le détail de chaque modèle, nous présenterons les deux problèmes majeurs liés à la question du rapport entre orthographe et phonologie au cours de la perception d'un mot, problèmes qui guident la plupart des modélisations jusqu'à ce jour.

#### **4.0. Deux problèmes pour la modélisation des rapports entre orthographe et phonologie**

Afin de pouvoir réaliser correctement la transcription grapho-phonémique de toute séquence de lettres en une séquence de phonèmes, un lecteur adulte doit être en mesure de résoudre deux problèmes majeurs : (1) le problème de la régularité/consistance grapho-phonémique et (2) le problème de la prononciation des non-mots. Concernant le premier problème, comme nous l'avons déjà vu au chapitre précédent, les systèmes alphabétiques tels que l'Anglais et le Français comportent un certain nombre de mots irréguliers (ou inconsistants) du point de vue de leurs correspondances grapho-phonémiques. Prenons le cas du mot CLUB (prononcé /klɒb/). On constate ici que la lettre U est prononcée /ɒ/ dans ce mot, alors que dans la plupart des autres mots (comme BULLE, DUNE, LUGE) la lettre U est prononcée /y/. Le mot CLUB fournit ainsi un exemple de mot irrégulier. Il s'agit maintenant de savoir

comment un lecteur adulte parvient à prononcer correctement ce mot et non à produire la séquence : /klyb/. De même, et c'est le second problème, face à une séquence alphabétique telle que TUBLE, comment un lecteur parvient-il à retrouver la séquence phonémique /tybl/ correspondant à ce non-mot ? En d'autres termes, par quels processus un lecteur est-il en mesure de généraliser sa connaissance des transcriptions grapho-phonémiques à l'ensemble des séquences de lettres qui ne forment pas un mot ? On constate que les travaux visant à modéliser les rapports entre orthographe et phonologie au cours de la lecture, et plus particulièrement la question de la prononciation des mots écrits, portent principalement leur attention sur la résolution de ce double problème.

Si l'on considère uniquement les réponses apportées par les modèles schématiques, on peut distinguer deux types de réponses à ce double problème. Le premier type de réponse suggère qu'il existe deux sous-systèmes au sein du système de lecture, chaque sous-système permettant de résoudre l'un des deux problèmes (Baron & Strawson, 1976 ; Coltheart, 1978, 1985 ; Forster & Chambers, 1973 ; Frederikson & Kroll, 1976 ; Kay & Bishop, 1987 ; Morton & Patterson, 1980 ; Norris & Brown, 1985 ; Paap & Noel, 1991 ; Patterson & Morton, 1985). Dans tous ces modèles, la séquence phonologique d'une suite de lettres (mot ou non-mot) peut être produite soit en accédant à la représentation phonologique du mot en mémoire (par sa représentation orthographique), soit en utilisant des règles de correspondance graphèmes-phonèmes établies au cours de l'apprentissage de la lecture. Patterson (1982) appelle la première procédure, la procédure d'adressage, et la seconde, la procédure d'assemblage. Toutefois, bien que ces modèles partagent tous l'idée d'un système à double voie, ils diffèrent quant à la manière dont fonctionne la procédure d'assemblage (et sur le type de connaissance utilisée dans cette procédure) et, également, sur la façon dont ces deux voies se combinent pour produire une prononciation. Par exemple, Coltheart (1978) suggère que la procédure d'assemblage est réduite aux correspondances graphèmes-phonèmes. D'autres auteurs, comme Kay et Bishop (1987), Norris et Brown (1985) ou Morton et Patterson (1980), proposent que d'autres correspondances peuvent également intervenir, comme les correspondances entre la rime orthographique et phonologique. De même, dans sa forme initiale, ce type de modèle envisage une sorte de compétition entre les deux voies ("horse race"). Les deux voies sont ainsi complètement indépendantes et la prononciation en sortie est déterminée par la voie la plus rapide. Cette hypothèse d'indépendance n'est cependant plus

retenue dans les versions plus récentes de ce modèle, comme nous le verrons avec le modèle de Coltheart et al. (1993), et les deux voies participent conjointement et de manière interactive à la production de la sortie finale.

Le second type de modèle schématique propose de résoudre le double problème d'inconsistance/généralisation avec un système unique analogique. C'est notamment le point de vue développé par Glushko (1979) dans un modèle de la lecture qui suppose une activation parallèle de différents codes ortho-phonologiques. Ces codes peuvent correspondre à des lettres, des mots entiers, des groupements orthographiques partagés par un grand nombre de mots ou encore aux correspondances entre graphèmes et phonèmes. L'information activée est ensuite synthétisée dans un seul programme articulatoire. Une version alternative de ce schéma à une voie est proposée par Marcel (1980) ou encore Kay et Marcel (1981). Selon ces auteurs, la prononciation d'un mot ou d'un non-mot s'effectue par référence aux informations lexicales stockées en mémoire. Dans ce modèle, chaque mot est représenté de manière segmentée aux niveaux orthographique et phonologique. Ainsi, lorsqu'une nouvelle entrée visuelle est fournie au système de lecture, elle est également découpée en segments orthographiques. Chaque segment active alors les différents segments lexicaux. Pour les mots, c'est la représentation du mot entier qui l'emporte sur les segments plus petits. Pour les non-mots, la prononciation finale s'effectue en fonction de la fréquence des segments activés. Les segments partagés par le plus grand nombre de mots dictent la prononciation en sortie. Ainsi, la conversion du texte en parole s'effectue uniquement par un système lexical et ne fait pas appel à un sous-système indépendant non-lexical.

Comme nous allons le voir maintenant, les récents modèles computationnels de la reconnaissance et de la production des mots écrits reprennent en grande partie les distinctions effectuées par les modèles schématiques en termes de simple ou double voie de traitement ortho-phonologique. Nous ne réduisons cependant pas notre présentation des modèles computationnels aux modèles tentant de résoudre le double problème d'inconsistance/généralisation. Nous parlerons aussi de modèles n'incluant pas de processus phonologiques (Grainger & Jacobs, 1994, 1996 ; Jacobs & Grainger, 1992 ; McClelland & Rumelhart, 1981). Ces modèles nous permettront d'introduire directement la modélisation décrite au chapitre 5.

## 4.1. McClelland et Rumelhart, 1981

Ce modèle est l'un des premiers modèles computationnels proposés dans le domaine de la perception des mots écrits. Initialement, ce modèle n'a pas été utilisé pour rendre compte des effets comportementaux décrits au chapitre 3, mais pour rendre compte d'un autre phénomène, appelé "l'effet de supériorité des mots". Cet effet indique que, dans des conditions de présentation tachistoscopiques, l'identification d'une lettre est meilleure lorsque cette lettre est présentée dans un mot plutôt que lorsqu'elle apparaît dans une suite de lettres aléatoire (Cattell, 1886 ; Huey, 1908 ; Neisser, 1967 ; Reicher, 1969). L'ambition du modèle de McClelland et Rumelhart était de rendre compte également d'une série de données reliées à l'effet de supériorité des mots montrant, par exemple, un meilleur taux d'identification des lettres lorsque celles-ci se trouvent dans des non-mots prononçables (ex. : TUBLE), par rapport à des non-mots imprononçables (ex. : ELBTU) (Aderman & Smith, 1971 ; Baron & Thurston, 1973 ; Spoehr & Smith, 1975), ou encore un avantage des pseudomots (i.e., des non-mots prononçables) par rapport à des lettres présentées individuellement (Carr, Davidson, & Hawkins, 1978 ; Massaro & Klitzke, 1979 ; McClelland & Johnston, 1977).

Pour cela, McClelland et Rumelhart proposent un modèle d'activation interactive (MAI) basé sur quatre propriétés principales. Premièrement, ce modèle suppose l'existence de différents niveaux de représentation et de traitement. Chaque niveau représente différents niveau d'abstraction du stimulus mot. La Figure 4.2 contient une description schématique de ce modèle et de ses différents niveaux de représentation : un niveau des traits visuels et acoustiques, un niveau des lettres et des phonèmes et un niveau lexical. La seconde hypothèse du MAI est de considérer la perception visuelle comme une série de traitements parallèles. Ces différents traitements parallèles peuvent avoir lieu au même moment, ce qui permet au système de fonctionner en cascade (McClelland, 1979). Troisièmement, ce modèle fait l'hypothèse d'une interaction à double sens entre les différents niveaux de traitement. C'est-à-dire que le transfert de l'information se fait de manière ascendante et descendante (boucle "top-down" ou boucle de "feedback"). Quatrièmement, les différents niveaux interagissent entre eux à l'aide de connexions de type excitatrices ou inhibitrices. Ainsi, chaque représentation est symbolisée par une unité ou un nœud à un certain niveau donné et cette unité est reliée à d'autres unités par des

connexions transférant le flux d'information (voir la Figure 4.3 pour un échantillon du modèle).

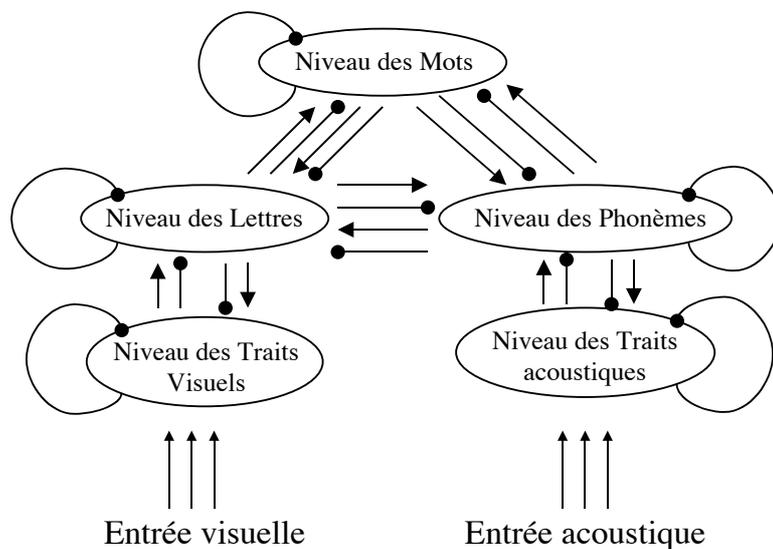


Figure 4.2. : Représentation schématique du modèle d'activation interactive proposé par McClelland et Rumelhart (1981).

Ainsi, grâce à cette architecture, le MAI permet de rendre compte de l'effet de supériorité des mots en supposant que l'activation des représentations des lettres par le niveau des traits va, à son tour, activer la représentation des mots. Les unités mots, en retour et grâce aux boucles de rétroaction, vont activer les unités lettres. Les lettres, lorsqu'elles apparaissent au sein d'un mot, reçoivent plus d'activation que lorsqu'elles ne font pas partie d'un mot. Par ailleurs, l'avantage des non-mots prononçables (TUBLE) sur les non-mots imprononçables (ELBTU) vient du fait que, bien que n'étant pas un mot, TUBLE a une structure proche d'un mot et va activer notamment le mot TABLE qui, en retour, va envoyer de l'excitation au niveau des lettres. Les lettres, dans un tel contexte, seront donc plus activées, donc mieux identifiées.

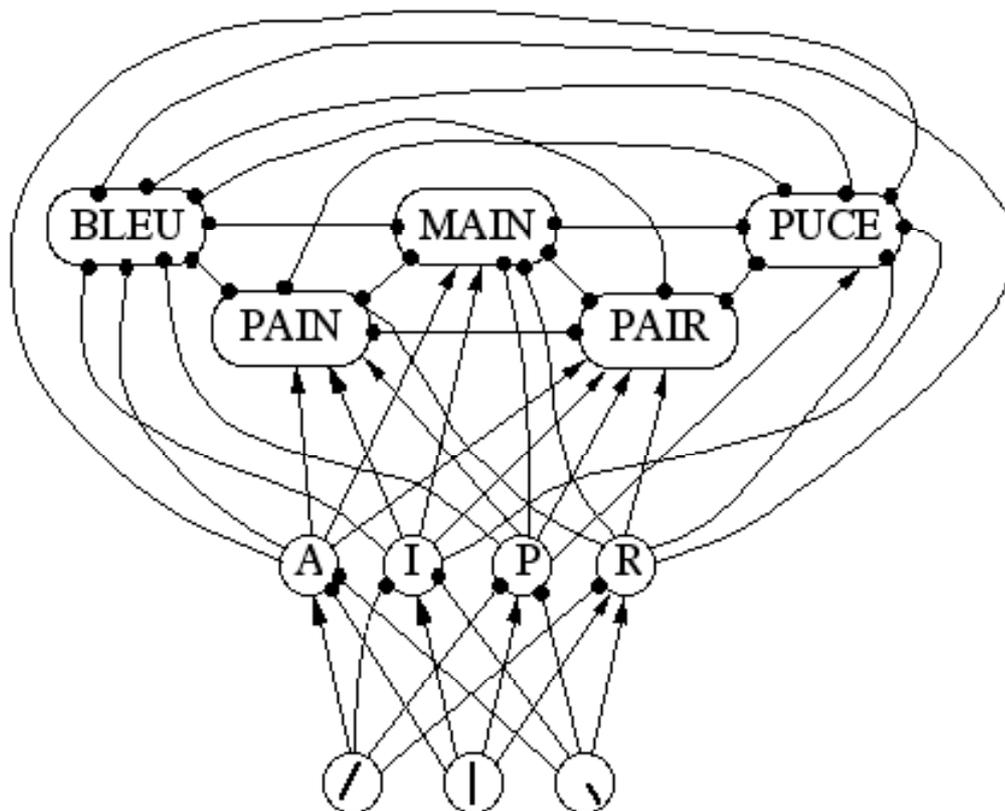


Figure 4.3. : Unités et connexions dans le MAI.

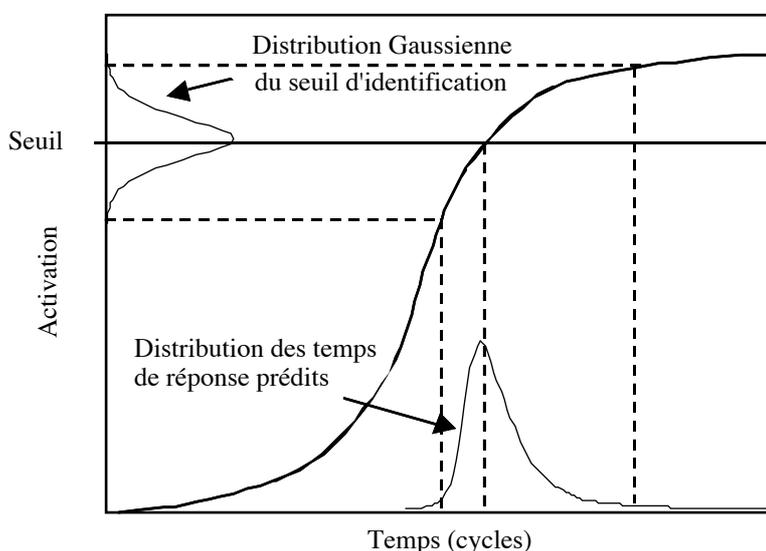
Bien que faisant référence à un niveau des phonèmes, ce modèle ne propose pas en fait de description concernant les relations ortho-phonologiques. Les auteurs suggèrent même qu'un niveau de description phonologique n'est pas nécessaire pour expliquer les effets de supériorité des mots ou des pseudo-mots. Néanmoins, ce modèle introduit la génération des modèles computationnels en donnant le détail hypothétique des composants du système de lecture et de leurs interactions. Il constitue par ailleurs l'élément de base de la modélisation présentée au chapitre 5.

## 4.2. Grainger et Jacobs, 1994, 1996 ; Jacobs et Grainger, 1992

Dans la lignée du modèle de McClelland et Rumelhart (1981), plusieurs études généralisent les performances de ce modèle à d'autres effets empiriques et à d'autres protocoles expérimentaux (Grainger & Jacobs, 1994, 1996 ; Jacobs & Grainger, 1992 ; Ziegler, Rey, & Jacobs, 1998). L'idée de ces différentes études de simulation est de postuler que le MAI fournit une architecture de base pour les processus de reconnaissance des mots mais que chaque protocole expérimental impose des contraintes qui viennent s'ajouter à la structure du modèle. Une modélisation de ces contraintes doit donc être réalisée, c'est-à-dire qu'il faut préciser au

sein du modèle les mécanismes propres à la tâche demandée et, notamment, les procédures de production d'une réponse.

Jacobs et Grainger (1992) proposent une version semi-stochastique du MAI dans laquelle ils spécifient la procédure de réponse pour la tâche de décision lexicale. Dans ce modèle, un mot est identifié lorsque l'une des unités lexicales dépasse un certain seuil d'activation. Ces auteurs, s'inspirant de la théorie à critère variable (Grice, 1968 ; Grice, Nullmeyer, & Spiker, 1982), suggèrent que ce seuil d'identification varie suivant une distribution Gaussienne (cf. Figure 4.4). La fonction d'activation des unités mots étant de type sigmoïde, la combinaison de ce critère variable et de cette fonction fournit un moyen de simuler la distribution des temps de réaction dans des tâches de reconnaissance de mots.



**Figure 4.4.** : Application de la théorie du seuil à critère variable aux fonctions d'activation du modèle d'activation interactive. Le seuil d'identification varie d'un essai à l'autre suivant une distribution Gaussienne. La fonction d'activation d'une unité mot est de forme sigmoïde et déterministe. La combinaison des deux fournit un moyen de prédire les distributions allongées vers la droite des temps de réponses.

Jacobs et Grainger appliquent cette technique à plusieurs ensembles de données expérimentales et parviennent non seulement à simuler les effets observés au niveau des moyennes des temps de réponse mais, également, ils appliquent leur analyse aux distributions des temps de réponse, imposant ainsi un niveau de contrainte extrêmement fort au modèle testé. Enfin, ils testent l'hypothèse de l'interactivité et de la boucle de rétroaction allant du niveau des mots au niveau des lettres. Ils montrent qu'une version du modèle sans boucle de rétroaction simule tout aussi bien les effets comportementaux. Grainger et Jacobs (1994) fournissent, par ailleurs, d'autres arguments contre l'hypothèse de rétro-action, en simulant les effets obtenus dans la tâche de Reicher sans recourir aux interactions mots-lettres. Ils montrent, en effet, que

l'effet de supériorité des mots peut être simulé en postulant un mécanisme de génération de réponse situé à un double niveau : au niveau des mots et au niveau des lettres. L'avantage des mots vient simplement du fait qu'une source d'information supplémentaire est disponible pour identifier la lettre cible.

Grainger et Jacobs (1996) poursuivent leur approche en détaillant les procédures de génération de réponses dans la tâche de décision lexicale et également dans un protocole d'identification perceptive. Devant faire face aux résultats contradictoires observés dans différentes études sur le rôle du voisinage orthographique, ils proposent une nouvelle version du modèle d'activation interactive suggérant une procédure de réponse basée sur différents critères. Ainsi, dans la TDL, ils proposent, pour la procédure de réponse, de considérer à la fois l'activation des unités lexicales individuelles mais également l'activation lexicale globale. De même, une réponse pourrait être donnée dans ce protocole suivant le niveau d'activité lexical global ou individuel produit par une entrée visuelle. Ces détails computationnels leur permettent de résoudre les inconsistances relevées au niveau de différentes études empiriques.

Cette série d'études s'appuie donc sur l'architecture du MAI et propose un certain nombre d'extensions au modèle initial. L'ensemble de ces choix computationnels, appliqués à différents protocoles expérimentaux et différents effets empiriques, seront repris dans les modélisations des chapitres 5 et 7. Il est à noter enfin que ces extensions du MAI ne comprennent pas de représentations phonologiques. Ceci constitue notre premier travail de simulation décrit au chapitre 5.

### **4.3. Seidenberg et McClelland, 1989**

Le modèle proposé par Seidenberg et McClelland, en 1989, bien que n'étant pas le premier à envisager la question du transcodage ortho-phonologique d'un point de vue computationnel (cf. Brown, 1987 ; Sejnowski & Rosenberg, 1986 ; Reggia, Marsland, & Berndt, 1988), est le premier modèle capable d'apprendre les relations entre orthographe et phonologie à l'aide d'un système ne comprenant qu'une seule voie. Il constitue donc la première description computationnelle des modèles schématiques à une voie. Ce modèle s'inscrit, par ailleurs, dans la lignée des modèles parallèles et distribués (Rumelhart & McClelland, 1986). C'est-à-dire qu'il garde l'hypothèse d'un traitement parallèle de l'information et de différents niveaux de traitement. En revanche, il fait l'hypothèse que les représentations lexicales ou sous-lexicales

ne correspondent pas à des unités distinctes mais sont représentées de manière distribuée au sein d'un réseau d'unités sous-symboliques (Smolensky, 1988). Ce choix computationnel est lié à l'idée d'un traitement analogique des stimuli visuels et des correspondances ortho-phonologiques.

Plus précisément, ce modèle suit le schéma représenté dans la Figure 4.4. Il se compose théoriquement d'un niveau orthographique, d'un niveau phonologique, d'un niveau sémantique et de niveaux intermédiaires comprenant des unités dites "cachées". Toutefois, le niveau sémantique n'est pas spécifié dans cette version du modèle. Le niveau orthographique est composé de 400 unités et code les entrées visuelles par triplets de lettres. Le niveau phonologique comprend 460 unités codant les sorties phonologiques par triplets de traits phonétiques. Ces deux niveaux sont reliés entre eux par un niveau d'unités intermédiaires ou "cachées". Chaque unité à un niveau donné est connectée à l'ensemble des unités du niveau suivant. Le poids des connexions entre unités peut changer, c'est-à-dire que l'influence d'une unité sur l'autre peut être modulée au cours du temps.

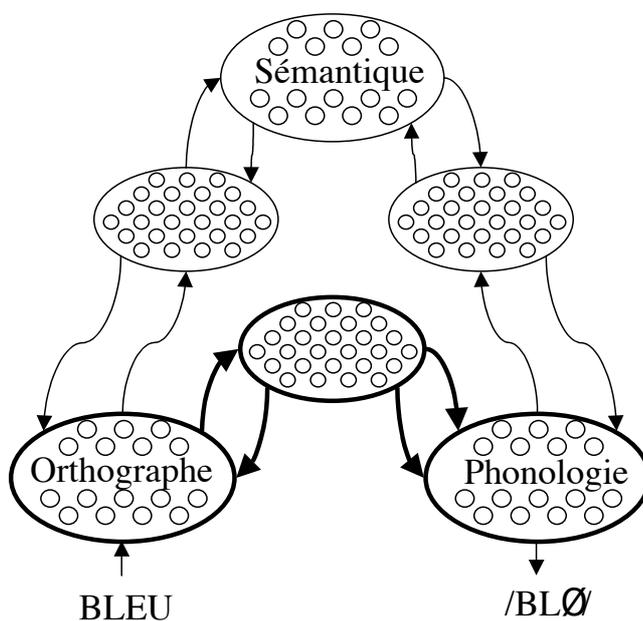


Figure 4.5. : Représentation schématique du modèle de Seidenberg et McClelland (1989).

Le modèle fonctionne ensuite en deux étapes : une phase d'apprentissage et une phase de test. Durant la phase d'apprentissage, les auteurs utilisent un lexique composé de 2897 mots monosyllabiques anglais. L'apprentissage est divisé en "époques". A chaque époque, chaque mot a une chance d'être présenté au modèle proportionnelle à sa fréquence lexicale (Kucera & Francis, 1967). Lorsqu'il est sélectionné, le mot active l'ensemble des unités orthographiques

correspondant aux triplets de lettres le composant. Ces unités envoient ensuite leur activation au niveau des unités cachées, lesquelles excitent à leur tour les unités phonologiques. Le modèle s'appuie finalement sur une procédure d'apprentissage utilisant un algorithme de rétro-propagation du gradient de l'erreur ("Back-propagation", Rumelhart, Hinton, & Williams, 1986). Cet algorithme compare l'activation obtenue au niveau des unités phonologiques à l'activation souhaitée et calcule une mesure de l'erreur produite. Cette erreur est ensuite utilisée pour ajuster le poids des connexions provenant des unités cachées, puis des unités orthographiques. Cette procédure a pour effet de réduire l'erreur produite à chaque essai.

Après un certain nombre d'époques, le modèle est censé avoir appris les relations ortho-phonologiques présentes dans le lexique qui lui a été présenté et il est possible de passer à la seconde phase de test. On présente alors une entrée orthographique au modèle. L'activation passe ensuite jusqu'aux unités cachées et, enfin, aux unités phonologiques. On mesure alors, une fois encore, un score d'erreur. Ce score indique le niveau de performance du modèle pour un mot donné. Seidenberg et McClelland présentent dans la suite de leur article une série de simulations montrant que leur modèle à voie unique est capable de simuler notamment les effets de régularité/consistance ainsi que les interactions entre fréquence et régularité (Seidenberg et al., 1984 ; Taraban & McClelland, 1987).

Malgré sa capacité à simuler un grand nombre de données expérimentales et plus particulièrement à rendre compte du problème de l'inconsistance grapho-phonémique, ce modèle a très vite été critiqué sur la question de la généralisation de son apprentissage et, donc, de la prononciation de non-mots. Besner, Twilley, McCann, et Seergobin (1990) ainsi que Coltheart et al. (1993) soulignent la faiblesse du modèle à cet égard. Ces auteurs utilisent une série de non-mots issue de l'étude de Glushko (1979) et montrent, par exemple, que le modèle produit seulement 69% de prononciations correctes contre 91% dans les conditions les plus difficiles pour les sujets humains. Seidenberg et McClelland (1990) répondent à cette critique en indiquant que leur modèle est limité dans ses capacités de généralisation à cause de l'échantillon lexical utilisé. Ce lexique réduit ne permettrait pas, selon eux, d'atteindre un niveau satisfaisant pour généraliser correctement l'ensemble des relations ortho-phonologiques. Il reste néanmoins que ce modèle semble bien limité, non pas de par sa faible expérience, mais bel et bien à cause de ses choix computationnels et surtout représentationnels. Une autre critique porte sur la manière dont le modèle simule des latences de prononciation. Seidenberg et

McClelland proposent en effet de déduire des latences de prononciation à partir des scores d'erreurs. Il semble toutefois improbable qu'une mesure du taux d'erreurs puisse être une mesure directe d'un temps de traitement.

En résumé, ce modèle propose la première version algorithmique d'un système de lecture à une voie. Il est capable, par ailleurs, d'apprendre les relations statistiques entre orthographe et phonologie, sans pour autant utiliser des représentations symboliques des codes orthographiques et phonologiques. Toutefois, ses capacités de généralisation à des non-mots sont mises en question et semblent révéler une carence importante de ce modèle. Le modèle de Seidenberg et McClelland (1989) ne serait ainsi pas en mesure de résoudre convenablement le problème de la prononciation des non-mots.

#### **4.4. Coltheart et al., 1993**

Alors que le modèle de Seidenberg et McClelland (1989) proposait une version du modèle schématique à une voie, le modèle de Coltheart et al. (1993) fournit une version prototypique et computationnelle du modèle à deux voies : le modèle à deux voies en cascade (DRC pour "Dual-Route Cascaded model"). Ce modèle propose l'implémentation d'un système de lecture composé d'une voie lexicale et d'une voie non-lexicale (Figure 4.6). La voie lexicale comprend la même structure que le MAI, à laquelle sont ajoutés un niveau de représentation phonologique des mots et un système sémantique (non-implémenté). Cette voie code toutes les correspondances ortho-phonologiques au niveau lexical ; elle permet donc de résoudre le problème de la régularité/consistance en stockant en mémoire lexicale la prononciation de chaque mot. La voie non-lexicale est constituée d'un système de conversion des graphèmes en phonèmes. Ce système comprend un ensemble de règles de conversion permettant d'associer chaque graphème au phonème avec lequel il a la relation la plus fréquente. Grâce à ce système sous-lexical, le DRC est en mesure de résoudre le problème de la prononciation des non-mots.

Comme nous l'avons déjà noté, plusieurs types de représentations peuvent être adoptés au niveau des conversions ortho-phonologiques (notamment le niveau de la rime). Cependant, le modèle de Coltheart et al. (1993) ne prend en compte que les unités graphèmes. Par ailleurs, ce modèle postule l'existence d'un mécanisme utilisant des règles et, ce, pour décrire des processus de perception. On peut ainsi se demander dans quelle mesure ce choix théorique est opportun pour rendre compte de processus de perception rapides et automatiques (un sys-

tème de règles étant généralement coûteux en temps de traitement). Enfin, ce modèle ne postule plus l'indépendance des voies lexicales et non-lexicales mais des processus d'interaction entre ces deux systèmes. C'est, en effet, par l'interaction de ces deux voies qu'est produite la sortie phonologique au niveau du système phonémique. Par contre, la voie lexicale est censée être plus rapide et automatique que la voie non-lexicale. Dans des simulations récentes de ce modèle, cette hypothèse est implémentée en retardant le début de la procédure de conversion dans la voie non-lexicale (Rastle & Coltheart, 1998). De plus, alors que la voie lexicale fonctionne en parallèle, la voie non-lexicale fonctionne de manière sérielle. Cette hypothèse a été appuyée par le résultat d'une étude où Rastle et Coltheart (1994) obtiennent un effet de régularité d'autant plus fort que l'irrégularité se trouve en début de mot.

Le DRC fournit donc à la fois une description claire des différents composants hypothétiques du système de lecture mais également une description détaillée de leur organisation. Ce modèle résout, par ailleurs, le double problème de la consistance et de la production des non-mots. Il postule pour cela la présence de deux sous-systèmes ayant chacun une dynamique différente. De plus, par rapport aux pathologies telles que la dyslexie phonologique acquise (Beauvois & Derouesne, 1979 ; Funnel, 1983) ou la dyslexie de surface (Marshall & Newcombe, 1973 ; McCarthy & Warrington, 1986 ; Patterson, Marshall, & Coltheart, 1985), il propose un cadre théorique capable de rendre compte de ces deux troubles du langage en les attribuant à des dysfonctionnements de l'une ou l'autre des deux voies de traitement.

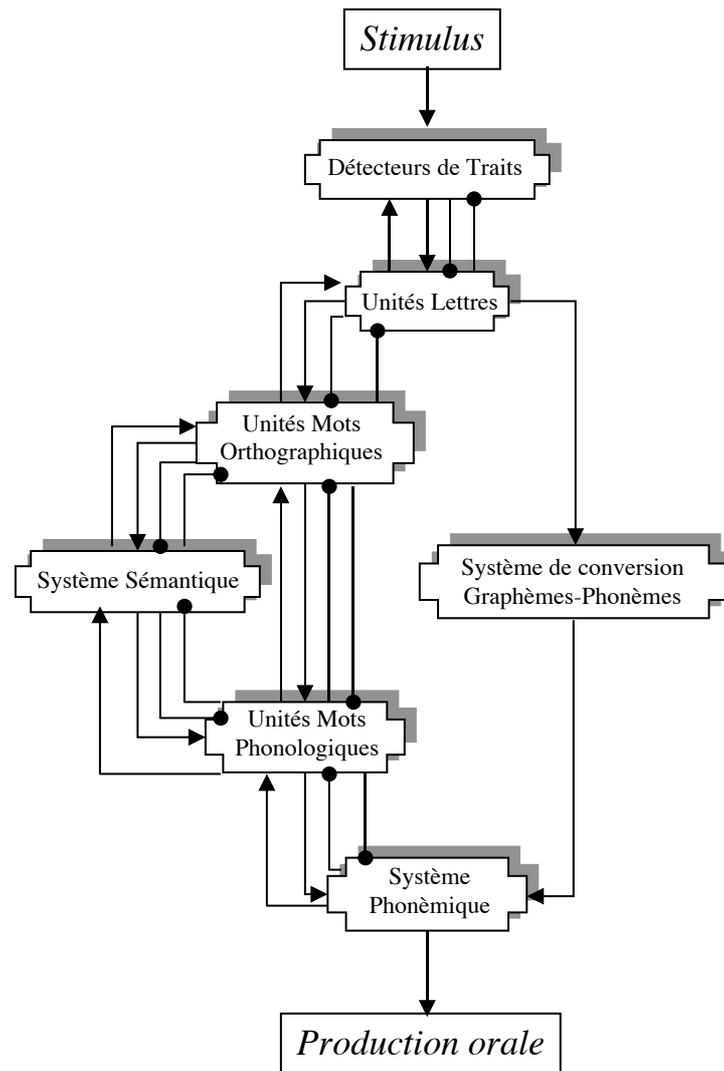


Figure 4.6. : Description schématique du modèle à deux voies en cascades.

#### 4.5. Norris, 1994

Il existe d'autres versions du modèle à deux voies incorporant des unités plus larges que les graphèmes dans la voie non-lexicale. Par exemple, Norris et Brown (1985) et Patterson et Morton (1985) proposent d'inclure la rime comme unité alternative et envisagent ainsi un autre sous-système chargé de coder les correspondances entre la rime<sup>7</sup> orthographique et phonologique. Shallice, Warrington et McCarthy (1983) et Shallice et McCarthy (1985) proposent même un système composé de plusieurs types d'unités ortho-phonologiques : les consonnes initiales, la voyelle, les consonnes finales, la rime, les consonnes initiales + la voyelle, les syllabes et les morphèmes. Ces différentes unités seraient activées en parallèle et

<sup>7</sup> En Anglais, le terme "rime" est employé plus spécifiquement et correspond, au niveau phonologique, à la voyelle associée aux consonnes finales. En revanche, le correspondant orthographique de la rime est appelé "body". Nous utiliserons ici les termes "rime orthographique" et "rime phonologique".

combinées pour donner une prononciation unique. Le modèle proposé par Norris (1994) envisage une implémentation de ce type de système, en ne considérant que des mots monosyllabiques (excluant ainsi les unités syllabes et morphèmes).

Ce modèle comprend deux niveaux : un niveau orthographique, où sont représentées des unités orthographiques telles que les lettres, les graphèmes, les groupements consonantiques, la rime, etc., et un niveau phonologique divisé en onset, voyelle et coda. Les connexions entre unités orthographiques et unités phonologiques sont établies a priori suivant un algorithme d'extraction de règles de correspondance. Ensuite, lorsqu'une entrée visuelle est présentée au modèle, celle-ci va activer l'ensemble des unités qui lui correspondent. Ces unités vont transférer cette activation au niveau phonologique. Après compétition entre les unités phonologiques, seule une unité à chaque position gagne, donnant ainsi la prononciation du modèle.

L'intérêt d'un tel modèle est de fournir une description computationnelle simple d'un modèle de type analogique comprenant différents niveaux de représentations. Ce modèle soulève également un certain nombre de questions par rapport au nombre d'unités employées. La simplicité du modèle est en effet pondérée par le grand nombre de représentations et d'unités de traitement nécessaires. De même, alors que le fait de pouvoir définir la nature de toutes les unités d'un système soit un atout du point de vue de la transparence et de la compréhension du système, le grand nombre d'unités implique une dynamique globale beaucoup plus complexe. Si ce modèle suggère de considérer d'autres groupements orthographiques que les graphèmes, il semble ne pas être assez spécifique du point de vue de la sélection de ces groupements.

#### **4.6. Plaut et al., 1996**

Le modèle de Plaut et al. (1996) est une version révisée du modèle de Seidenberg et McClelland (1989). En effet, afin de résoudre le problème de la mauvaise performance du précédent modèle concernant la prononciation des non-mots, ces auteurs proposent de modifier le codage des niveaux orthographique et phonologique afin d'optimiser la généralisation du modèle. Aussi, l'hypothèse d'un codage distribué des représentations est-elle abandonnée au profit d'un codage en unités symboliques.

Ce modèle est constitué d'un niveau orthographique divisé en trois sous-groupes d'unités graphèmes : les onsets, les voyelles et les codas. Ces unités graphèmes sont connectées tou-

jours par l'intermédiaire d'unités cachées, aux unités phonologiques, elles-mêmes divisées en trois sous-groupes onset-voyelle-coda. Ce réseau comprend ainsi 105 unités graphèmes, 100 unités cachées et 61 unités phonèmes. Le modèle utilise pratiquement la même procédure d'apprentissage que celle présentée pour le modèle de Seidenberg et McClelland (1989).

Avec ce nouveau schéma de représentation, les capacités de généralisation du modèle sont améliorées. Il reste néanmoins une ambiguïté du fait de l'hétérogénéité des représentations utilisées. En effet, ce modèle ne dispose plus de représentations distribuées mais d'unités symboliques (des graphèmes ou des phonèmes). Aussi, quand on présente une séquence de lettres au modèle, cette séquence doit être tout d'abord segmentée en graphèmes, lesquels activent ensuite des unités cachées codant, de manière distribuée, les correspondances grapho-phonémiques. Il apparaît ainsi que ces auteurs ont fait paradoxalement le choix - arbitraire ? - d'unités symboliques dans un modèle qui se voulait initialement sous-symbolique et distribué.

#### **4.7. Zorzi et al., 1998**

Dans un article récent, Zorzi et al. (1998) explorent sous un autre angle le double problème de consistance/généralisation ainsi que la question associée d'un traitement ortho-phonologique à une ou deux voies. Dans une première étude, les auteurs utilisent simplement un modèle composé de deux niveaux de représentations (orthographique et phonologique) reliés entre eux par un réseau de connexions. La tâche de ce modèle est simplement d'associer, au cours d'une phase d'apprentissage (utilisant la règle delta), les deux niveaux de représentation. L'unité de base, au niveau orthographique, est la lettre, et le phonème au niveau phonologique. A noter toutefois un point important : lettres et phonèmes sont positionnés suivant une distinction en onset et rime. Après apprentissage, ces auteurs montrent que le système réussit à extraire, presque parfaitement, les correspondances les plus régulières entre lettres et phonèmes.

Dans une seconde simulation, Zorzi et al. couplent, en parallèle, le premier modèle à un réseau d'unités cachées. La partie "unités cachées" du modèle est entraînée avec un algorithme de rétro-propagation et la partie initiale du modèle garde la même procédure d'entraînement. Cette seconde version approche les performances humaines notamment sur le plan de la prononciation des non-mots (d'après les données de Glushko, 1979). Ces auteurs soulignent ainsi que le réseau initial à deux niveaux semble avoir appris les relations régulières entre

codes orthographiques et codes phonologiques, alors que la partie comportant des unités cachées semble avoir appris les relations exceptionnelles entre les deux codes. Ils utilisent ainsi ce résultat comme argument en faveur d'un système à deux voies au sein du système de lecture.

Le modèle de Zorzi et al. se limite toutefois à la question du transcodage ortho-phonologique lors de la lecture et de la prononciation à voix haute. Il parvient à résoudre le double problème posé aux modèles en utilisant un système composé de deux voies aux fonctions distinctes. Ce modèle fait par ailleurs l'hypothèse d'un mécanisme de segmentation des mots en onset et rime, mécanisme qu'il reste à justifier (à l'instar de la segmentation en graphèmes dans le modèle de Plaut et al., 1996). En effet, ce modèle ne spécifie pas la manière dont cette segmentation s'effectue. Cette question de la segmentation visuelle reste pourtant une question importante comme nous le verrons au chapitre 7.

## **4.8. Discussion**

En résumé, nous avons réalisé, dans ce chapitre, plusieurs distinctions, à des niveaux différents, autour de la question de la modélisation des processus de reconnaissance des mots et des rapports entre orthographe et phonologie. La première distinction porte sur le format des modèles employés dans ce domaine de recherche pour décrire le système étudié. Nous pouvons ainsi différencier les modèles schématico-verbaux des modèles algorithmico-computationnels. La seconde distinction envisage la question des rapports entre orthographe et phonologie au cours de la lecture. Cette question est abordée sous l'angle de deux problèmes majeurs autour desquels s'est construite l'activité de modélisation depuis une vingtaine d'années : le problème de la régularité/inconsistance et le problème de la prononciation de non-mots. La troisième distinction porte sur les types de réponse qui sont proposés pour résoudre ces problèmes : une voie analogique ou deux voies, l'une lexicale, l'autre sous-lexicale. Nous allons maintenant reprendre ces distinctions et analyser, dans un premier temps, les avantages et inconvénients des modèles computationnels, puis, dans un deuxième temps, les modélisations proposées concernant les rapports entre orthographe et phonologie au cours de la lecture.

### 4.8.1. Les modèles computationnels

Comme nous l'avons vu, la distinction entre modèles schématico-verbaux (SV) et algorithmico-computationnels (AC) a tourné à l'avantage des seconds ces dernières années. Les modèles AC sont effectivement des outils théoriques plus précis dans la description des processus mis en œuvre lors de la perception visuelle d'un mot. De plus, grâce à leurs implémentations algorithmiques, on peut quantifier les performances de ces systèmes artificiels, interactifs et complexes. Il est ainsi possible de voir la dynamique interne d'un modèle et de mieux comprendre les interactions entre les différentes dimensions d'un stimulus. Néanmoins, plusieurs critiques peuvent être formulées à l'égard des modèles AC. Une première se rapporte à leur complexité. Ces modèles sont des systèmes artificiels extrêmement riches et dont les performances ne sont pas toujours prédictibles a priori, du fait des différents niveaux qui interviennent et interagissent, des nombreux paramètres libres qui déterminent le fonctionnement global du modèle. Ces modèles demandent ainsi qu'on les étudie eux-mêmes, c'est-à-dire que l'on détermine la gamme des comportements dont ils sont capables, ou encore que l'on sache le rôle des différents paramètres libres, et dans quelle mesure le choix des valeurs de ces paramètres est arbitraire ou déterminant. Nous revenons sur cette question au paragraphe suivant. Une seconde critique concerne la puissance descriptive de ces modèles. Du fait du grand nombre de paramètres libres utilisés, ces modèles ne sont-ils pas en mesure de pouvoir finalement tout simuler ? Là encore, seule une bonne connaissance des performances possibles d'un modèle peut permettre de déterminer exactement la gamme de ses comportements. Toutefois, selon sa complexité, il n'est peut être pas toujours possible d'avoir une connaissance aussi claire du domaine de performance d'un modèle (i.e., Grainger & Jacobs, 1996). Enfin, troisième point, on peut reprocher à ces modèles de créer des cadres conceptuels trop rigides, s'arrêtant parfois sur des détails computationnels finalement peu pertinents. Ainsi, le risque est de se perdre dans de petites questions se rapportant à la "circuiterie" d'un modèle donné et de ne plus voir les questions plus générales et essentielles liées à la compréhension du système étudié lui-même. Le risque théorique est donc de ne plus penser qu'en termes de modèles artificiels spécifiques et très/trop spécifiés, et de ne plus pouvoir sortir de ces cadres conceptuels le jour où leur potentiel descriptif maximal est atteint.

Pour revenir à la question de la compréhension du fonctionnement d'un modèle et du rôle des paramètres libres, prenons un exemple. Nous avons réalisé plusieurs simulations à l'aide

du modèle de Jacobs et Grainger (1992) qui est une extension du modèle de McClelland et Rumelhart (1981). Il reprend l'architecture du MAI et y ajoute un processus de réponse basé sur la notion de seuil. Un mot est identifié dans ce modèle lorsqu'il dépasse un seuil d'activation donné. Nous avons donc analysé le "comportement" de ce modèle en faisant varier 1) la taille de son lexique et 2) certains paramètres importants (l'inhibition latérale au niveau lexical, la boucle de rétroaction des mots aux lettres, l'inhibition lettres-mots, la valeur du seuil de réponse).

#### 4.8.1.1. Manipulation du lexique

Nous comparons dans cette étude les prédictions de ce modèle pour un grand nombre de mots et pour deux lexiques orthographiques différents. Nous utilisons pour cela deux bases de données disponibles en Anglais : le lexique de Kucera et Francis (1967, noté K&F) et CELEX (Baayen, Piepenbrock, & van Rijn, 1993). Dans ces deux lexiques, nous sélectionnons uniquement les mots de 4 lettres (1179 mots pour K&F et 1355 pour CELEX). Seulement 1029 mots sont communs aux deux lexiques. Nous réalisons donc deux versions du modèle, l'une contenant le lexique de K&F et l'autre CELEX. Nous effectuons ensuite des simulations avec ces deux versions pour l'ensemble des 1029 mots. Les mêmes paramètres sont utilisés pour chaque version et également le même seuil d'identification (0.67). Ainsi, nous obtenons un temps d'identification (correspondant à un cycle de traitement dans le modèle) pour chacun de ces mots et pour chaque version du modèle.

La Figure 4.7 représente le résultat de ces simulations. Chaque point représente un mot, avec en abscisse le temps d'identification obtenu avec la version K&F et, en ordonnée, le temps d'identification obtenu avec la version CELEX. La Figure 4.7.A représente les résultats des simulations en prenant des valeurs discrètes du temps de traitement : lorsqu'un mot donné dépasse le seuil d'identification, on lui attribue comme temps de traitement la valeur entière du cycle auquel il est identifié. La Figure 4.7.B représente les simulations avec des valeurs continues du temps de traitement. On calcule ici une valeur décimale plus précise du temps de traitement en déterminant les coordonnées du point d'intersection entre la courbe d'activation du mot et le seuil d'identification. On obtient une corrélation de 0.71 en prenant les valeurs discrètes (moins précises) et de 0.83 avec les valeurs continues. Ces résultats nous montrent une influence de la taille du lexique sur les performances du modèle. Les différences obte-

nues peuvent être dues à deux facteurs : (1) à des différences quant à la fréquence de base des mots dans chaque lexique et (2) à la présence, déterminante, d'un voisin orthographique dans un lexique et son absence dans l'autre lexique. Par exemple, considérons le mot "KNEE". Ce mot n'a pas de voisin dans CELEX. En revanche, dans K&F, il a un voisin de plus haute fréquence, "KNEW". Ainsi les simulations pour ce mot sont :

- pour K&F : 17.59 cycles
- pour CELEX : 15.52 cycles.

Le comportement d'un modèle est donc sensible à la taille de son lexique.

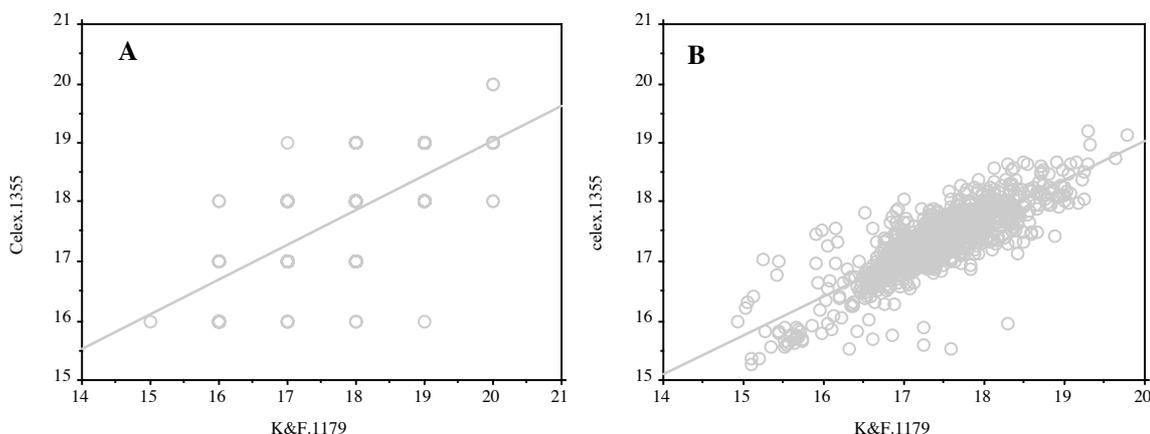


Figure 4.7. : Simulations obtenues avec les versions K&F et CELEX du modèle. Chaque point représente un mot, avec en abscisse le cycle d'identification obtenu avec la version K&F et en ordonnée, le cycle d'identification obtenu avec la version CELEX. A : Mesure discrète du temps ; B : mesure continue du temps.

#### 4.8.1.2. Manipulation des paramètres

Dans ces simulations, nous comparons les prédictions du modèle original aux prédictions de différentes versions du même modèle sur lesquelles nous avons modifié la valeur de certains paramètres : l'inhibition latérale au niveau lexical, la boucle excitatrice de rétroaction des mots aux lettres, l'inhibition lettres-mots, et la valeur du seuil de réponse. Nous procédons, comme pour la simulation précédente, en mesurant les valeurs continues des temps d'identification et en calculant les corrélations entre le modèle de référence (original) et le modèle modifié.

- Paramètre d'inhibition latérale au niveau lexical (gaW). La valeur initiale de ce paramètre est de 0.21. Les simulations sont réalisées avec quatre modifications de ce paramètre : 0.15, 0.1, 0.05, et 0. La Figure 4.8 représente le résultat de ces simulations. On observe les corrélations suivantes avec le modèle de référence : 0.83 (pour gaW = 0.15) ; 0.57 (pour gaW = 0.1) ;

0.03 (pour  $gaW = 0.05$ ) ; 0.09 (pour  $gaW = 0$ ). Ces résultats indiquent clairement qu'une modification de ce paramètre change totalement la dynamique et le comportement du modèle.

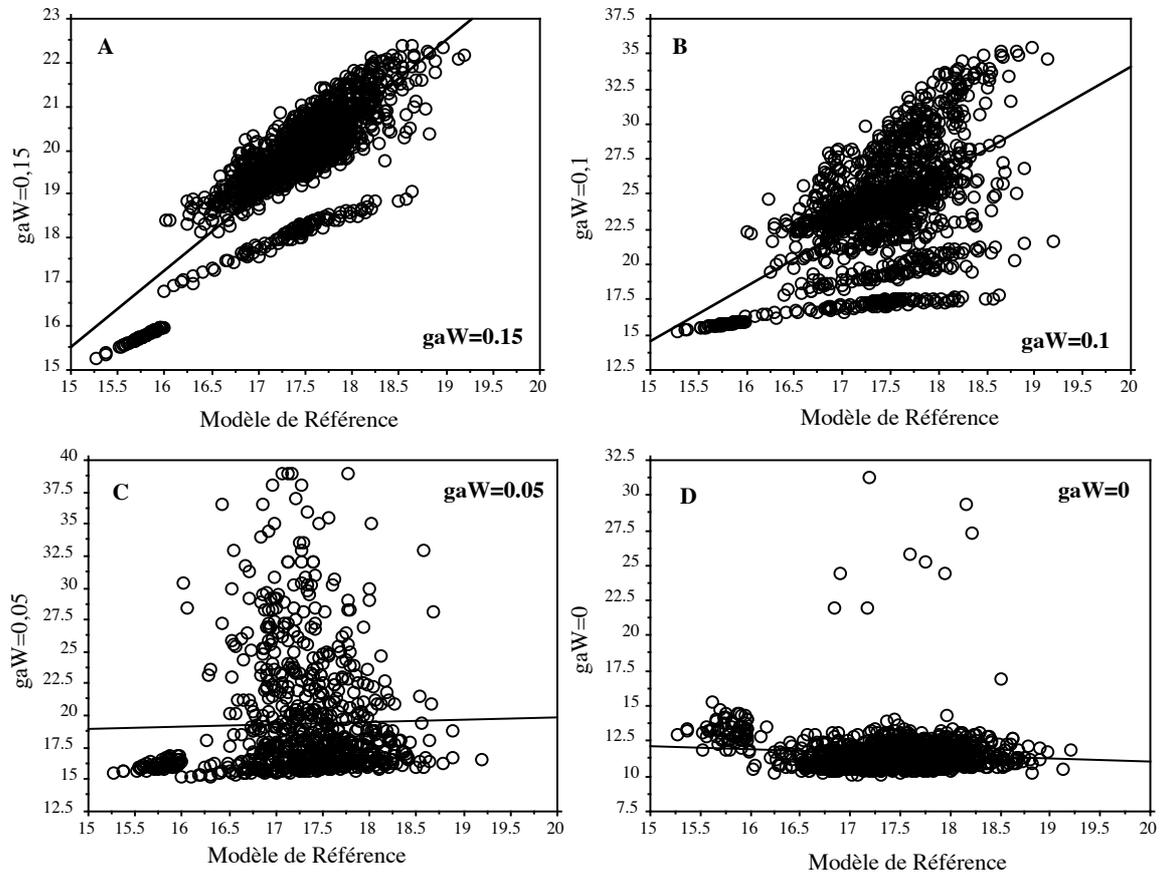
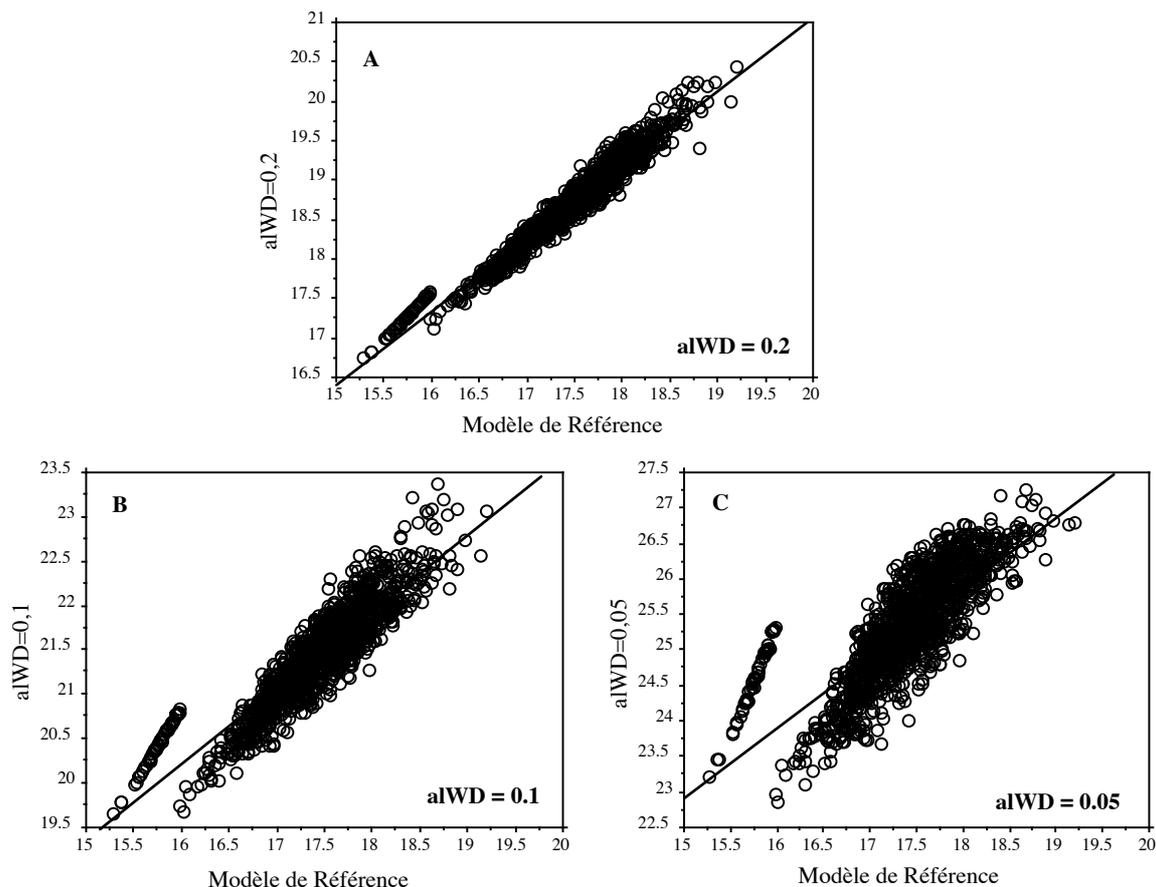


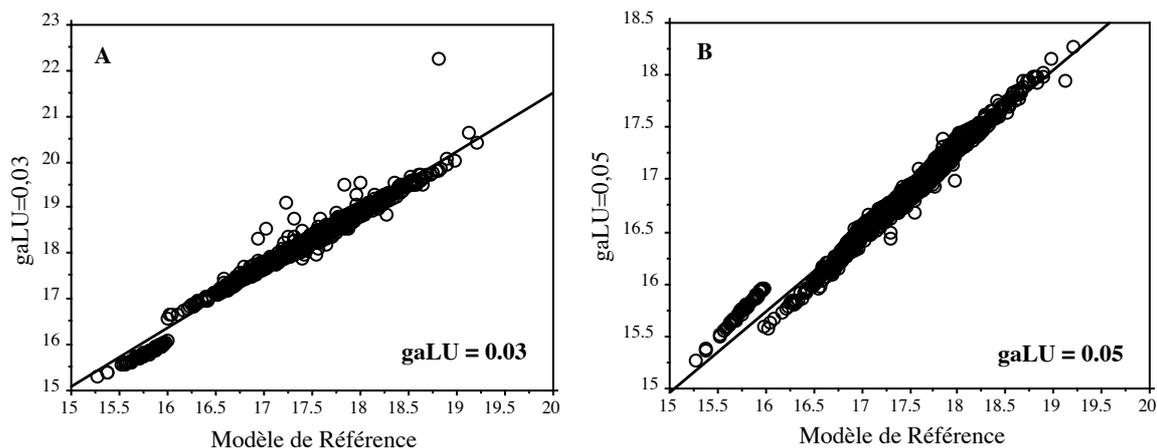
Figure 4.8. : Chaque point représente un mot, l'abscisse de ce point correspond au temps d'identification pour le modèle de référence et l'ordonnée au temps d'identification pour le modèle avec un paramètre modifié. Ce paramètre correspond ici à l'inhibition latérale au niveau lexical ( $gaW$ ). Nous lui avons attribué quatre valeurs : A. 0.15 ; B. 0.1 ; C. 0.05 ; D. 0.

- Paramètre de rétroaction excitatrice des mots aux lettres (alWD). La valeur initiale de ce paramètre est de 0.3. Les simulations sont réalisées avec trois modifications de ce paramètre : 0.2, 0.1 et 0.05. La Figure 4.9 représente le résultat de ces simulations. On observe les corrélations suivantes avec le modèle de référence : 0.98 (pour  $alWD = 0.2$ ) ; 0.90 (pour  $alWD = 0.1$ ) ; 0.79 (pour  $alWD = 0.05$ ). Ces résultats indiquent cette fois qu'une modification du paramètre change assez peu la dynamique et le comportement du modèle (cf. Grainger & Jacobs, 1994 ; Jacobs & Grainger, 1992).



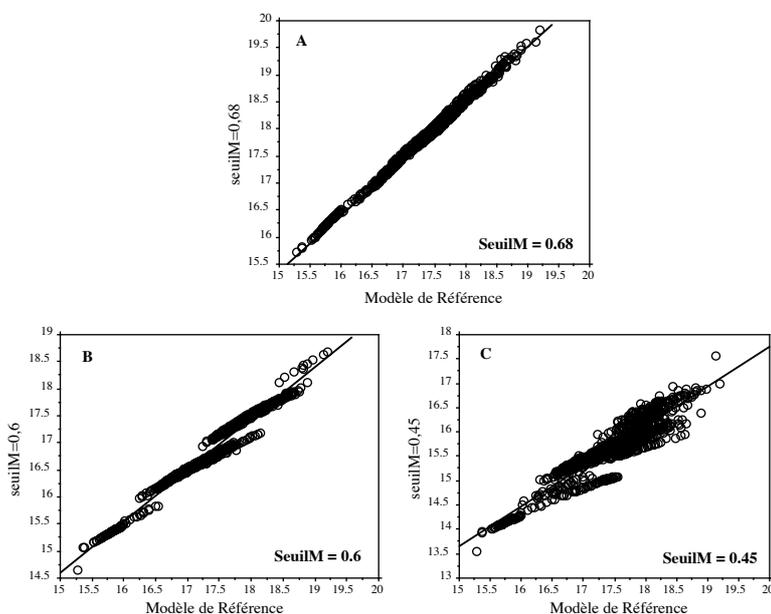
**Figure 4.9.** : Chaque point représente un mot, l'abscisse de ce point correspond au temps d'identification pour le modèle de référence et l'ordonnée au temps d'identification pour le modèle avec un paramètre modifié. Ce paramètre correspond ici à la rétro-action excitatrice des mots aux lettres (alWD). Nous lui avons attribué trois valeurs : A. 0.2 ; B. 0.1 ; C. 0.05.

- Paramètre d'inhibition lettre-mots (gaLU). La valeur initiale de ce paramètre est de 0.04 ; les simulations sont réalisées avec deux modifications : 0.03 et 0.05. La Figure 4.10 représente le résultat de ces simulations. On observe les corrélations suivantes avec le modèle de référence : 0.99 (pour gaLU = 0.03) ; 0.99 (pour gaLU = 0.05). Ce paramètre est intéressant puisqu'en l'augmentant ou en le diminuant la dynamique du modèle est qualitativement respectée. En revanche, on observe une différence quantitative puisqu'en augmentant ce paramètre la différence entre mots est plus petite et plus compactée que lorsqu'on le diminue.



**Figure 4.10.** : Chaque point représente un mot, l'abscisse de ce point correspond au temps d'identification pour le modèle de référence et l'ordonnée au temps d'identification pour le modèle avec un paramètre modifié. Ce paramètre correspond ici à l'inhibition lettre-mots (gaLU). Nous lui avons attribué deux valeurs : A. 0.03 ; B. 0.05.

- Valeur du seuil d'identification (seuil M). La valeur initiale du paramètre est de 0.67 ; les simulations sont réalisées avec trois modifications : 0.68, 0.6 et 0.45. La Figure 4.11 représente le résultat de ces simulations. On observe les corrélations suivantes avec le modèle de référence : 0.99 (pour seuil M = 0.68) ; 0.98 (pour seuil M = 0.6) ; 0.93 (pour seuil M = 0.45). Une modification du paramètre n'entraîne pas de modification importante des temps d'identification du modèle.



**Figure 4.11.** : Chaque point représente un mot, l'abscisse de ce point correspond au temps d'identification pour le modèle de référence et l'ordonnée au temps d'identification pour le modèle avec un paramètre modifié. Ce paramètre correspond ici au seuil d'identification (seuil M). Nous lui avons attribué trois valeurs : A. 0.68 ; B. 0.6 ; C. 0.45.

Ces simulations montrent combien la dynamique des modèles computationnels est dépendante des différents paramètres libres définissant les rapports entre les éléments du modèle.

Toutefois certains paramètres semblent plus critiques que d'autres. Ces études de corrélations fournissent un outil méthodologique pour mieux cerner la gamme des comportements possibles d'un modèle donné.

#### 4.8.2. Modélisation des rapports ortho-phonologiques

Si l'on considère maintenant plus particulièrement la question de la modélisation des rapports entre orthographe et phonologie, que peut-on dire des différents modèles proposés et de leurs choix computationnels respectifs ? Ces modèles se regroupent en deux catégories : les modèles à une voie (e.g., Plaut et al., 1996) et les modèles à deux voies (e.g., Coltheart et al., 1993). Si on considère d'abord l'effet de régularité/consistance ortho-phonologique, les deux catégories de modèles proposent des solutions différentes qui, toutes deux, permettent de rendre compte des données expérimentales. Les modèles à une voie expliquent cet effet en montrant que les correspondances ortho-phonologiques sont plus fragiles pour les mots irréguliers dans ce type d'architecture, par rapport aux mots réguliers dont les correspondances sont mieux établies. Les modèles à deux voies suggèrent qu'il existe une compétition entre une prononciation générée par la voie lexicale et celle générée par la voie non-lexicale. Il n'est donc pas possible de distinguer ces deux catégories de modèles sur la base de l'effet de régularité, les deux systèmes artificiels proposés étant également plausibles.

De même, sur le plan de la prononciation des non-mots, les modèles à une voie prédisent que, à partir des relations statistiques apprises pendant la phase d'entraînement entre orthographe et phonologie, il est possible de généraliser ensuite cette connaissance à l'ensemble des séquences de lettres possibles. Cependant des modèles dont les représentations sont trop distribuées ne semblent pas être en mesure de réaliser une bonne généralisation (i.e., Seidenberg & McClelland, 1989). Des représentations plus structurées à l'inverse permettraient de faciliter la généralisation (i.e., Plaut et al., 1996). Toutefois, on peut se poser ici la question du choix de la structure et du codage adoptés dans le modèle de Plaut et al. (1996). En effet, c'est la segmentation en graphèmes qui paraît faciliter la généralisation, or aucun argument empirique n'est utilisé pour justifier un tel choix computationnel.

D'un autre côté, les modèles à deux voies imaginent un système de règles grapho-phonémiques (Coltheart et al., 1993), ou des correspondances ortho-phonologiques de différentes tailles (Norris, 1994), ou encore un système associatif simple (Zorzi et al., 1998) pour

fournir la prononciation de nouvelles séquences de lettres. Il reste à savoir, pour cette catégorie de modèles, si des correspondances au niveau des graphèmes sont suffisantes ou non au sein de la voie non-lexicale (Norris, 1994) et si on ne peut pas imaginer un système de correspondances plus plausible qu'un système de règles. Quant au système associatif simple (Zorzi et al., 1998), on peut se poser ici la question du choix algorithmique à propos de la procédure d'apprentissage (la même question est valable pour Plaut et al., 1996, ou encore Seidenberg & McClelland, 1989). En d'autres termes, comment justifier ce choix algorithmique et non un autre ? De même, ce modèle met-il en évidence deux voies distinctes ou plutôt deux algorithmes d'apprentissage aux propriétés différentes ? Ainsi, il apparaît que pour la question de la prononciation des non-mots, les deux catégories de modèles fournissent encore des réponses incomplètes.

Dans un tel contexte, notre travail de modélisation consiste à poursuivre l'approche développée par Jacobs et Grainger (1992) ou Grainger et Jacobs (1996), c'est-à-dire à développer une extension du modèle d'activation interactive en incluant des représentations de type phonologique. Les choix computationnels sont donc ceux du connexionnisme symbolique ou localiste (Grainger & Jacobs, 1998) et les options que nous choisissons tentent de résoudre les quelques difficultés rencontrées encore dans les générations de modèles précédentes.

# Chapitre 5

## MROM-P

*« Le verbe lire ne supporte pas l'impératif.  
Aversion qu'il partage avec quelques autres : le verbe « aimer »... le verbe « rêver »... »*

*Daniel Pennac*

L'objectif de ce premier travail de modélisation est de développer un modèle de la reconnaissance des mots s'appuyant sur les principes computationnels du modèle d'activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981) et intégrant un niveau de représentations phonologiques. Cette étude fait l'objet d'une publication qui se trouve en Appendice I. Nous ne présentons ici qu'un résumé de ce travail ainsi qu'un commentaire. Dans la lignée des modélisations récentes de la perception des mots, ce modèle envisage uniquement le cas du traitement des mots monosyllabiques et s'applique à l'Anglais pour des raisons de disponibilité des bases de données phonologiques (notamment en ce qui concerne la fréquence d'occurrence des formes phonologiques).

### **5.1. Présentation du modèle**

Plusieurs extensions du modèle d'activation interactive (MAI, McClelland & Rumelhart, 1981) ont été réalisées afin de simuler les performances de sujets dans différents protocoles expérimentaux (e.g., la tâche de décision lexicale : Grainger & Jacobs, 1996 ; Jacobs & Grainger, 1992). Ces études gardent l'architecture computationnelle du MAI et lui greffent des procédures propres à chaque protocole (cf. Chap. 4). Ainsi, ce modèle fait implicitement l'hypothèse que les propriétés phonologiques des mots participent de manière négligeable aux processus d'identification. Toutefois, face au grand nombre d'études empiriques indiquant une influence de la phonologie au cours de la lecture (voir Chap. 3), l'objectif de cette dernière extension est d'introduire des niveaux de représentations phonologiques au sein du MAI et de

spécifier leur lien avec les niveaux de représentations orthographiques. Pour cela, nous sommes parti de la dernière version du MAI, le MROM (pour Multiple Read-Out Model, Grainger & Jacobs, 1996), version à laquelle nous avons ajouté un niveau de représentations phonologiques sous-lexicales et un niveau de représentations phonologiques lexicales. Nous appelons ainsi cette dernière version, le MROM-p (voir la description schématique de la Figure 5.1).

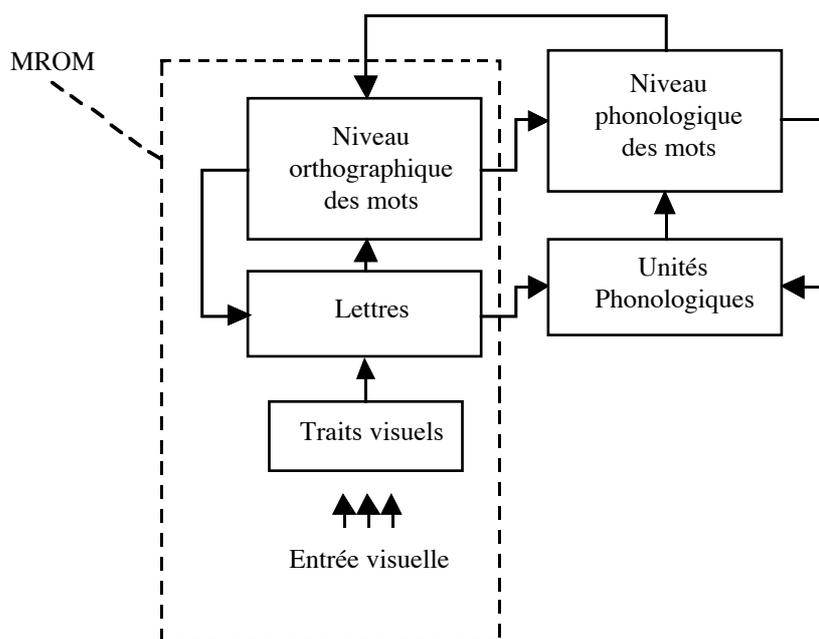


Figure 5.1. : Représentation schématique du MROM-p. La partie quadrillée en pointillés contient le modèle original sans phonologie (le MROM).

### 5.1.1. Structure interne

La réalisation d'un tel modèle suppose de résoudre tout d'abord la question de sa structure interne, c'est-à-dire, (1) le problème du format des représentations phonologiques et (2) le problème des relations entre orthographe et phonologie au niveau lexical et sous-lexical. Au niveau lexical, nous faisons l'hypothèse qu'à chaque représentation orthographique d'un mot correspond une représentation phonologique. Ainsi, par exemple, au mot TABLE, représenté au niveau orthographique, correspond la représentation phonologique /tabl/ au niveau phonologique. Ces deux représentations sont reliées par des connexions excitatrices. L'activation d'une représentation orthographique ou phonologique entraîne l'activation de l'unité phonologique ou orthographique associée. Dans le cas de mots homophones, comme par exemple les mots VOIX et VOIE, les deux représentations orthographiques distinctes sont connectées à la

même représentation phonologique, ici /vwa/. Le format des représentations lexicales phonologiques est donc similaire à celui des représentations lexicales orthographiques, et les relations entre ces deux représentations sont établies par des connexions bi-latérales. Le même type de codage, au niveau lexical, est adopté dans le modèle à deux voies de Coltheart et al. (1993).

Au niveau sous-lexical, la question du format des représentations phonologiques est indissociable de la question des relations entre représentations phonologiques et orthographiques sous-lexicales. Dans le modèle de Coltheart et al. (1993), les relations entre unités orthographiques (lettres) et unités phonologiques (phonèmes) sont matérialisées par un système de règles de correspondance entre graphèmes et phonèmes. Ce système de règles est toutefois très différent, d'un point de vue computationnel, d'un système d'activation interactive. Il fonctionne notamment de manière sérielle de la gauche vers la droite et suggère d'appliquer une procédure de recherche de règle de type machine de Turing (pour plus de détails : Rastle & Coltheart, 1998). Contrairement à ce modèle, notre objectif est de garder une structure homogène du point de vue des choix computationnels, c'est-à-dire de garder les principes computationnels du modèle d'activation interactive. En d'autres termes, notre objectif est de trouver un système permettant de mettre en correspondance les unités orthographiques de base, i.e., les lettres, et les unités phonologiques de base, i.e., les phonèmes, par l'intermédiaire d'un réseau de connexions, en gardant le principe général de propagation de l'activation ("spreading of activation"). Or, du fait de l'absence d'isomorphisme entre orthographe et phonologie (i.e., le nombre de lettres est rarement égal au nombre de phonèmes au sein d'un même mot), ce type de connectivité est impossible pour des langues comme l'Anglais ou le Français car il ne peut répondre à la flexibilité des relations entre orthographe et phonologie.

De plus, ce type de codage ne peut résoudre ce que Plaut et al. (1996) appellent le problème de la dispersion ("the dispersion problem" : Plaut et al., 1996, p.64). En effet, un tel système de correspondances sous-lexicales ortho-phonologiques doit être en mesure d'associer certaines lettres ou groupes de lettres à certains phonèmes, indépendamment de la position de ces lettres. Il doit être également en mesure de retrouver les régularités ortho-phonologiques d'une langue et de généraliser cette connaissance à n'importe quelle séquence de lettres et quelle que soit la position des lettres. Aussi, un système composé de lettres et

phonèmes reliés par un réseau de connexions va-t-il pouvoir associer une ou des lettres à un phonème donné, lorsque la ou les lettres se trouvent à une position spécifique.

Par exemple, ce type de système peut apprendre à associer les lettres AI au phonème /E/, lorsque A et I se trouvent respectivement à la première et seconde positions d'un mot (comme dans AIDE, AIRE, AILE ou AISE). En revanche, le réseau ne peut pas généraliser cette connaissance à l'ensemble des positions ; sa connaissance sera liée à la position des lettres AI dans la séquence de lettres. Ainsi, ce système ne peut nullement retrouver et activer le phonème /E/ dans le non-mot DAIP, par exemple. Un codage basé sur des lettres et phonèmes, au sein d'un modèle d'activation interactive, ne fournit donc pas une solution satisfaisante à la question des rapports entre orthographe et phonologie au niveau sous-lexical.

Afin de "minimiser" le problème de la dispersion (et non de le résoudre), Plaut et al. (1996) adoptent un système de représentation plus structuré. Ils suggèrent de segmenter la syllabe en unités onset/noyau/coda au niveau orthographique et phonologique. Nous avons également choisi d'opter pour une telle structuration des représentations mais au niveau phonologique uniquement. C'est pourquoi les représentations sous-lexicales phonologiques dans le MROM-p s'organisent en trois groupes : les onsets (groupe des consonnes initiales), les noyaux (groupe voyelle) et les codas (groupe des consonnes finales). Cette solution, à l'instar de Plaut et al. (1996), minimise également le problème de la dispersion en limitant et structurant les connexions possibles entre lettres et unités phonologiques<sup>8</sup>. La connectivité entre lettres et unités phonologiques est établie ensuite en codant les liens entre chaque lettre rencontrée dans le lexique utilisé (i.e., CELEX : Baayen, Piepenbrock, & van Rijn, 1993) et chaque unité phonologique correspondante. Le codage est dépendant de la position de la lettre dans le mot et aussi de la position de l'unité phonologique.

En résumé, la structure interne du MROM-p est définie par deux nouveaux niveaux de représentation phonologiques : un niveau lexical comprenant la représentation phonologique de l'ensemble des mots du lexique utilisé et un niveau sous-lexical divisé en unités phonologiques onset-noyau-coda.

<sup>8</sup> On ne parle plus alors d'unités phonèmes mais d'unités phonologiques. En effet, un onset, par exemple, peut être composé de plus d'un phonème, comme dans TP AIN (onset = /tɹ/) :

### 5.1.2. Dynamique

La question de la dynamique d'un modèle est liée à la question des paramètres libres régissant notamment le poids des connexions entre les différents niveaux de représentation. En effet, outre ses différents niveaux de représentation, le MROM-p est composé de connexions reliant ces différents niveaux. Ces connexions peuvent être soit excitatrices, soit inhibitrices. La nature excitatrice ou inhibitrice des connexions, ainsi que le poids des connexions, sont déterminés par des paramètres libres qui fixent la nature des interactions entre niveaux de représentations. Déterminer la valeur de ces paramètres revient à donner une certaine dynamique au modèle, c'est-à-dire un poids différent à chaque interaction. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, des variations de certains paramètres peuvent entraîner des changements importants dans le comportement global du modèle. Le choix de ces paramètres semble donc crucial, bien qu'aucune règle ne soit donnée pour optimiser ce choix.

Afin de tester le MROM-p, nous avons adopté une stratégie en cinq étapes. La première étape a consisté à trouver un ensemble de paramètres pour lequel le MROM-p est en mesure de simuler un effet phonologique robuste : l'effet de pseudohomophonie. L'objectif, ici, est de parvenir à une activation lexicale plus importante lorsqu'un pseudohomophone est présenté au modèle par rapport à un contrôle orthographique. La Figure 5.1 donne un exemple de simulation de l'activation de la représentation phonologique d'un mot à partir d'un pseudohomophone, par rapport à un contrôle orthographique.

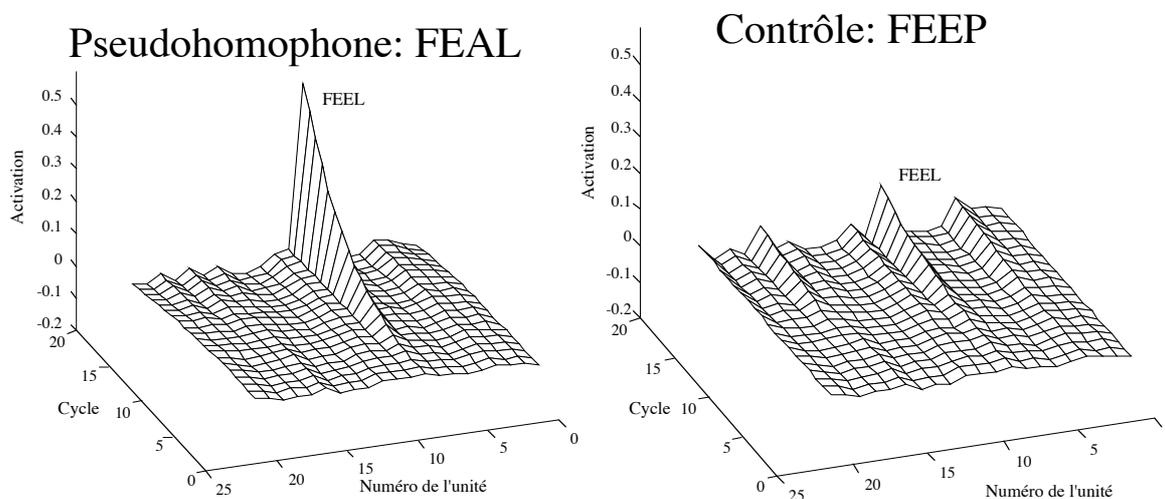


Figure 5.1. : Simulation de l'activation de la représentation phonologique d'un mot (ici le mot Anglais FEEL) à partir d'un pseudohomophone (FEAL) et d'un contrôle orthographique (FEEP). Les tracés représentent les courbes d'activations pour un échantillon du lexique phonologique.

Lorsque le modèle génère le comportement attendu, nous le testons, dans une seconde étape, au niveau d'un groupe de mots issu de données expérimentales (i.e., Coltheart et al., 1977). Nous répliquons ainsi le résultat expérimental de Coltheart et al. (1977) ce qui nous conduit à la troisième étape : généraliser ce résultat (i.e., l'effet de pseudohomophonie) à un autre ensemble de données portant sur le même effet (Seidenberg et al., 1996). Cette troisième étape consiste également à généraliser la validité du paramétrage choisi à un autre effet expérimental : l'effet de consistance grapho-phonologique (Stone et al., 1997). La bonne performance du modèle pour ces différents effets valide dans un premier temps le choix des paramètres libres. Il reste alors la quatrième étape de test au cours de laquelle le modèle est comparé aux performances de modèles concurrents. Puis, la cinquième étape vise à reconsidérer et à réviser les choix computationnels en fonction des résultats des précédentes étapes. Notre évaluation du MROM-p s'est arrêtée pour le moment à l'étape 3.

En cas d'échec du modèle dans une comparaison avec des données empiriques, deux possibilités sont à envisager : 1) soit il s'agit d'une insuffisance au niveau du paramétrage ; 2) soit il s'agit d'une limite liée à la structure du modèle et aux choix computationnels. S'il s'agit d'une erreur de paramétrage, il est possible d'essayer un nouvel ensemble de paramètres et de recommencer ensuite l'ensemble des tests expérimentaux. L'impossibilité de trouver un tel ensemble de paramètres suggère au contraire une limitation computationnelle du modèle, laquelle peut être résolue par une modification, cette fois, de certains choix computationnels. Par exemple, Jacobs et Grainger (1992) ne parviennent pas à simuler les résultats obtenus par Andrews (1992), montrant un effet facilitateur du voisinage orthographique pour des mots peu fréquents, dans une tâche de décision lexicale. Ces simulations sont réalisées avec la version SIAM (pour "Semistochastic" Interactive Activation Model) du modèle d'activation interactive. La version MROM (Grainger & Jacobs, 1996), en revanche, parvient à simuler ce résultat en gardant la structure et la dynamique du SIAM et en ajoutant simplement d'autres procédures de réponse (i.e., lecture de la réponse sur la base de l'activation lexicale globale). Dans ce cas, la modification apportée ne se situe pas au niveau des paramètres fixant la dynamique du modèle (ces paramètres étant identiques d'une version à l'autre), mais au niveau des choix computationnels régissant la procédure de réponse. Ainsi, comme on peut le voir, il existe deux niveaux d'ajustement possibles d'un modèle : l'un se situant au niveau de sa dy-

namique, l'autre au niveau de sa structure. La structure et la dynamique du MROM-p ont résisté aux différents tests expérimentaux auxquels le modèle a été soumis pour l'instant.

On peut, par ailleurs, se questionner sur le choix des données expérimentales utilisées pour tester les hypothèses structurelles et dynamiques d'un modèle. Afin de pouvoir tester effectivement les modèles proposés pour rendre compte des processus de perception des mots, il est important qu'un consensus existe autour d'un ensemble de données jugées importantes et robustes (Jacobs & Grainger, 1994). Aussi, un nouveau modèle doit-il en premier lieu faire ses preuves sur cet ensemble de données expérimentales. Après avoir passé cette première série de tests, on peut envisager des tests plus précis du point de vue de la taille des effets observés et simulés. Toutefois, un tel consensus n'existe pas encore dans le domaine de la reconnaissance des mots.

## 5.2. Discussion

On peut considérer le MROM-p comme le prototype d'un modèle d'activation interactive contenant des représentations orthographiques et phonologiques. Il se distingue notamment du modèle proposé par Coltheart et al. (1993) du point de vue des choix computationnels adoptés au niveau des correspondances ortho-phonologiques sous-lexicales. Il propose en effet de garder les mêmes principes computationnels pour l'ensemble des parties du modèle et présente ainsi une certaine homogénéité. Contrairement au modèle de Coltheart et al. (1993), il postule un mécanisme associatif simple entre lettres et unités phonologiques similaire au mécanisme associatif entre unités lettres et unités mots.

Toutefois, à l'instar du modèle de Plaut et al. (1996), le choix computationnel opéré au niveau des correspondances sous-lexicales ne permet que de minimiser et non de résoudre le problème de la dispersion des régularités ortho-phonologiques. Le modèle de Coltheart et al. (1993) fournit ici une meilleure solution à ce problème en utilisant un système de règles qui n'est pas dépendant de la position des lettres. Ce système semble cependant peu fonctionnel pour des processus aussi rapides et automatiques que les processus d'identification des mots.

Le MROM-p fournit une réponse partielle à la question des rapports entre orthographe et phonologie. Il ne permet pas en effet de résoudre le problème de la dispersion des régularités ortho-phonologiques. Il reste encore limité du point de vue de ses capacités de généralisation ortho-phonologique pour des séquences de lettres ne formant pas des mots. Il semble donc

que ce système artificiel ne soit pas en mesure de capturer les capacités fonctionnelles du système de lecture. On peut se demander si ces limites computationnelles sont dues à des choix computationnels encore inadéquats ou bien si, plus généralement, ce sont les outils conceptuels du connexionnisme symbolique qui sont à mettre en question ici. Est-il possible, en effet, de résoudre le problème de la dispersion en utilisant simplement les concepts de représentation, d'activation de ces représentations et l'idée de connexions reliant ces différents niveaux de représentation ?

Nous verrons dans le chapitre suivant que les concepts du connexionnisme symbolique peuvent garder leur pertinence pour la description des processus engagés dans la reconnaissance des mots écrits et qu'il ne sont pas mis en cause par le problème de la dispersion. Nous défendrons l'idée qu'une autre structure computationnelle et d'autres types de représentations sont nécessaires pour résoudre le problème de la dispersion, tout en gardant les principes généraux des modèles d'activation interactive. La pierre angulaire de notre démonstration repose sur la notion d'unité orthographique fonctionnelle et s'appuie sur un certain nombre de résultats expérimentaux que nous allons décrire. La notion d'unité orthographique fonctionnelle, ou encore la notion d'unité de la lecture ("reading unit"), nous conduiront à proposer un second modèle du système de lecture (Chap. 7). Avant cela, nous allons présenter maintenant une série d'expériences, réalisées en Anglais et en Français, s'articulant autour de la notion d'unité orthographique fonctionnelle.

# Chapitre 6

## Unités de la lecture

**E**n tentant de modéliser les relations sous-lexicales entre unités lettres et unités phonèmes, nous avons pu constater qu'il n'est pas possible de trouver une relation ou une fonction simple permettant de relier ces deux types d'unités linguistiques. Plus généralement, on peut remarquer que la plupart des mots anglais ou français sont composés d'un plus grand nombre de lettres que de phonèmes. En Anglais, on peut prendre l'exemple du mot BEACH, composé au niveau orthographique de 5 lettres et au niveau phonologique de 3 phonèmes : /biS/. De même, en Français, le mot DANSE est également composé de 5 lettres et de seulement 3 phonèmes : /dA)s/. La solution apportée à cette absence d'isomorphisme entre unités orthographiques et unités phonologiques est d'introduire la notion de graphème (Coltheart, 1978 ; Venezky, 1970). Un graphème est le correspondant orthographique d'un phonème. Dans les exemples ci-dessus, le mot BEACH sera composé des 3 graphèmes : B-EA-CH, et le mot DANSE des 3 graphèmes : D-AN-SE. C'est pourquoi analyser la représentation orthographique d'un mot au niveau graphémique permet d'éliminer l'incompatibilité numérique entre lettres et phonèmes.

On constate que les unités graphèmes fournissent de meilleurs "ponts fonctionnels" pour relier informations orthographiques et informations phonologiques au niveau sous-lexical. Dans ce chapitre, nous présentons une série d'expériences réalisées en Anglais et en Français, expériences qui visent à tester l'hypothèse selon laquelle les graphèmes constituent des unités

linguistiques fonctionnelles minimales pour le système de lecture. Ces expériences font l'objet de deux publications se trouvant en Appendices II et III. Nous ne présentons ici que les principaux résultats de ces expériences.

## 6.1. Expérience 2 : effet du nombre des graphèmes en Anglais

Peu d'études ont tenté de tester l'importance des unités graphèmes lors de la reconnaissance des mots. On peut citer notamment une expérience réalisée par Pring (1981), dans laquelle elle utilise l'effet de pseudohomophonie dans la tâche de décision lexicale pour montrer l'importance des unités graphèmes lors de la perception d'un non-mot. Pour cela, elle présente des pseudohomophones composés alternativement de lettres majuscules et minuscules. La manipulation expérimentale se situe au niveau de l'alternance entre majuscules et minuscules, c'est-à-dire que soit l'alternance respecte la segmentation en unités graphèmes, soit l'alternance se trouve au sein des graphèmes. Par exemple, pour le pseudohomophone anglais CHERCH (mot de base : CHURCH), composé de 3 graphèmes : CH-ER-CH, quand l'alternance maj./min. respecte la segmentation en graphèmes, on obtient : CHerCH. Quand l'alternance se trouve au sein des graphèmes, on obtient : cHeRcH. Pring (1981) observe une disparition de l'effet de pseudohomophonie lorsque l'alternance maj./min. se situe au sein des graphèmes (cHeRcH). Cet effet demeure en revanche pour une présentation respectant la segmentation en graphèmes (CHerCH). Ce résultat conforte l'idée d'un rôle fonctionnel des unités graphèmes lors de la lecture.

Plus récemment, Rastle et Coltheart (1998) mesurent les temps de prononciation de deux groupes de non-mots anglais de 5 lettres différant par leur nombre de graphèmes. Le premier groupe contient des non-mots composés de 3 graphèmes (par exemple : FOOCE -> F-OO-CE), le second groupe des non-mots composés de 5 graphèmes (par exemple : TRUSP -> T-R-U-S-P). Si les graphèmes sont des unités de la lecture, des non-mots composés de peu de graphèmes (i.e., 3) doivent être traités plus rapidement que des non-mots ayant autant de lettres que de graphèmes (i.e., 5). Pourtant, Rastle et Coltheart (1998) observent l'effet inverse : des latences de prononciation moyennes de 586 ms pour des non-mots de 3 graphèmes et de 569 ms pour des non-mots de 5 graphèmes. Rastle et Coltheart expliquent ce résultat en faisant l'hypothèse d'une compétition entre des graphèmes multi-lettres et des graphèmes à une lettre lors du transcodage ortho-phonologique. En effet, l'une des propriétés des graphèmes

est qu'ils peuvent être composés de plusieurs lettres (on les appelle alors des graphèmes multi-lettres). Or chaque lettre a elle-même le statut de graphème (on parle alors de graphème à une lettre). Si les graphèmes sont les unités de base du système de lecture, lorsque le non-mot FOOCE est présenté, il va activer à la fois la représentation des graphèmes multi-lettres OO et CE, mais également de l'ensemble des graphèmes à une lettre, i.e., O+O et C+E. Dans ce cas, le système de lecture doit inhiber une lecture au niveau des lettres individuelles qui n'est pas fonctionnelle (c'est-à-dire qui ne conduit pas à l'activation de la bonne séquence de phonèmes) et favoriser un traitement au niveau des graphèmes multi-lettres. Dans le cas du stimulus FOOCE, une compétition apparaît clairement entre ces deux niveaux. A l'inverse, pour le stimulus TRUSP, il n'y a aucune compétition entre un niveau des graphèmes multi-lettres et un niveau des graphèmes à une lettre.

Nous avons adopté un raisonnement similaire en planifiant une expérience réalisée cette fois avec des mots anglais et dans un protocole ne demandant pas de sortie phonologique : le protocole LIP (voir Chap. 2). Nous avons créé trois groupes de mots anglais de basse fréquence, tous composés de 5 lettres. Ces trois groupes se distinguent par leur nombre de graphèmes (ou encore, leur nombre de phonèmes), c'est-à-dire qu'ils sont composés respectivement de 3, 4 et 5 graphèmes. A titre d'exemple, TEETH appartient à la catégorie 3 graphèmes (T-EE-TH), BLEAT à la catégorie 4 graphèmes (B-L-EA-T) et BLAST à la catégorie 5 graphèmes (B-L-A-S-T). La liste de l'ensemble des stimuli est fournie en Annexe II. En faisant l'hypothèse que les informations phonologiques sont automatiquement activées au cours de la lecture et qu'elles participent activement à la reconnaissance des mots, s'il existe un niveau de représentations graphémiques et si, au sein de ce niveau, il existe une compétition entre graphèmes multi-lettres et graphèmes à une lettre, alors on doit obtenir des temps d'identification plus longs pour des mots composés de 3 graphèmes par rapport à des mots composés de 5 graphèmes. La Figure 6.1 présente les résultats obtenus dans cette expérience.

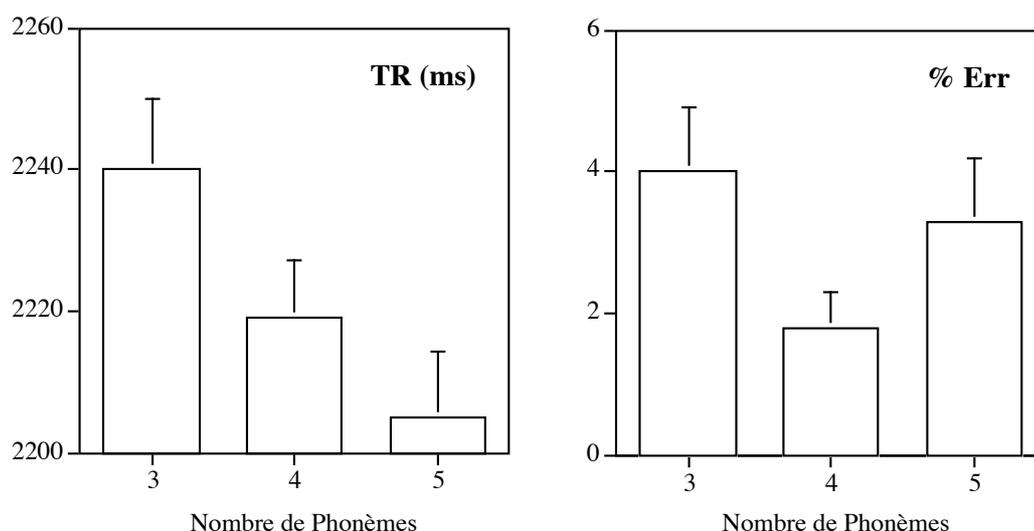


Figure 6.1. : Latences d'identification (à gauche) et pourcentages d'erreurs (à droite) pour les trois conditions expérimentales de l'expérience 2 : a) mots composés de 3 graphèmes ; b) mots composés de 4 graphèmes ; c) mots composés de 5 graphèmes.

Comme on peut le constater, nous observons un effet significatif du nombre de graphèmes sur les performances d'identification des sujets et, plus particulièrement, une diminution graduelle des temps d'identification, avec des latences d'identification plus longues pour des mots composés de 3 graphèmes. La Figure 6.2 fournit une information plus précise en donnant les différences, pour chaque sujet, entre les temps de réponse pour les mots composés de 3 graphèmes et les mots composés de 5 graphèmes. Ainsi, on peut dire que ce résultat est dans l'ensemble similaire à celui obtenu par Rastle et Coltheart (1998) à l'exception près que cette expérience est réalisée avec des mots et dans un protocole d'identification perceptive (LIP) ne demandant pas de sortie phonologique. Les graphèmes semblent bien jouer également un rôle important lors de la perception des mots. Toutefois, une interprétation alternative de ce résultat basée sur la notion de segmentation, interprétation parallèle à celle proposée par Rastle et Coltheart (1998), peut être proposée. Dans un mot composé de 5 graphèmes, la segmentation en graphèmes est simple et correspond à la segmentation en lettres. Pour des mots de 3 graphèmes, le système de lecture doit parvenir à segmenter la séquence de lettres afin de retrouver les graphèmes qui permettront d'activer la bonne séquence de phonèmes. Cette segmentation, plus complexe, pourrait demander plus de temps de traitement.

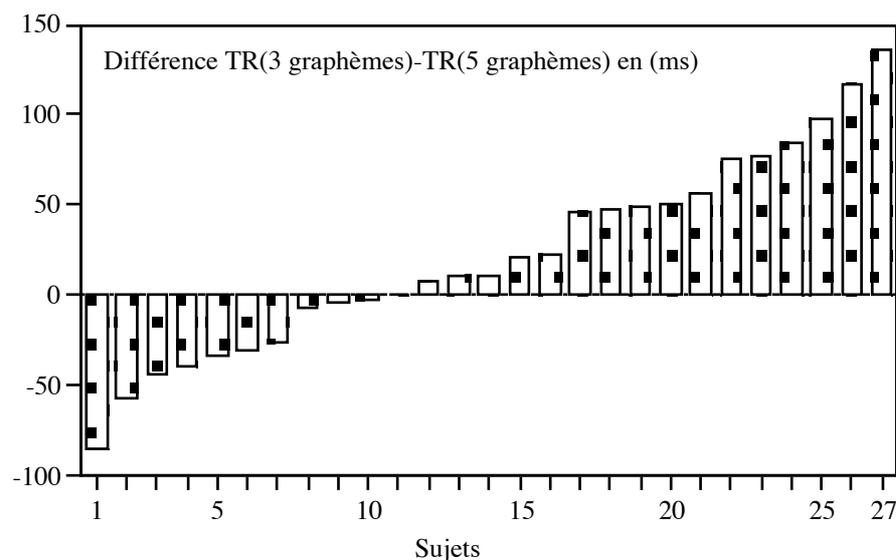


Figure 6.2. : Différences entre les temps de réponse (TR) pour les mots composés de 3 graphèmes et les mots composés de 5 graphèmes pour chaque sujet.

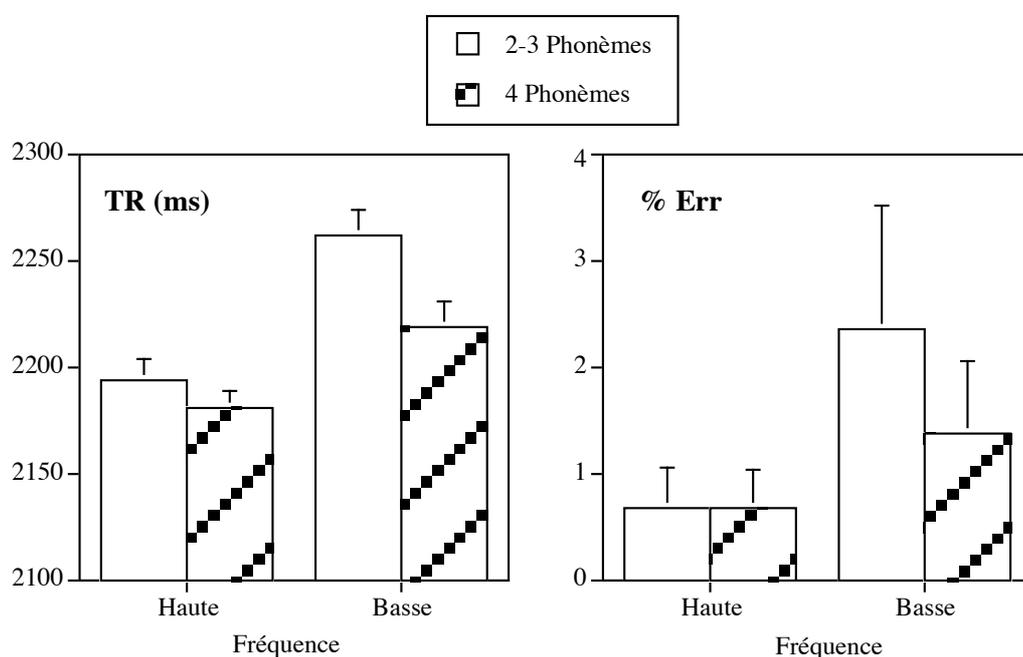
Quelle que soit l'interprétation choisie, ce résultat expérimental indique que les performances des sujets dans ce protocole d'identification sont sensibles au nombre de graphèmes composant les mots. Il fournit un argument empirique en faveur de l'hypothèse des graphèmes comme unités de la lecture. Dans une seconde expérience, nous répliquons ce résultat dans une autre langue, le Français. Par ailleurs, nous réalisons également une manipulation de la fréquence lexicale des mots. Les mots de haute fréquence sont, en effet, généralement moins sensibles aux propriétés phonologiques que les mots de basse fréquence (voir, par exemple, l'interaction entre fréquence et régularité ortho-phonologique : Andrews, 1982 ; Backman et al., 1984 ; Kai & Bishop, 1987 ; Stanhope & Parkin, 1987 ; Seidenberg et al., 1984 ; Taraban & McClelland, 1987).

### 6.3. Expérience 3 : effet du nombre des graphèmes en Français

Dans cette expérience, nous manipulons, comme pour l'expérience 2, le nombre de graphèmes composant les mots à identifier, en changeant toutefois certains choix expérimentaux. Ceci est guidé en partie par des contraintes linguistiques imposées par le Français. Il n'est effectivement pas possible de trouver suffisamment de mots monosyllabiques français de 5 lettres pour reproduire la manipulation graduelle de 3 à 5 graphèmes. D'après Celex (Content et al., 1990), 5% de cette catégorie de mots (i.e., 794 mots monosyllabiques de 5 lettres) sont composés de 2 graphèmes, 63% de 3 graphèmes, 30% de 4 graphèmes et 2% de 5 graphè-

mes. Aussi notre comparaison porte-t-elle simplement sur deux catégories : des mots composés de 2 ou 3 graphèmes et des mots composés de 4 graphèmes. Par ailleurs, nous croisons le facteur "nombre de graphèmes" avec un facteur "fréquence d'occurrence" des mots. Cette manipulation nous permet de tester si l'influence du nombre de graphèmes sur le temps d'identification des mots existe également pour les mots français de basse fréquence (réplication du résultat obtenu en Anglais) et si cet effet est généralisable à des mots de haute fréquence.

Cette expérience est réalisée avec le même protocole d'identification perceptive (LIP) que celui utilisé en Anglais. Elle comporte donc 4 conditions expérimentales : a) des mots de haute fréquence composés de 2-3 graphèmes (ex. : VINGT) ; b) des mots de haute fréquence composés de 4 graphèmes (ex. : GLACE) ; c) des mots de basse fréquence composés de 2-3 graphèmes (ex. : CRAIE) ; d) des mots de basse fréquence composés de 4 graphèmes (ex. : TRIPE). La liste de l'ensemble des stimuli est fournie en Annexe III. Les résultats obtenus sont décrits dans la Figure 6.3.



**Figure 6.3.** : Latences d'identification (à gauche) et pourcentage d'erreurs (à droite) pour les quatre conditions expérimentales de l'expérience 3 : a) mots de haute fréquence composés de 2-3 graphèmes ; b) mots de haute fréquence composés de 4 graphèmes ; c) mots de basse fréquence composés de 2-3 graphèmes ; d) mots de basse fréquence composés de 4 graphèmes.

Les résultats de cette expérience indiquent tout d'abord un effet de la fréquence des mots : les mots de haute fréquence sont identifiés plus rapidement que les mots de basse fréquence (cf. Chap. 2). De même, tout comme dans l'expérience 2, les mots composés de 4 graphèmes

sont identifiés plus rapidement que les mots contenant 2-3 graphèmes. Toutefois, on peut noter une interaction entre la fréquence des mots et le nombre de graphèmes. En effet, seuls les mots de basse fréquence présentent un effet significatif du nombre de graphèmes. La Figure 6.4 représente les différences entre mots de 2-3 graphèmes et mots de 4 graphèmes pour les deux groupes de fréquence et montre clairement l'effet marqué pour les mots de basse fréquence, et l'effet atténué pour les mots de haute fréquence. Par ailleurs, on peut voir que les mêmes tendances sont observées au niveau des pourcentages d'erreurs.

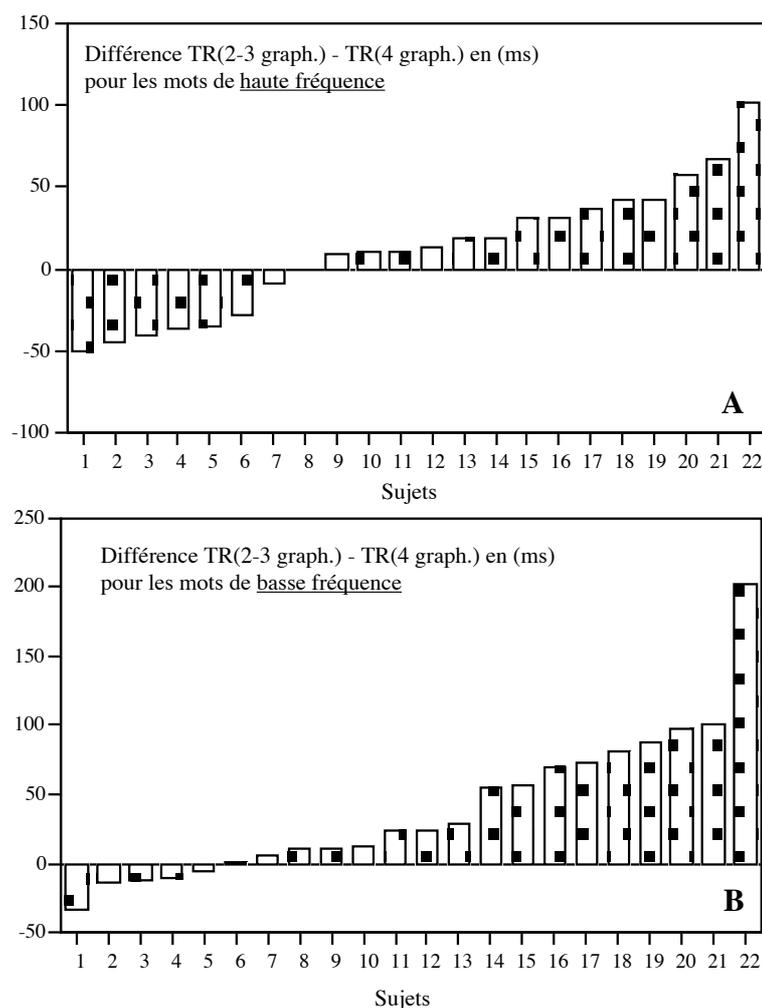


Figure 6.4. : Différences entre le temps de réponse (TR) pour les mots composés de 2-3 graphèmes et les mots composés de 4 graphèmes pour chaque sujet. Les différences pour les mots de haute fréquence sont présentées en (A) et en (B) pour les mots de basse fréquence.

L'expérience 3 nous permet donc de répliquer en Français l'effet du nombre de graphèmes/phonèmes obtenu dans l'expérience 2. Plusieurs commentaires peuvent toutefois être apportés à ce résultat. Premièrement, on constate que le nombre de graphèmes varie avec la structure phonologique des mots. Ainsi, alors que les mots de 3 graphèmes ont une structure phonologique de type CVC, CCV ou encore VCC, les mots de 4 graphèmes ont une structure

phonologique de type CCVC ou CVCC, et enfin, les mots de 5 graphèmes ont une structure phonologique de type CCVCC. Le nombre de graphèmes est donc inévitablement confondu avec la structure phonologique des mots. L'effet observé peut être dû, non pas au nombre de graphèmes, mais aux variations de la structure phonologique. Comment expliquer cependant cet effet en termes de structure phonologique des mots ? Une explication possible peut être liée au nombre d'unités consonnes dans la structure phonologique. Les mots ayant 5 graphèmes ont effectivement 4 unités phonémiques consonnes, contrairement aux mots ayant 3 graphèmes, qui n'ont que 2 unités consonnes. La première catégorie de mots est plus contraignante du point de vue des unités consonnes présentes, si l'on suit le modèle schématique proposé par Berent et Perfetti (1995). Ces auteurs suggèrent en effet que la perception d'un mot se fait en deux étapes, l'une pendant laquelle les consonnes sont traitées, l'autre pendant laquelle le système traite les voyelles. Ainsi, en donnant un statut différentiel aux voyelles et aux consonnes, on peut dire que les mots de 5 graphèmes sont plus contraignants de ce point de vue que les mots de moins de 3 graphèmes. Aucune description computationnelle précise de cette interprétation alternative n'est cependant disponible afin d'expliquer l'émergence de cet effet en détail.

Comme on vient de le voir, le présent effet lié au nombre de graphèmes reste encore discutable du point de vue de son interprétation. De ce fait, il ne fournit pas une preuve indiscutable de l'hypothèse selon laquelle les graphèmes sont les unités minimales du système de lecture. Nous avons donc tenté de tester cette hypothèse sous un autre angle, en utilisant des hypothèses et un protocole expérimental différents.

### **6.3. Expérience 4 : les unités graphèmes en Anglais**

Nous reprenons dans cette expérience l'hypothèse selon laquelle les graphèmes sont des unités orthographiques fonctionnelles du système de lecture. Nous poussons cette hypothèse à l'extrême en postulant que le système de lecture traite les graphèmes comme des unités perceptives, c'est-à-dire que lorsque ce système est confronté à une séquence de lettres comprenant, par exemple, les lettres CH, nous faisons ici l'hypothèse qu'il traite ces deux lettres comme une seule unité visuelle, unité qui active ensuite, de manière automatique, le phonème /S/ (que ce soit en Anglais ou en Français). Si l'on reprend l'exemple des mots BEACH en Anglais et DANSE en Français suivant cette hypothèse, ces mots activent les unités percepti-

ves suivantes : B-EA-CH et D-AN-SE. Certaines lettres sont ainsi automatiquement groupées en graphèmes multi-lettres.

Si le système de lecture traite les graphèmes multi-lettres comme des unités perceptives, on peut faire l'hypothèse que dans un tel contexte, il ne traite plus individuellement les lettres. Suivant cette hypothèse, dans un protocole de recherche de lettre, il est donc plus difficile de détecter une lettre (par exemple un A) dans un mot lorsque cette lettre est comprise dans un graphème multi-lettre (comme dans BEACH, en Anglais) que lorsque cette lettre est elle-même une unité graphème (comme dans GRASS). En effet, dans le mot BEACH, la lettre A apparaît dans un graphème multi-lettre (EA) qui, suivant notre hypothèse, est traité comme une unité perceptive par le système de lecture. Il faut donc décomposer cette unité pour retrouver le niveau de représentation des lettres.

La tâche de détection de lettres a déjà été utilisée pour tester ces hypothèses "d'unification" (pour une revue voir Healy, 1994). Drewnowski et Healy (1977), par exemple, demandent à des sujets de souligner l'ensemble des "e" apparaissant dans un texte. Ces auteurs montrent que les sujets oublient plus facilement les "e" lorsque ceux-ci sont dans des mots courts de haute fréquence comme le mot Anglais "THE". Ils interprètent ces erreurs de détection en expliquant que ces mots courts sont probablement traités par le système de lecture comme une unité perceptive à part entière. Aucune étude n'a toutefois essayé de tester l'hypothèse des unités-graphèmes à l'aide de ce protocole expérimental. L'objectif de cette expérience est de tester cette hypothèse en Anglais, avec des mots monosyllabiques de 5 lettres.

Par ailleurs, nous manipulons également la fréquence d'occurrence des mots utilisés, en prenant des mots de basse et haute fréquences. Cette manipulation nous permet de voir si l'hypothèse des graphèmes comme unités perceptives est dépendante du statut lexical des mots. En d'autres termes, si la fréquence d'occurrence n'influence pas les latences de détection, alors on peut supposer que l'effet observé est bien pré-lexical et se situe au niveau d'un processus de groupement perceptif automatique précoce.

Cette expérience comporte ainsi 4 conditions expérimentales pour une même lettre cible (par exemple, A) : (a) la lettre est dans un mot de haute fréquence et dans un graphème multi-lettre (ex. : BOARD) ; (b) la lettre est dans un mot de haute fréquence et est elle-même un graphème (ex. : STAFF) ; (c) la lettre est dans un mot de basse fréquence et dans un graphème multi-lettre (ex. : HOARD) ; (d) la lettre est dans un mot de basse fréquence et est

elle-même un graphème (ex. : BRASH). Il faut noter que la même lettre est présentée dans les quatre conditions expérimentales et à la même position. L'ensemble des stimuli utilisés ainsi que les temps de réponse pour chaque stimulus sont donnés en Annexe IV. La procédure expérimentale correspond à celle décrite dans la Figure 6.5. Les résultats de cette expérience sont présentés à la Figure 6.6.

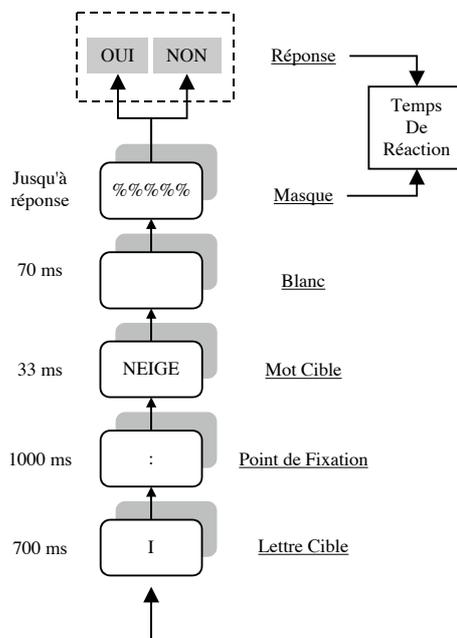


Figure 6.5. : Procédure expérimentale utilisée dans la tâche de recherche de lettre de l'expérience 4 et 5.

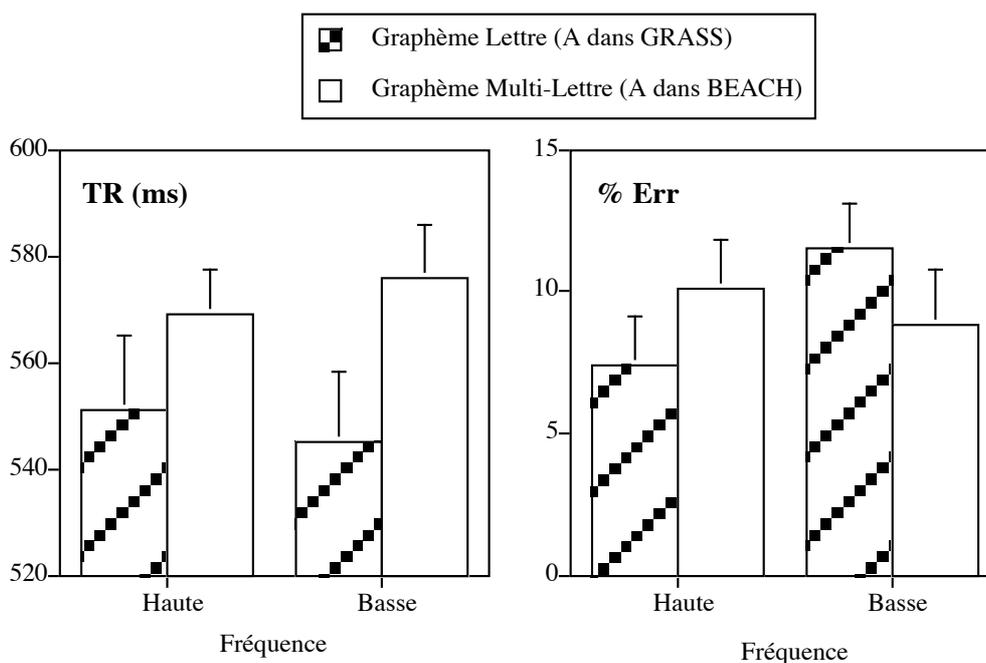
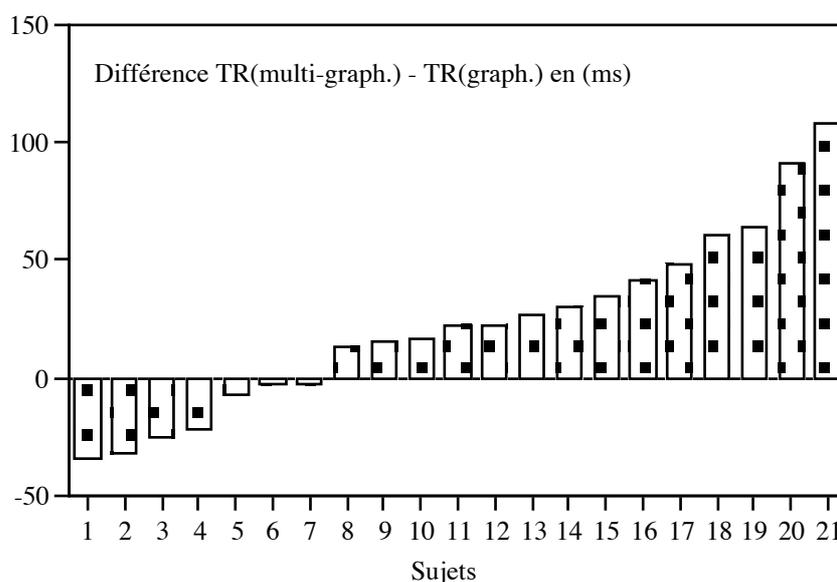


Figure 6.6. : Latence de détection de lettres et pourcentages d'erreurs dans l'expérience 4 et pour les 4 conditions expérimentales : a) la lettre est dans un mot de haute fréquence et dans un graphème multi-lettre ; b) la lettre est dans un mot de haute fréquence et est elle-même un graphème ; c) la lettre est dans un mot de basse fréquence et dans un graphème multi-lettre ; d) la lettre est dans un mot de basse fréquence et est elle-même un graphème.

Pour les temps de détection, on observe un effet significatif du type de graphème. Les lettres correspondant elles-mêmes à des graphèmes (i.e., A dans GRASS) sont identifiées plus rapidement que les lettres se trouvant dans des graphèmes multi-lettres (i.e., A dans BEACH). Cet effet est présent à la fois pour des mots de basse et de haute fréquences. Aucun effet significatif n'est visible au niveau des pourcentages d'erreurs. La Figure 6.7 donne le détail des performances pour chaque sujet (pour les latences) en soustrayant la condition "lettre dans un multi-graphème" à la condition "lettre elle-même graphème".

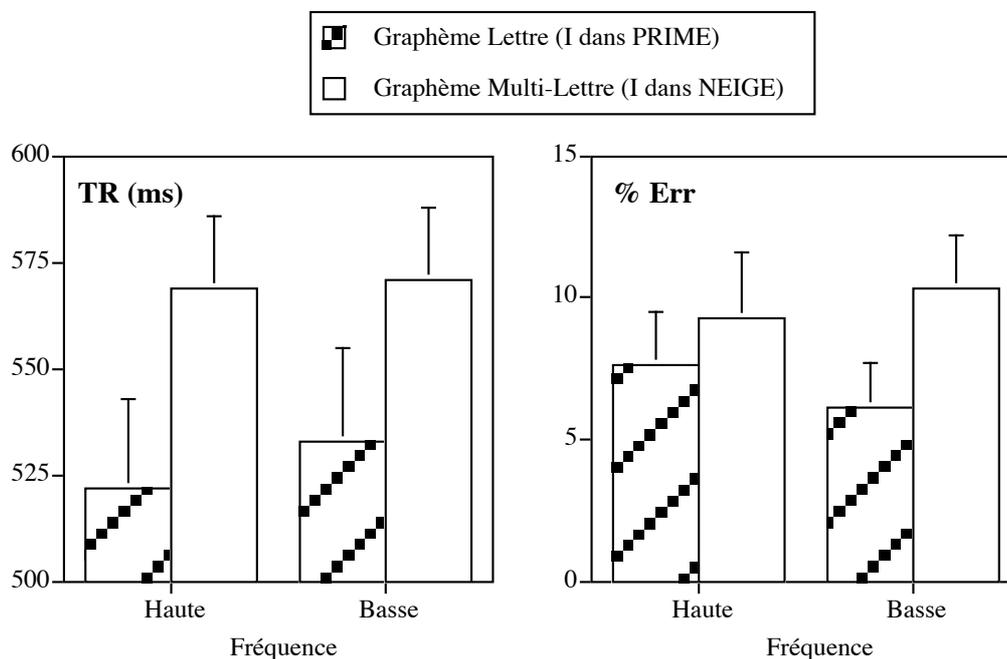


**Figure 6.7.** : Différences entre le temps de réponse (TR) pour la détection d'une lettre placée dans un multi-graphème et une lettre étant graphème elle-même, pour l'ensemble des sujets anglophones. Les réponses pour les mots de haute et basse fréquences ont été moyennées.

Ce résultat expérimental conforte l'hypothèse selon laquelle les graphèmes sont traités par le système de lecture comme des unités perceptives. En effet, la détection d'une lettre se trouvant dans un graphème multi-lettre apparaît plus difficile que lorsque cette lettre a elle-même le statut de graphème. Par ailleurs, le fait que les latences de détection ne sont pas sensibles à la fréquence des mots suggère que cet effet est pré-lexical. Ce résultat indique que le système de lecture semble réaliser un groupement visuel rapide de certaines lettres formant une unité orthographique fonctionnelle (du point de vue de la phonologie) tels que les graphèmes. Dans l'expérience suivante, nous tentons de généraliser cet effet pour une autre langue, le Français.

### 6.3. Expérience 5 : les unités graphèmes en Français

Cette expérience est une réplique en Français de l'expérience 4. Nous testons l'hypothèse des graphèmes comme unités perceptives de la lecture dans une autre langue en reprenant exactement les mêmes choix expérimentaux, c'est-à-dire une manipulation croisée du type de graphèmes et de la fréquence d'occurrence des mots. Cette expérience comporte également 4 conditions expérimentales pour une même lettre cible (par exemple, I) : (a) la lettre est dans un mot de haute fréquence et dans un graphème multi-lettre (ex. NEIGE) ; (b) la lettre est dans un mot de haute fréquence et est elle-même un graphème (ex. CRISE) ; (c) la lettre est dans un mot de basse fréquence et dans un graphème multi-lettre (ex. BEIGE) ; (d) la lettre est dans un mot de basse fréquence et est elle-même un graphème (ex. PRIME). L'ensemble des stimuli utilisés ainsi que les temps de réponse pour chaque stimulus sont donnés en Annexe IV. La procédure expérimentale est identique à celle utilisée dans l'expérience 4 (cf. Figure 6.5). Les résultats de cette expérience sont présentés à la Figure 6.8.



**Figure 6.8.** : Latence de détection de lettres et pourcentages d'erreur dans l'expérience 5 et pour les 4 conditions expérimentales : a) la lettre est dans un mot de haute fréquence et dans un graphème multi-lettre ; b) la lettre est dans un mot de haute fréquence et est elle-même un graphème ; c) la lettre est dans un mot de basse fréquence et dans un graphème multi-lettre ; d) la lettre est dans un mot de basse fréquence et est elle-même un graphème.

En ce qui concerne les temps de détection des lettres, on observe des résultats identiques à ceux obtenus dans l'expérience 4 en Anglais. Ainsi, les sujets identifient plus rapidement une lettre étant elle-même un graphème (I dans PRIME) qu'une lettre se trouvant dans un gra-

phème multi-lettre (I dans NEIGE). En revanche, on constate également l'absence d'un effet de la fréquence lexicale sur les latences de détection. Par ailleurs, les pourcentages d'erreurs reproduisent les mêmes tendances que les temps de réponse. La Figure 6.9 donne le détail des performances de chaque sujet (pour les latences) en soustrayant la condition "lettre dans un multi-graphème" à la condition "lettre elle-même graphème".

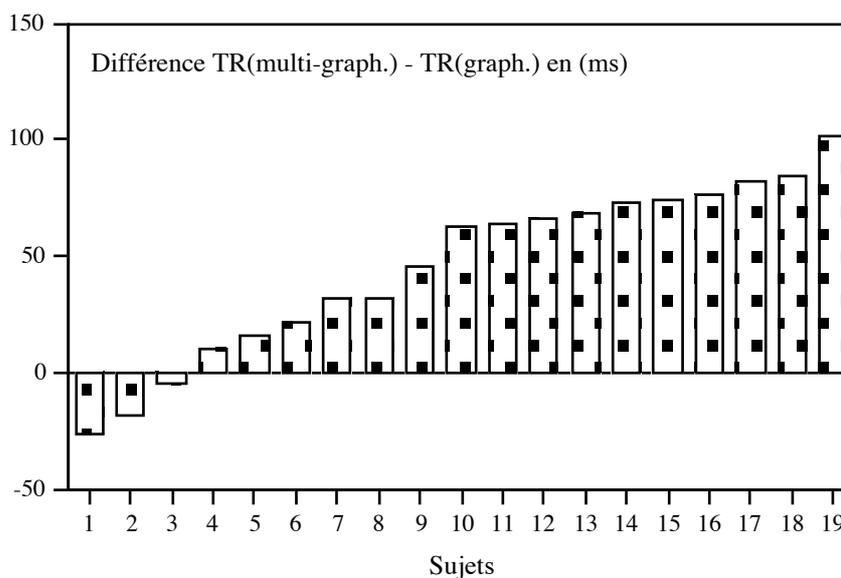


Figure 6.9. : Différences entre le temps de réponse (TR) pour la détection d'une lettre placée dans un multi-graphème et une lettre étant graphème elle-même, pour l'ensemble des sujets francophones. Les réponses pour les mots de haute et basse fréquences ont été moyennées.

Ici encore, les résultats expérimentaux montrent que les lettres se trouvant dans un graphème multi-lettre semblent avoir un statut différent de celui des lettres étant elles-mêmes des graphèmes. Il existe toutefois une interprétation alternative de ces résultats. On constate en effet que, lorsqu'une lettre est dans un graphème multi-lettre (par exemple I dans BEIGE), elle prend le son du graphème (/E/) et perd le son de la lettre (/i/). En revanche, lorsque la lettre est elle-même un graphème (par exemple, I dans PRIME), elle conserve le son de la lettre. L'effet observé ici pourrait être dû en fait à la distance phonétique entre le son de la lettre prise individuellement et le son de la lettre dans le contexte d'un graphème multi-lettre.

Cette discussion est déjà abordée dans la littérature sur les processus "d'unification" utilisant le protocole de détection de lettres dans un texte. En effet, plusieurs auteurs suggèrent que les erreurs de détection de lettres sont dues à des facteurs de distance phonétique. Corcoran (1966) montre que les sujets font plus d'erreurs de détection pour des "e" silencieux que pour des "e" prononcés. De même, Read (1983) obtient également des taux d'erreurs supérieurs pour détecter la lettre "f" dans le mot "of" que dans d'autres mots. L'interprétation de

Read est que cet effet est lié au statut phonétique de la lettre "f" qui est dans ce mot proche du "v". Cependant, Schneider, Healy et Gesi (1991) répliquent le résultat de Read (1983) en obtenant une plus grande proportion d'erreurs pour trouver "f" dans "of" (0.52) par rapport à d'autres mots (0.05). Mais, en demandant de détecter cette fois la lettre "o", ils observent des proportions d'erreurs également significativement plus élevées pour le mot "of" (0.10) par rapport à d'autres mots (0.02). L'effet est toutefois atténué. Schneider et al. (1991) concluent que la distance phonétique n'explique que partiellement les effets observés et que l'interprétation de ces résultats en termes de processus "d'unification" explique aussi une partie de l'effet.

Pour revenir à notre expérience, on ne peut exclure un rôle des facteurs phonétiques dans l'apparition de l'effet comportemental observé. Ceci est particulièrement probable en Français où le son de la lettre ne change pas quand la lettre est elle-même graphème et change, au contraire, systématiquement quand la lettre est dans un graphème multi-lettre. Cependant, cette interprétation est moins valable en Anglais. En effet, même lorsque la lettre est elle-même un graphème, elle change généralement de son lorsqu'elle est placée dans le contexte d'un mot. On peut même trouver des exemples où le son de la lettre prise isolément est plus proche du son de la lettre dans un graphème multi-lettre que lorsque la lettre est graphème elle-même. Par exemple, pour la lettre E (-> /i/), si on considère le mot PRESS, la lettre E est ici elle-même graphème et est prononcée /e/ ; alors que dans le mot FIELD, la lettre E est cette fois dans un graphème multi-lettre IE, prononcé /i/. Dans ce cas, l'hypothèse de la distance phonétique est invalidée.

Enfin, même si l'interprétation de la distance phonétique reste valable, il faut cependant expliquer comment cet effet apparaît. Si cet effet apparaît à cause de la distance phonétique, c'est que la séquence de lettres est transcodée rapidement de l'orthographe vers la phonologie. Or ce recodage phonologique rapide peut être réalisé de deux manières : soit à un niveau lexical, soit à un niveau sous-lexical. Nous pouvons rejeter l'hypothèse d'un recodage lexical puisque nous n'observons pas d'effet de fréquence (le transcodage ortho-phonologique devant être plus rapide pour des mots de haute fréquence, dans le cas d'un recodage lexical, car les mots de haute fréquence sont classiquement traités plus rapidement que les mots de basse fréquence (cf. Chap. 3). Ainsi, il reste l'hypothèse d'un recodage sous-lexical. Or, ce n'est qu'en effectuant un recodage grapho-phonémique que l'on aboutit à une distance phonétique de la lettre cible lorsqu'elle est dans un graphème multi-lettre. Il apparaît donc que l'interpréta-

tion en termes de distance phonétique est similaire à l'interprétation en termes d'unités perceptives graphèmes.

## 6.4. Discussion

Les résultats obtenus dans ces quatre expériences fournissent des arguments empiriques en faveur du rôle des unités graphèmes lors de la perception des mots. Une manipulation du nombre des graphèmes dans un mot, dans une tâche d'identification perceptive, nous montre que la présence de graphèmes multi-lettre semble ralentir les processus d'identification des mots (Expériences 2 et 3). De même, la détection d'une lettre dans une unité multi-graphème est plus coûteuse que lorsque la lettre a le statut de graphème elle-même (Expérience 4 et 5).

Le fait que les graphèmes multi-lettres semblent, dans ces quatre expériences diminuer les performances des sujets peut paraître paradoxal si on postule par ailleurs que ces unités sont hautement fonctionnelles pour le système de lecture du point de vue des rapports entre orthographe et phonologie. Le paradoxe n'est en fait qu'apparent. En effet, nous avons montré tout d'abord, dans les expériences 2 et 3, que pour des mots composés de graphèmes multi-lettres, le système de lecture ne peut traiter la séquence de lettres qui lui est présentée en plaçant son analyse au niveau des lettres. Une analyse lettre par lettre ne lui permet pas d'activer la bonne séquence de phonèmes. Le système doit au contraire (1) grouper certaines lettres en unités graphèmes fonctionnelles et (2) inhiber un traitement de type lettre par lettre. Ce conflit est toutefois très bien résolu dans un système de lecture adulte pour lequel on peut supposer des représentations bien établies des différentes unités graphèmes, bien qu'il semble néanmoins persister à une échelle très réduite au regard des résultats obtenus dans l'expérience 2 et 3 (voir aussi, Rastle & Coltheart, 1998). Les expériences 4 et 5 fournissent un argument supplémentaire pour dire que les lecteurs adultes traitent les graphèmes comme des unités. Dans ces expériences, l'identification des lettres est diminuée précisément lorsqu'elles se trouvent dans un graphème multi-lettre. Ainsi, ces expériences permettent dans l'ensemble de souligner le statut particulier des unités graphèmes au sein du système de lecture.

Plus généralement, nous avons défini au chapitre 4 les deux problèmes majeurs sur lesquels se focalisent les études de modélisation des processus de reconnaissance des mots : le problème de la régularité/consistance et le problème de la prononciation des non-mots. A la suite de cette série d'expériences, on peut certainement énoncer un troisième problème pour

ces modèles, que l'on peut appeler le problème des graphèmes multi-lettres. En d'autres termes, si l'on accepte l'idée d'un transcodage ortho-phonologique rapide, automatique et précoce, alors on peut se demander quelle procédure le système de lecture doit-il adopter lorsqu'il est en présence d'un graphème multi-lettre ? Autrement dit, face au graphème AN en Français, par exemple, comment ce système parvient-il à grouper ces lettres pour activer le bon phonème tout en inhibant un traitement lettre par lettre, sachant que, dans d'autres cas, un traitement lettre par lettre sera fonctionnel (comme pour le mot TABLE, par exemple) ? On le voit, ce problème est en fait extrêmement lié aux deux problèmes précédents, puisque la question de l'irrégularité suit celle de la formation des graphèmes, et la question de la lecture des non-mots est elle aussi intimement liée à ce niveau de transcodage ortho-phonologique sous-lexical.

On peut maintenant se demander comment les principaux modèles computationnels proposés résolvent le problème des graphèmes multi-lettres. Premièrement, le modèle de Coltheart et al. (1993) fait l'hypothèse d'une voie non-lexicale dont la fonction serait de segmenter la séquence de lettres en unités graphèmes. La procédure appliquée revient à comparer de manière sérielle (de la gauche vers la droite) les lettres présentes dans le stimulus avec une liste de graphèmes symbolisant des règles de conversion grapho-phonémiques. Cette procédure s'apparente toutefois aux procédures de recherches sérielles ("serial search") proposées dans certains modèles schématiques de la reconnaissance des mots, comme ceux de Becker (1976) ou Forster (1976). On peut ainsi se poser la question de la plausibilité fonctionnelle de ce type de procédure pour des processus de perception aussi rapides que ceux engagés dans la perception des mots. Deuxièmement, le modèle de Plaut et al. (1996) résout le problème des graphèmes multi-lettres en faisant l'hypothèse d'une segmentation, au niveau orthographique, en unités graphèmes. Ces auteurs n'expliquent cependant pas comment le système de lecture effectue cette segmentation. Troisièmement, le modèle de Norris (1994) fait l'hypothèse que différentes unités orthographiques (de différentes tailles) sont activées suite à la présentation d'une suite de lettres, dont des unités de type graphème. Ce modèle n'explique cependant pas non plus comment ces différentes unités sont activées à partir de la séquence de lettres. Ici également, les processus de segmentation, liés au problème des graphèmes multi-lettres, ne sont pas détaillés. Quatrièmement, le modèle de Zorzi et al. (1998) suppose également une procédure artificielle de segmentation de l'entrée orthographique en onset et rime.

Les mécanismes qui régissent ce choix computationnel ne sont toutefois pas expliqués par ces auteurs. De plus, ce modèle prétend résoudre le problème des correspondances grapho-phonémiques avec ce type de codage. Or, tout comme le modèle de Plaut et al. (1996), la solution computationnelle utilisée ici minimise le problème de la dispersion<sup>9</sup> et ne le résout pas. En effet, la difficulté majeure de ce type de réseaux réside dans le fait que la connaissance est liée aux connexions elles-mêmes. Or les connexions sont spatialement définies et la généralisation d'une connaissance apprise à une position donnée est tout simplement impossible. Ces réseaux peuvent alors très bien réaliser des généralisations de type interpolation mais sont incapables d'effectuer des généralisations de type extrapolation (cf. Clark & Thornton, 1997 ; Delosh, Busemeyer, & McDaniel, 1997).

Pour ce qui est du problème des graphèmes multi-lettres, ces graphèmes "existent" en quelque sorte dans les connexions entre unités orthographiques et phonologiques et ce, pour certaines positions seulement. Prenons l'exemple, en Français, du graphème CHE que l'on rencontre à la fin des mots suivants : BACHE, BICHE, TACHE, VACHE, etc. Selon le modèle de Zorzi et al. (1998), le modèle va apprendre à associer les onsets et les rimes orthographiques de ces mots aux onsets et rimes phonologiques qui leur correspondent. Ce modèle va apprendre à associer la séquence CHE, située en position 2-3-4 de la rime orthographique, à la rime phonologique /s/ située en position 2. Maintenant, si l'on présente au modèle, en phase de test, un non-mot tel que VOUCHE, la séquence CHE va se situer cette fois en position 3-4-5 et le modèle ne connaît aucune association correspondante à cette position. Ce modèle ne semble donc pas non plus être en mesure de résoudre le problème des graphèmes multi-lettres et le problème de la dispersion.

Qu'en est-il du MROM-p ? On peut dire que, tout comme le modèle de Zorzi et al. (1998), il ne résout pas le problème des graphèmes multi-lettres, pour des raisons similaires. En effet, le MROM-p code les relations ortho-phonologiques sous-lexicales au sein même des connexions reliant ces deux niveaux de représentation. Ce codage est donc dépendant de la position des lettres dans le mot et ne permet pas la généralisation des associations apprises à l'ensemble des positions dans un mot. Ainsi, l'objet de la prochaine modélisation, présentée au

---

<sup>9</sup> Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le problème de la dispersion pose la question de la généralisation d'un apprentissage grapho-phonémique, réalisé à une position donnée, à d'autres positions dans le mot. Ce problème est donc lié à celui des graphèmes multi-lettres puisque ce dernier problème suppose aussi que les procédures de groupement de lettres ne soit pas dépendantes d'une position particulière.

chapitre suivant, est précisément d'apporter une solution à ces problèmes en gardant les principes computationnels des modèles connexionnistes symboliques, et des modèles d'activation interactive plus particulièrement.

# Chapitre 7

## Le FUM

*« L'organisation systématique du domaine d'explication et la rectification continue que suggère l'application des moyens d'explication ainsi coordonnés sont les deux moments d'une connaissance vraiment dynamique, saisie dans son acte, dans son effort de conquête et d'assimilation. »*

*Gaston Bachelard*

**A**u cours des chapitres précédents, nous avons présenté un certain nombre de problèmes liés à la question du rapport entre orthographe et phonologie lors de la perception d'un mot écrit. Alors que le système de lecture parvient à résoudre ces problèmes avec plus ou moins de difficultés (mesurées par des variations de performance), nous avons constaté qu'aucune solution satisfaisante n'est proposée par les différents modèles computationnels existants, modèles dont la fonction première est de tenter de fournir une description fonctionnelle du système de lecture et de ses performances. En résumé, nous pouvons finalement distinguer deux problèmes principaux :

1) le problème de la dispersion des correspondances ortho-phonologiques (Plaut et al., 1996), c'est-à-dire comment le système de lecture parvient-il à avoir une connaissance de ces correspondances qui n'est pas dépendante, la plupart du temps, du contexte dans lequel apparaissent ces correspondances ? La résolution de ce problème permet de résoudre aussi celui de la prononciation des non-mots, c'est-à-dire de la généralisation de cette connaissance acquise et, également, le problème des graphèmes multi-lettres et de leur segmentation dans une suite de lettres.

2) le problème de la consistance grapho-phonémique, qui résulte des correspondances

multiples existant au sein de différents mots d'un même lexique entre une même lettre ou une même séquence de lettres et différents phonèmes ou séquences de phonèmes.

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle d'activation interactive se basant sur des choix computationnels différents de ceux du MROM-p et reprenant d'une certaine manière l'approche proposée par Norris (1994). L'idée centrale de ce modèle est de ne plus coder les correspondances grapho-phonémiques au sein des connexions reliant les niveaux sous-lexicaux orthographiques et phonologiques, mais de postuler l'existence d'un niveau de représentations d'unités orthographiques fonctionnelles (du point de vue des rapports entre orthographe et phonologie). Pour cette raison, nous appelons ce modèle le FUM<sup>10</sup> (pour "Functional Unit Model"). Il s'appuie sur les données empiriques décrites au chapitre 6 et développe l'idée que le système de lecture est composé d'un niveau de représentations graphémiques jouant le rôle de "ponts" fonctionnels entre orthographe et phonologie.

## 7.1. Structure du modèle

Il se compose de 5 niveaux de représentations dont 3 sont identiques à ceux du MROM-p, c'est-à-dire le niveau des détecteurs de traits et le niveau des représentations lexicales orthographiques et phonologiques. En revanche, le modèle se distingue du MROM-p en ce qui concerne les unités sous-lexicales orthographiques et phonologiques. Au niveau sous-lexical orthographique, le FUM est composé d'un niveau de représentations graphémiques et au niveau sous-lexical phonologique, il est composé d'un niveau de représentations phonémiques. La Figure 7.1 fournit une description schématique du FUM.

---

<sup>10</sup> L'implémentation algorithmique de ce modèle a été réalisée en collaboration avec Kai Richter de l'Université de Marburg en Allemagne. Seule la version "anglaise" de ce modèle sera présentée ici.

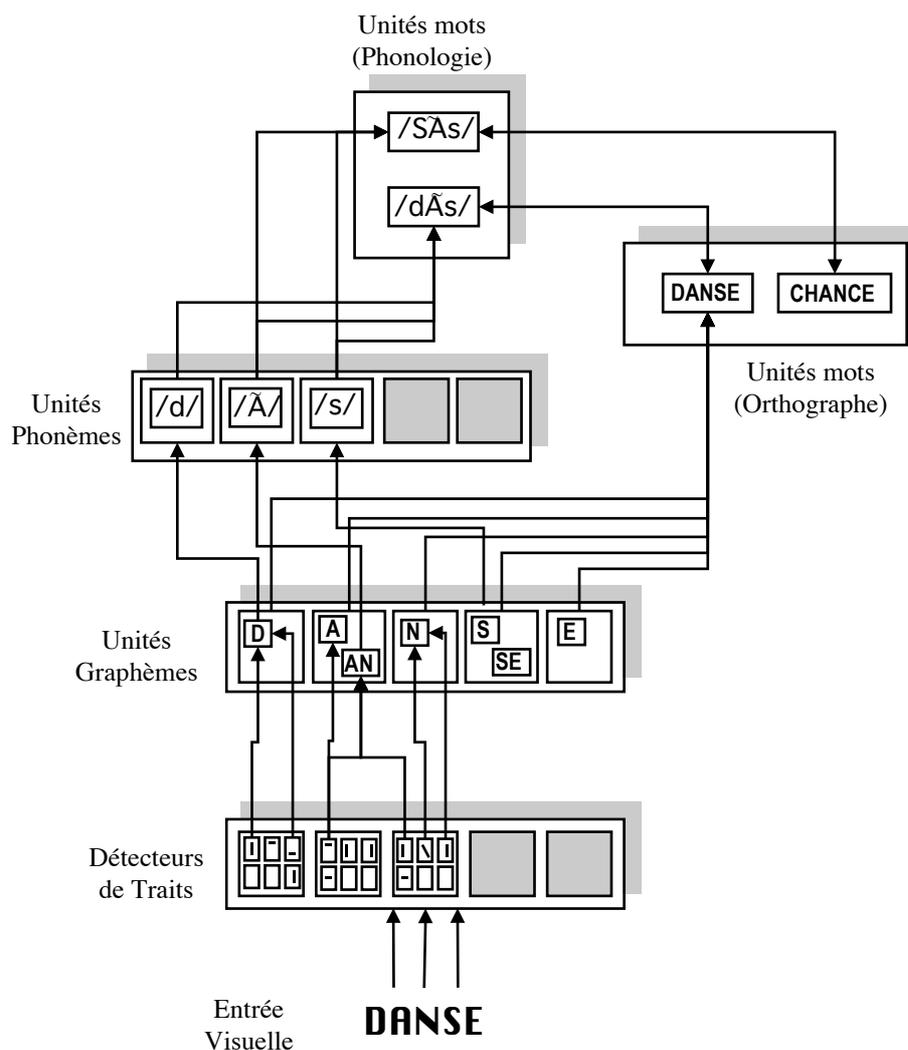


Figure 7.1. : Description de la structure du FUM. Sont représentés ici les cinq niveaux du modèle : niveau des détecteurs de traits, niveau des graphèmes, niveau des phonèmes, niveaux des représentations lexicales orthographiques et phonologiques. Ce schéma montre les unités activées à la suite de la présentation du mot "DANSE". Seuls les liens excitateurs entre niveaux ont été représentés ici.

Le niveau graphémique est l'élément clé de ce nouveau modèle. Ce niveau remplace le niveau des lettres du MROM-p et du MAI (McClelland & Rumelhart, 1981). Nous faisons ici l'hypothèse que ce niveau est divisé en autant de groupes de graphèmes qu'il y a de lettres à traiter. Ainsi, dans la Figure 7.1, cinq groupes de graphèmes sont représentés correspondant aux cinq groupes de détecteurs de traits. Chaque groupe de graphèmes contient l'ensemble des graphèmes rencontrés dans un lexique donné. Nous avons donc auparavant déterminé la liste des graphèmes présents dans l'ensemble des mots anglais monosyllabiques de 3 à 5 lettres du lexique de Celex<sup>11</sup> (Baayen et al., 1993) ainsi que la liste des correspondances grapho-phonémiques. Pour réaliser cette segmentation, nous nous référons à la liste proposée

<sup>11</sup> Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons les codes phonologiques utilisés par Celex et non plus ceux de l'IDA

par Berndt, Lynne D'Autrechy et Reggia (1994) ou encore celle de Berndt, Reggia et Mit-chum (1987). Toutefois, ces deux études ne fournissant pas une réponse à toutes les ques-tions de segmentation, nous avons fait certains choix pour certains cas particuliers :

1. Le cas des "e" silencieux en dernière position (e.g., MATE). Un grand nombre de mots anglais contiennent un "e" en position finale et ce "e" semble influencer la prononciation de la voyelle centrale ("a" dans MATE se prononce différemment que dans MAT). Aussi, du point de vue de la segmentation en graphèmes du mot MATE, peut-on envisager deux solutions (Berndt et al., 1994) : soit le "e" est relié à la dernière lettre (donnant le gra-phème TE), soit le "e" et la voyelle centrale forment le graphème A\_E (Coltheart et al., 1993). Nous optons pour la première solution pour des raisons de simplicité. Cette ques-tion reste cependant ouverte<sup>12</sup>.
2. Le cas du "r" silencieux après une voyelle centrale. Certains mots, comme BIRD, sont codés comme ayant 3 phonèmes (/b3rd/). Comme nous ne trouvons pas de solution à ce problème dans Berndt et al. (1994), nous décidons de lier le R à la voyelle centrale. Ceci est en accord avec les règles de segmentation proposées par Coltheart et al. (1993).
3. Le cas du "l" silencieux après une voyelle centrale (e.g., CALF). Pour des raisons de consistance, nous faisons le même choix que précédemment avec le R, c'est-à-dire :

$$C - AL - F \quad \Rightarrow \quad /c\#-f/$$

4. Le cas des lettres correspondant à plusieurs phonèmes (e.g., X => /ks/). C'est le cas no-tamment de certaines diphtongues<sup>13</sup> comme le U de PURE. Afin de simplifier le codage des relations grapho-phonémiques, nous introduisons un ensemble de phonèmes pour ce type de graphèmes :

"X" (comme dans "SEX") /ks/       $\Rightarrow$       /%/

"U" (comme dans "USE") /ju/       $\Rightarrow$       /§/

"U" (comme dans "PURE") /j9/       $\Rightarrow$       /} /

ainsi que pour "EU", "EUE", "EW", "EWE", "IEW" et "UE".

"O" (comme dans "ONCE") /wV/       $\Rightarrow$       /&/

5. Le cas de "QU". Dans la plupart des mots, QU est prononcé /kw/ (mise à part quelques

<sup>12</sup> On peut, en effet, envisager une troisième hypothèse où le E final est un graphème silencieux ayant toute-fois une fonction du point de vue de la voyelle centrale.

<sup>13</sup> Une diphtongue est une voyelle dont la tenue, sur le plan phonétique, comporte un changement d'articulation produisant une variation de timbre. Elle peut être considérée comme formée d'une voyelle et d'une semi-consonne.

exceptions comme QUEUE et QUAY, mots d'origine étrangère). Comme précédemment, nous choisissons d'assigner un phonème particulier pour ce graphème :

"QU" (comme dans "SQUID") /kw/ ⇒ /q/

Tableau 7.1. : Ensemble des graphèmes contenus au sein de chaque groupe de graphèmes au niveau sous-lexical orthographique du FUM.

	Graph.		Graph.		Graph.		Graph.		Graph.		Graph.		Graph.
1	a	21	ce	41	ew	61	ir	81	oa	101	pt	121	tz
2	ach	22	ch	42	ewe	62	j	82	oar	102	qu	122	u
3	ah	23	che	43	ey	63	k	83	oe	103	r	123	ue
4	ai	24	ck	44	eye	64	ke	84	oh	104	re	124	ui
5	air	25	d	45	f	65	kh	85	oi	105	rh	125	ur
6	al	26	dd	46	fe	66	kn	86	ol	106	rps	126	uy
7	ao	27	de	47	ff	67	l	87	oo	107	rr	127	v
8	ar	28	dge	48	g	68	le	88	or	108	s	128	ve
9	are	29	e	49	ge	69	ll	89	ou	109	sc	129	w
10	au	30	ea	50	gg	70	lle	90	ough	110	se	130	wh
11	aul	31	eah	51	gh	71	m	91	oul	111	sh	131	wo
12	aw	32	ear	52	gn	72	mb	92	oup	112	sle	132	wor
13	awe	33	eau	53	gu	73	me	93	our	113	ss	133	wr
14	ay	34	ee	54	gue	74	mn	94	ow	114	t	134	x
15	aye	35	ei	55	h	75	n	95	owe	115	tch	135	xe
16	b	36	eigh	56	hei	76	ne	96	oy	116	te	136	y
17	bb	37	eir	57	i	77	ng	97	p	117	th	137	ye
18	be	38	er	58	ie	78	nn	98	pe	118	the	138	z
19	bt	39	eu	59	iew	79	nne	99	ph	119	tt	139	ze
20	c	40	eue	60	igh	80	o	100	ps	120	tte	140	zz

Le Tableau 7.1 contient l'ensemble des graphèmes obtenus à la suite de cette procédure de segmentation (N = 140). De même, l'Annexe V contient l'ensemble des correspondances graphème-phonème obtenues à la suite de cette segmentation ainsi que des informations sur la consistance et la fréquence de ces correspondances. Le niveau des unités graphèmes est donc composé de 5 \* 140 unités graphèmes. Comme on peut le voir, chaque unité graphème est codée à une position donnée. Par exemple, si le mot DANSE est présenté au modèle (cf. Figure 7.1), chaque détecteur de trait correspondant, à chaque position, est actif et excite à son tour les unités graphèmes : l'unité D dans le premier groupe de graphèmes est active, de même que les unités A et AN dans le second groupe, l'unité N dans le troisième groupe, les unités SE et S dans le quatrième groupe et l'unité E dans le cinquième groupe (nous prenons ici, bien entendu, un exemple en Français). Ensuite, nous faisons l'hypothèse que ces différentes unités vont rentrer en compétition. Ce processus de compétition est implémenté grâce à un réseau de connexions inhibitrices latérales entre unités graphèmes d'un même groupe et également entre unités graphèmes de groupes adjacents. La Figure 7.2 donne le détail de ce pro-

cessus de compétition et du réseau de connexions inhibitrices entre unités graphèmes.

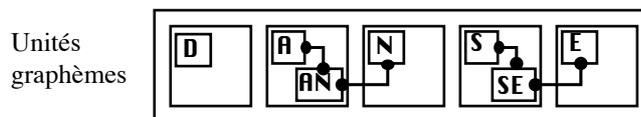


Figure 7.2 : Détail des connexions inhibitrices entre unités graphèmes d'un même groupe ou d'un groupe adjacent.

Comme on peut le voir dans cette figure, en seconde position par exemple, les unités A et AN sont en compétition, de même que l'unité AN et l'unité N situées en troisième position. De plus, tout comme Coltheart et al. (1993), nous donnons un avantage aux unités graphèmes plus importantes. Ainsi, le poids des connexions inhibitrices entre l'unité AN et les unités A et N est supérieur au poids des connexions inverses. Dans l'ensemble, grâce à ce système de représentations graphémiques et de compétition par inhibition latérale, nous implémentons de cette manière une procédure de segmentation de la séquence de lettres en utilisant les principes computationnels des modèles d'activation interactive. En effet, une fois la compétition terminée, seules les unités D, AN et SE dépassent un seuil d'activation qui leur permet d'activer les niveaux de représentations suivants.

Chacune de ces unités graphèmes active ensuite, d'une part, les unités lexicales orthographiques contenant ces graphèmes aux différentes positions respectives et, d'autre part, les unités phonèmes correspondant à ces graphèmes. Le Tableau 7.2 contient l'ensemble des unités phonèmes recensées à la suite de la segmentation décrite ci-dessus (N = 51).

Le transfert de l'activation des unités graphèmes aux unités phonèmes s'effectue suivant les correspondances établies en Annexe V. Par exemple, si le graphème anglais EA est activé, il active à son tour 5 phonèmes différents : /i/, /ʃ/, /E/, /ɪ/ et /8/ (correspondances relevées dans les mots LEAVE -> /liv/ ; HEAR -> /h7R/ ; HEAD -> /hEd/ ; GREAT -> /gr1t/ ; WEAR -> /w8R/). Seulement, le transfert d'activation est pondéré par la fréquence d'occurrence de ces correspondances : la correspondance EA -> /ɪ/, qui a la fréquence lexicale la plus forte (7219) et est présente dans le plus grand nombre de mots (86), a un poids de connexion proportionnel à cette fréquence et est donc la correspondance dominante.

Tableau 7.2. : Ensemble des phonèmes contenus au sein de chaque groupe de phonèmes au niveau sous-lexical phonologique du FUM.

	Phon.		Phon.		Phon.
1	l	18	E	35	R
2	2	19	f	36	r
3	3	20	g	37	S
4	4	21	h	38	s
5	5	22	I	39	T
6	6	23	i	40	t
7	7	24	J	41	U
8	8	25	j	42	u
9	9	26	k	43	ü
10	#	27	l	44	V
11	\$	28	m	45	v
12	%	29	N	46	w
13	@	30	n	47	x
14	A	31	o	48	Z
15	b	32	p	49	z
16	D	33	Q	50	–
17	d	34	q	51	§

Au niveau des unités sous-lexicales phonémiques, on retrouve une organisation similaire à celle du niveau orthographique. On a ainsi plusieurs groupes d'unités phonèmes contenant chacun l'ensemble des unités du Tableau 7.2. De même, il existe un système de compétition au sein de chaque groupe entre les différentes unités phonèmes activées. Chaque unité phonème active va ensuite activer les unités lexicales phonologiques correspondantes. Il existe par ailleurs une boucle de rétroaction entre le niveau lexical phonologique et le niveau des phonèmes et, ce, afin de permettre aux correspondances grapho-phonologiques les plus faibles de gagner la compétition à ce niveau de traitement. Les unités lexicales orthographiques et phonologiques activées entrent finalement en compétition avec les différentes unités d'un même niveau lexical, et activent également les unités associées appartenant à l'autre niveau lexical.

On le voit, ce modèle dispose des mêmes propriétés que ses prédécesseurs en ce qui concerne les principes computationnels adoptés. En revanche, il fait l'hypothèse différente d'un niveau de représentation constitué d'unités orthographiques fonctionnelles. Cette hypothèse permet de résoudre le problème de la dispersion, puisque les correspondances grapho-phonémiques ne sont plus codées pour une position donnée, mais pour toutes les positions quelle que soit la séquence de lettres considérée. Le choix computationnel adopté ici est donc proche de celui de Coltheart et al. (1993) par ses capacités de généralisation. En revanche, ce choix s'en distingue clairement par le format adopté. La structure du FUM est en effet homo-

gène et suit les principes computationnels des modèles d'activation interactive. La structure du modèle proposé par Coltheart et al. (1993) est une structure hybride, se basant sur un système de règles peu plausible d'un point de vue fonctionnel.

## 7.2. Paramétrage et simulations

Nous présentons dans la suite de ce chapitre une série d'études de simulations réalisées avec le FUM et avec l'ensemble de paramètres présenté dans le Tableau 7.3. Ce tableau est composé de quatre colonnes. La première colonne contient le nom de chaque connexion se trouvant dans le FUM. La deuxième colonne donne les valeurs des seuils d'activation que les unités se situant en amont de la connexion doivent dépasser pour envoyer une activation à l'unité se situant en aval de la connexion. On voit que les unités graphèmes doivent atteindre un seuil de 0.25 pour activer les unités phonèmes. En choisissant un tel seuil d'activation, on permet au processus de compétition/segmentation au niveau des unités graphèmes de se dérouler avant tout envoi d'activation (qui pourrait être encore bruitée) au niveau phonologique. La troisième colonne donne les valeurs des connexions excitatrices entre deux niveaux de représentations. La quatrième colonne fournit les valeurs des connexions inhibitrices. L'ensemble de ces paramètres fixe la dynamique interne du modèle.

Tableau 7.3. : Paramètres utilisés pour les seuils d'activation des connexions entre les différents types d'unités, pour le poids excitateur (Alpha) ou inhibiteur (Gamma) de ces connexions. Trait = Détecteur de traits ; Graph. = Graphème ; Graph. D. = Graphème Dominant ; Phon. = Phonème ; Mot Phon. = représentation lexicale phonologique ; Mot Orth. = Représentation lexicale orthographique.

Connexion	Seuil	Alpha	Gamma
Trait -> Graph.	0	0.002	0.15
Graph.-D. -> Graph.	0	0	0.3
Graph. -> Graph.	0	0	0.1
Graph. -> Phon.	0.25	0.2	0
Graph. -> Mot Orth.	0.2	0.13	0.08
Phon. -> Phon.	0	0	0.2
Phon. -> Graph.	0	0	0
Phon. -> Mot Phon.	0	0.17	0.09
Mot Phon. -> Phon.	0.15	0.2	0.2
Mot Orth. -> Graph.	0	0	0
Mot Orth. -> Mot Phon.	0.1	0.2	0
Mot Phon. -> Mot Orth.	0.15	0.2	0
Mot Orth. -> Mot Orth.	0	0	0.2
Mot Phon. -> Mot Phon.	0	0	0.2

Nous présentons maintenant une série de simulations réalisées avec cet ensemble de paramètres où nous testons le FUM avec différents effets expérimentaux (effet de pseudohomo-

phonie, effet de consistance, effet du nombre de graphèmes) dans différents protocoles expérimentaux (TDL, tâche de prononciation, LIP). Pour chaque étude de simulation, un ensemble de stimuli est présenté au modèle et des mécanismes propres à chaque protocole expérimental sont appliqués pour générer des prédictions du modèle. Nous détaillons ces principes pour chaque simulation.

### 7.2.1. Coltheart et al. (77)

La première étude de simulation vise à tester le FUM avec l'effet de pseudohomophonie obtenu par Coltheart et al. (1977) dans une tâche de décision lexicale. Il s'agit ici de prédire les latences de réponse pour des non-mots dans la TDL. Nous choisissons donc les mêmes processus de réponse que ceux proposées précédemment dans d'autres études de simulation (i.e., Grainger & Jacobs, 1996 ; Jacobs et al., 1998), c'est-à-dire que la latence de réponse des non-mots est déterminée par l'activité lexicale totale générée au niveau orthographique. Ainsi, la Figure 7.3 présente les courbes d'activation moyennes obtenues pour le groupe de non-mots pseudohomophones et le groupe de non-mots contrôles utilisés dans l'expérience de Coltheart et al. (1977). On peut voir ici que tant au niveau du lexique orthographique qu'au niveau du lexique phonologique, l'activité lexicale globale générée en moyenne par les pseudohomophones est plus importante que celle générée par les contrôles orthographiques. De même, la Figure 7.4, donne le résultat en temps de réponse (i.e., en nombre de cycles) de ces simulations avec le résultat des données empiriques (critère  $\sigma(15) = 0.45$ ,  $T_{\max} = 23$ ,  $T_{\min} = 20$ , lecture au niveau orthographique seulement). Ce premier test est donc concluant puisque le modèle parvient à reproduire le désavantage des pseudohomophones sur les pseudomots contrôles dans la TDL.

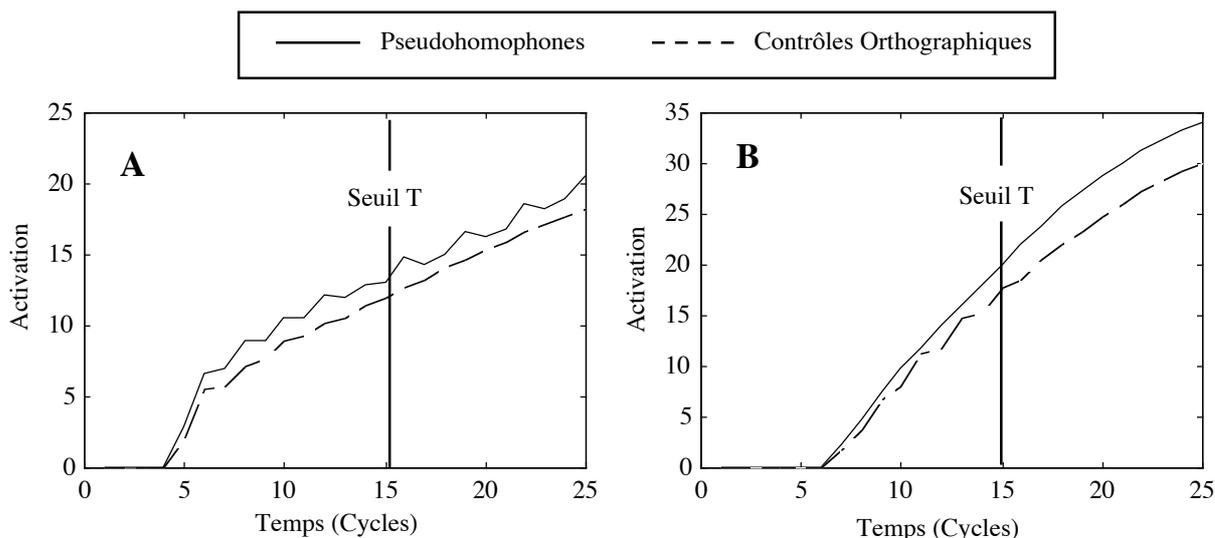


Figure 7.3. : Courbes d'activation moyennes correspondant à l'activité orthographique totale générée dans le FUM à la suite de la présentation des deux groupes de stimuli employés dans l'expérience de Coltheart et al. (1977). Le graphe [A] représente l'activité lexicale orthographique globale moyenne pour le groupe des pseudohomophones (trait plein) et le groupe des contrôles orthographiques (trait pointillés). Le graphe [B] correspond à l'activité lexicale phonologique globale.

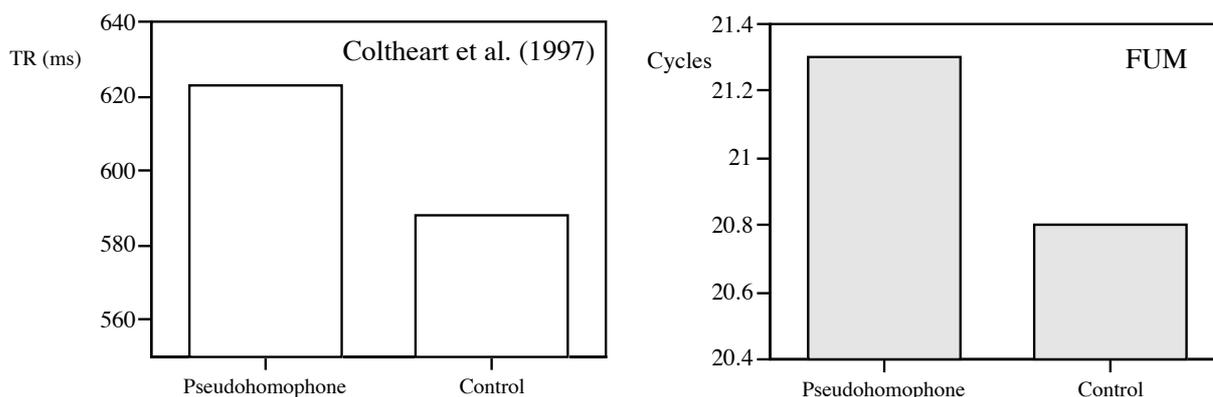
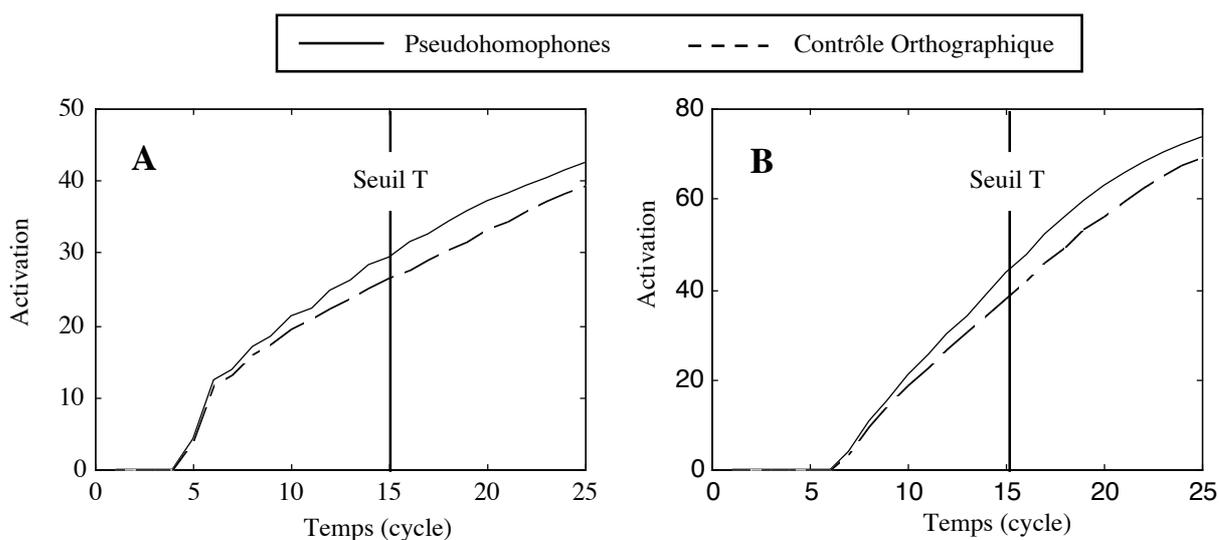


Figure 7.4. : Données empiriques de Coltheart et al. (1997) (à gauche) et latences de réponse (en cycles) pour les données simulées par le FUM (à droite).

### 7.2.2. Seidenberg et al. (1996) - TDL

Pour le même ensemble de paramètres nous testons le FUM, dans un deuxième temps, avec les données empiriques présentées par Seidenberg et al. (1996). Ces données rapportent également un effet de pseudohomophonie avec toutefois un groupe de stimuli différent de celui de Coltheart et al. (1977). La Figure 7.5 présente le résultat des simulations réalisées avec le FUM en utilisant les deux groupes de stimuli : pseudohomophones et contrôles orthographiques. Ici encore, le modèle est en mesure de reproduire l'effet observé dans cette expérience. Les pseudohomophones génèrent, en effet, une activité lexicale (tant au niveau orthographique que phonologique) plus importante que les contrôles orthographiques.



**Figure 7.5.** : Données empiriques de Seidenberg et al. (1996) (à gauche) et latences de réponse (en cycles) pour les données simulées par le FUM (à droite). Le graphe [A] représente l'activité lexicale orthographique globale moyenne pour le groupe des pseudohomophones (trait plein) et le groupe des contrôles orthographiques (trait pointillés). Le graphe [B] correspond à l'activité lexicale phonologique globale.

### 7.2.3. Seidenberg et al. (1996) : prononciation

Dans cette troisième étude de simulation, nous testons les performances du FUM avec les données de Seidenberg et al. (1996) obtenues avec les mêmes stimuli que ceux de l'expérience précédente mais dans une tâche de prononciation. Dans cette expérience, Seidenberg et al. obtiennent un avantage des pseudohomophones sur les pseudomots contrôles. Afin de simuler ces résultats, il nous faut implémenter des mécanismes de réponses spécifiques à la tâche de prononciation. Nous faisons l'hypothèse qu'une prononciation est générée par le FUM pour des non-mots lorsque la somme de l'activité générée au niveau des unités phonèmes dépasse un seuil de réponse fixé à 2.0. C'est-à-dire que nous faisons l'hypothèse que le système est capable de générer une réponse lorsque l'ensemble des unités phonèmes a dépassé un certain seuil d'activation. La Figure 7.6 présente le résultat des simulations obtenues avec les deux groupes de stimuli. On voit ainsi que le FUM est en mesure de simuler l'avantage des pseudohomophones dans la tâche de prononciation. L'activité phonémique générée par les pseudohomophones atteint effectivement plus rapidement le seuil de réponse que celle générée par les contrôles orthographiques.

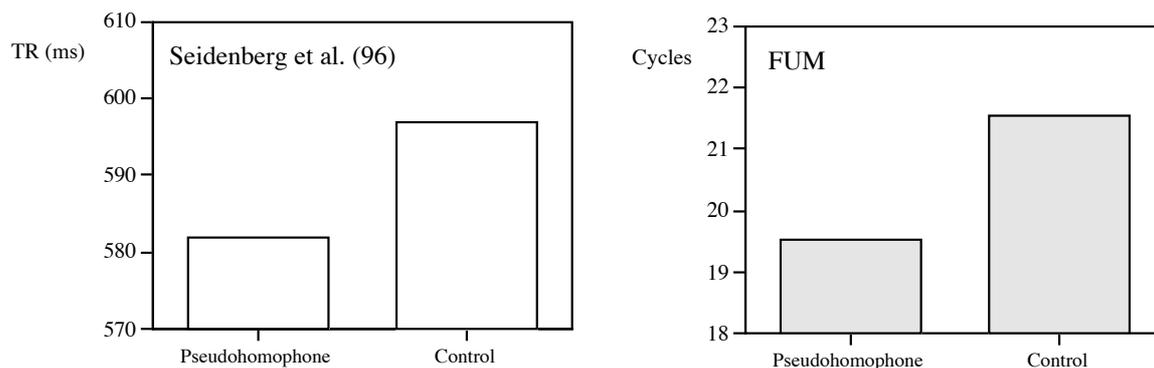


Figure 7.6. : Données empiriques de Seidenberg et al. (1996) (à gauche) et latences de réponse (en cycles) pour les données simulées par le FUM (à droite).

#### 7.2.4. Stone et al. (1997)

La quatrième étude de simulation porte sur l'effet de consistance ortho-phonologique et phono-orthographique rapporté par Stone et al. (1997). Dans une tâche de décision lexicale, ces auteurs obtiennent des latences de réponse plus élevées lorsque le mot est inconsistant vis-à-vis des relations ortho-phonologiques mais également lorsqu'il est inconsistant vis-à-vis des relations phono-orthographiques. Pour simuler ces résultats, nous faisons l'hypothèse qu'une réponse pour les mots est générée dans la TDL lorsque l'activation d'une unité lexicale orthographique dépasse un seuil d'identification fixé à 0.67 (pour une même procédure voir Jacobs & Grainger, 1992 ; Jacobs et al, 1998 ; Grainger & Jacobs, 1996). La Figure 7.7 présente le résultat de ces simulations réalisées avec les stimuli de Stone et al. (1997) (exception faite des mots ayant un nombre de lettres supérieur à 5). On constate ainsi que, tout comme le MROM-p, le FUM prédit un effet de l'inconsistance grapho-phonémique et phono-graphémique sur les latences de réponse. Toutefois, le modèle prédit un effet cumulé de ces deux facteurs (condition 4), effet qui n'apparaît pas dans les données expérimentales (voir cependant les données de Ziegler et al., 1997, en Français, pour un effet similaire à celui prédit par le modèle).

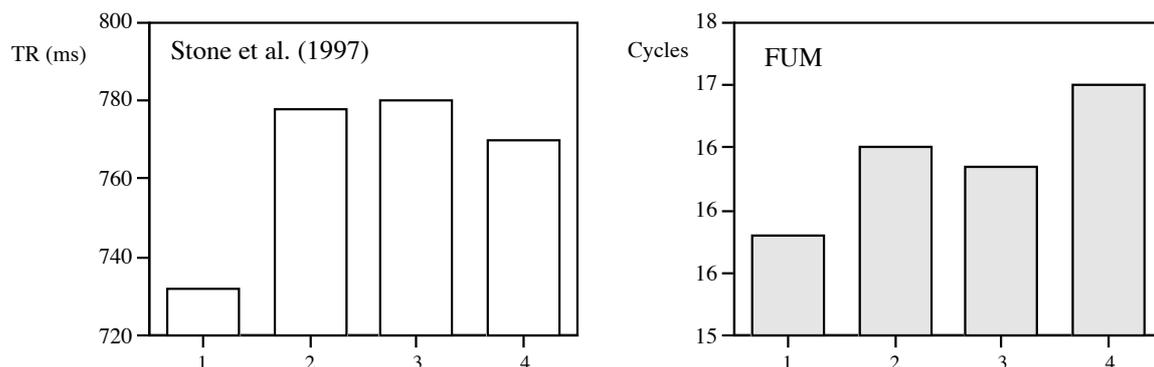


Figure 7.7. : Données empiriques pour les quatre conditions expérimentales de Stone et al. (1997) (à gauche) et latences de réponse (en cycles) pour les données simulées par le FUM (à droite). Les quatre conditions expérimentales sont : 1. OP consistant et PO consistants ; 2. OP consistant et PO inconsistant ; 3. OP inconsistant et PO consistant ; 4. OP et PO inconsistants (OP = relation ortho-phonologique ; PO= relation phonographique).

### 7.2.5. Rastle et Coltheart, 1998

La cinquième étude de simulation porte sur les données rapportées récemment par Rastle et Coltheart (1998). Ces données, obtenues dans une tâche de prononciation, indiquent que les sujets produisent des latences de prononciation plus longues pour des non-mots composés de 3 graphèmes que pour des non-mots composés de 5 graphèmes. Pour simuler ces résultats, nous gardons les mêmes paramètres que ceux utilisés jusqu'à maintenant et utilisons la même procédure de réponse que celle employée pour la troisième simulation. La Figure 7.8 présente les données et simulations obtenues avec le FUM. On remarque ici que le modèle parvient à prédire de manière assez marquée l'effet du nombre de graphèmes observé par Rastle et Coltheart (1998).

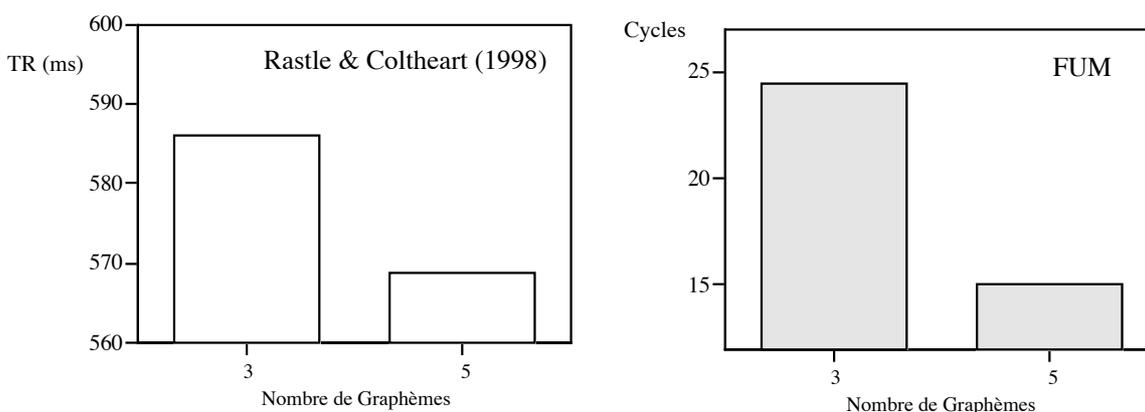


Figure 7.8. : Données empiriques de Rastle et Coltheart (1998) (à gauche) et latences de réponse (en cycles) pour les données simulées par le FUM (à droite).

### 7.2.5. Rey et al. (1998)

La sixième et dernière simulation est réalisée avec les données présentées au chapitre 6 (Expérience 2). Ces données sont obtenues dans la tâche de LIP en Anglais et indiquent un effet graduel du nombre de graphèmes sur les temps d'identification. Les mots composés de 5 graphèmes sont identifiés plus rapidement que les mots composés de 4 et 3 graphèmes. Pour simuler ces données, nous utilisons la même procédure que celle employée dans la quatrième simulation ; une réponse est générée par le modèle lorsque l'une des unités lexicales orthographiques dépasse un seuil d'activation de 0.67. La Figure 7.9 présente les résultats com-

portementaux et les résultats des simulations. Ici, encore, avec le même ensemble de paramètres, le FUM réussit à produire l'effet des graphèmes observé dans une tâche d'identification perceptive.

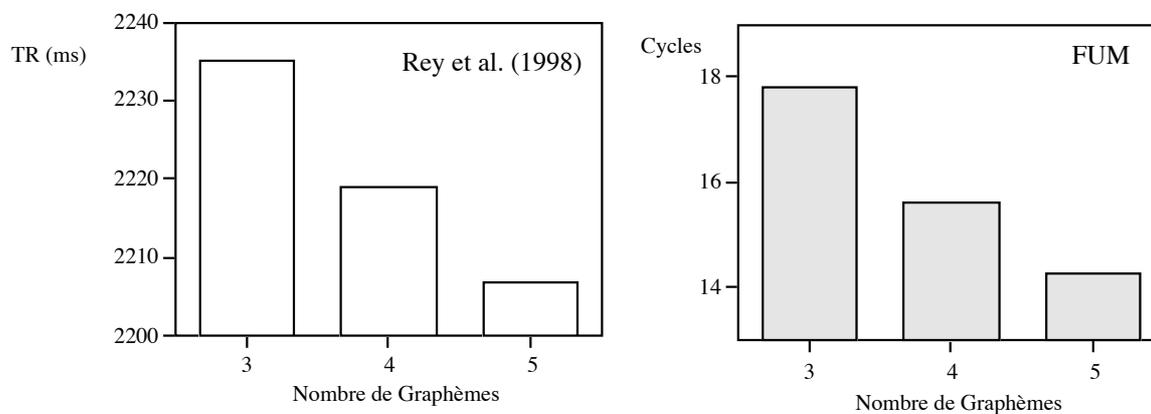


Figure 7.8. : Données empiriques de Rey et al. (1998) (à gauche) et latences de réponse (en cycles) pour les données simulées par le FUM (à droite).

### 7.3. Discussion

La série de simulations que nous venons de rapporter est encourageante du point de vue de la comparaison des données empiriques et des performances du FUM. Ce modèle semble être en mesure de rendre compte d'un grand nombre d'effets rapportés dans la littérature expérimentale, dans différents protocoles expérimentaux. De même, le FUM semble être en mesure de résoudre les deux principaux problèmes des modèles de la perception des mots écrits en utilisant les outils descriptifs des modèles connexionnistes localistes (Grainger & Jacobs, 1998). Il reste donc à tester ce modèle sur un ensemble plus large de données expérimentales.

#### 7.3.1. Amélioration du modèle

Avant cela, plusieurs questions mineures restent cependant à résoudre (questions que la présente version du modèle ne résout pas encore). Tout d'abord, la question des E placés en fin de mots. Comme nous l'avons décrit lors de la présentation du modèle, nous avons décidé de coder le E final comme lié à la consonne qui le précède. Or, il apparaît que le E final a une fonction quant à la prononciation de la voyelle centrale. Il s'agit là typiquement d'un effet de contexte, ou de ce que Coltheart et al. (1993) appellent une règle contextuelle. Une manière d'intégrer un tel effet contextuel est non pas d'introduire une règle de combinaison particulière, comme le suggèrent Coltheart et al. (1993), mais une connexion excitatrice de l'unité

graphème contenant le E final vers l'ensemble des phonèmes voyelles généralement actifs lorsqu'un E final est présent dans un mot.

Ensuite, notre codage du E final nous amène à créer des unités graphèmes TE comme dans MATE (M-A-TE). Or cette unité n'est fonctionnelle que lorsqu'elle se trouve en position finale. Ainsi, dans des mots comme TEETH, cette unité est active en première position, ce qui ne correspond pas à la segmentation recherchée. Aussi peut-on coder ce type d'unité en spécifiant la fin du mot (ex. : TE\_). Cette unité ne devient alors active que lorsqu'elle est en dernière position dans une séquence de lettres.

Un autre point important concerne la dynamique du modèle. Les simulations présentées ici utilisent un ensemble particulier de paramètres. Il est important maintenant d'effectuer des simulations similaires à celles décrites au chapitre 4 afin de tester l'importance de chaque paramètre dans la dynamique globale du modèle. Ceci nous permet de mieux définir les limites fonctionnelles de ce modèle et de mieux saisir sa dynamique globale.

Ce modèle ne contient pour le moment qu'un niveau d'unités graphèmes. Or, comme nous l'avons vu au chapitre 3, plusieurs études indiquent que d'autres unités semblent également guider les processus de reconnaissance des mots écrits, par exemple la rime des mots (Bowe, 1990, 1993 ; Gattuso, Smith, & Treiman, 1991 ; Peereman & Content, 1997 ; Treiman, 1989, 1994 ; Treiman & Chafetz, 1987 ; Treiman, Goswami, & Bruck, 1990 ; Treiman, Mullenix, Bijeljac-Babic, & Richmond-Welty, 1995 ; Treiman & Zukowski, 1988, 1996 ; Wise, Olson, & Treiman, 1990). Il est donc possible d'étendre le niveau des unités graphèmes à d'autres unités (Norris, 1994). On peut ainsi tester différentes versions de ce même modèle incluant différents types d'unités à un niveau que l'on pourrait appeler "niveau des unités orthographiques fonctionnelles".

### **7.3.2. La notion d'unité dynamique**

Récemment, Mandelblit et Zachar (1998) ont ouvert un débat sur la notion d'unité. Ils montrent comment ce type de concept a déjà été utilisé dans des sciences comme la physique et comment ce concept a évolué sur le plan théorique au sein de ces sciences. Ces auteurs suggèrent de suivre le même mouvement dans des sciences comme la psychologie en revisitant le concept d'unité. Ils proposent notamment de remplacer le concept d'unité tel qu'il est utilisé traditionnellement (une unité étant décrite comme représentation statique correspondant

à une entité extérieure au système cognitif) par un concept d'unité dynamique. C'est vers ce type de concept que nous souhaitons tendre en employant la notion d'unité et de niveau de représentation des unités orthographiques fonctionnelles. En effet, ces groupes de lettres ont a priori le statut de représentations symboliques statiques dans notre modèle. Or, il faudrait plutôt imaginer ces unités comme le résultat d'interactions entre des informations visuelles et des informations phonologiques. Ces unités symboliseraient la dynamique des interactions entre visuel et phonologique qui ont eu lieu au cours de l'acquisition de la lecture, et représenteraient donc "le lieu" où ces informations se soudent et s'associent.

### **7.3.3. Vers un consensus empirique pour tester les modèles**

Un dernier point à discuter concerne les données empiriques qui contraignent l'élaboration des modèles de la perception des mots écrits. Comme nous l'avons dit au chapitre 4, il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus sur un ensemble de données empiriques robustes, consensus autour duquel les différents modèles proposés peuvent se rencontrer et être évalués. Un tel consensus pourrait regrouper un ensemble d'études critiques qui auraient été répliquées plusieurs fois, afin de valider leur robustesse, et également la taille des effets observés. Ces études devraient présenter des effets marqués, avec des analyses statistiques par sujet et par item toutes deux significatives. De telles données permettraient ainsi de spécifier très précisément le domaine de performance dans lequel doit se situer un modèle. En effet, face aux modèles computationnels, qui sont des outils théoriques puissants, il faut également des données empiriques fortes afin de délimiter avec précision le domaine des combinaisons théoriques possibles.

### **7.3.4. De nouvelles contraintes empiriques**

Les modèles computationnels sont en mesure de fournir des prédictions sur les performances d'identification de sujets pour des mots pris individuellement. En effet, chaque stimulus, présenté à un modèle computationnel donné, génère certaines activités à différents niveaux dans le modèle, et la combinaison dynamique de ces activités conduit à une latence d'identification (mesurée en cycles de traitement) spécifique pour chaque mot. Récemment, certaines études se sont proposé de fournir des données empiriques se situant au niveau des mots, pris individuellement, afin de tester la dynamique fine des modèles disponibles (Spieler

& Balota, 1997). Nous exposons au chapitre suivant une étude empirique se situant dans la lignée de ces investigations expérimentales visant à mieux contraindre les modélisations développées en les soumettant à des tests empiriques de plus en plus précis.

# Chapitre 8

## Des prédictions au niveau des mots

Premiers pas vers une psycholinguistique psychophysique

**O**n peut décomposer un mot en de multiples dimensions linguistiques. Si on se limite, comme nous le faisons dans ce travail, aux dimensions orthographiques et phonologiques, on se rend compte qu'il existe déjà, à ces deux niveaux d'analyse, un grand nombre de sous-dimensions linguistiques permettant de caractériser un mot (cf. chapitre 3 : le nombre de lettres, le nombre de phonèmes, le nombre de voisins orthographiques, etc.). La perception et l'identification d'un mot supposent l'intégration dynamique de chacune de ces sous-dimensions. Dans un tel contexte, l'utilisation d'outils théoriques comme les modèles computationnels permet de spécifier les interactions complexes qui ont lieu entre ces différentes dimensions linguistiques lors de la perception d'un mot écrit. De plus, l'implémentation algorithmique de ces modèles fournit un moyen de tester les hypothèses faites sur la structure et la dynamique de ces interactions en comparant les performances simulées d'un modèle à celles de sujets dans des expériences.

Jusqu'à maintenant, la comparaison entre données empiriques et données simulées s'est placée au niveau des performances moyennes obtenues pour des groupes de mots. La plupart des études expérimentales comparent un groupe de mots A avec un groupe de mots B, ces deux groupes se distinguant par une propriété dont on cherche à déterminer le rôle dans la perception d'un mot. Les modèles computationnels sont testés initialement par rapport à ces moyennes de groupes de mots. Or, l'une des forces de ces modèles est de pouvoir décrire avec précision, au niveau de chaque mot, les interactions entre les différentes dimensions linguistiques qui caractérisent ce mot. Afin d'évaluer véritablement l'adéquation d'un modèle

avec le système de lecture qu'il représente, on peut envisager de fournir des contraintes empiriques tout aussi fortes que les prédictions de ces modèles. L'objectif est alors d'avoir des mesures empiriques des temps d'identification de mots, pris individuellement, afin de limiter à l'extrême le domaine de performance des modèles proposés. Plusieurs approches empiriques récentes se sont déjà engagées dans cette direction.

Seidenberg et Waters (1989) enregistrent les temps de prononciation de 30 sujets de l'Université de McGill pour un ensemble de 2897 mots monosyllabiques anglais. De même, Treiman et al. (1995) présentent une étude dans laquelle les temps de prononciation de 27 sujets de l'Université de Wayne State sont mesurés pour un ensemble de 1327 mots monosyllabiques anglais. Treiman et al. (1995) utilisent ces deux grands ensembles de données empiriques pour étudier les corrélations entre les temps de prononciation moyens de chaque mot et un certain nombre de facteurs linguistiques. Ces auteurs montrent notamment que la consistance de l'onset, la consistance de la rime orthographique, la familiarité des mots et le phonème initial sont des facteurs qui permettent d'expliquer ensemble 38.2 % (pour Wayne State) et 26.2 % (pour McGill) de la variance obtenue dans ces deux ensembles de mesures. Ils n'utilisent toutefois pas ces données pour les confronter avec les prédictions des différents modèles computationnels disponibles.

C'est, en revanche, ce que proposent Spieler et Balota (1997), dans une étude où ils enregistrent les temps de prononciation de 31 sujets de l'Université de Washington pour un ensemble de 2870 mots monosyllabiques anglais. En effet, ces auteurs utilisent les moyennes obtenues par items dans cette expérience pour évaluer les prédictions du modèle de Seidenberg et McClelland (1989) et de Plaut et al. (1996). Ils observent que les deux modèles sont capables d'expliquer respectivement 10.07 % et 3.33 % de la variance observée. De même, Seidenberg et Plaut (1998) effectuent la même analyse sur les données obtenues par Seidenberg et Waters (1989) et constatent que les deux modèles peuvent rendre compte respectivement de 2.91 % et 1.43 % de la variance dans cette expérience. Il apparaît donc, à première vue, que ce test empirique soit redoutable pour les modèles proposés jusqu'à maintenant et que les modèles ne sont pas encore en mesure de rendre compte de manière satisfaisante de la performance des sujets au niveau du temps de traitement des mots pris individuellement.

Seidenberg et Plaut (1998) soulignent toutefois un point important à propos des moyennes par item obtenues dans ces expériences. On peut effectivement se demander si les données

présentées dans ces études sont suffisamment robustes pour servir de test empirique critique pour évaluer les modèles de la perception des mots écrits. Ainsi, en prenant 2791 mots communs aux études de Spieler et Balota (1997) et de Seidenberg et Waters (1989), Seidenberg et Plaut (1998) obtiennent un coefficient de corrélation de .54 entre les moyennes par mot de ces deux études. De même, Treiman et al. (1995) obtiennent une corrélation de .41 entre les études de Wayne State et celle de McGill. Il semble donc que la fiabilité de ces données ne soit pas totalement assurée et qu'il reste encore une grande part de bruit dans les moyennes obtenues. En effet, on constate que ces moyennes sont calculées sur la base de la performance de 30, 27 et 31 sujets respectivement. Il est donc fort probable, avec un tel nombre d'observations, que la variance intra-item soit encore bien supérieure à la variance inter-items, ce qui induit inévitablement une source de variabilité incontrôlée liée au petit nombre d'observations. Il est donc légitime de douter de la robustesse de ces estimations des temps de prononciation pour chaque mot.

La seule manière de réduire cette source d'erreur et d'accroître la fiabilité de ce type de données, est d'augmenter le nombre de sujets dans le calcul de la moyenne par mot. C'est le choix que nous avons fait dans une expérience réalisée à l'Université d'Arizona State où nous avons mesuré les temps d'identification de 144 sujets sur un ensemble de 120 mots dans la tâche de LIP<sup>14</sup>.

L'objectif de cette expérience est similaire à celui de Spieler et Balota (1997). Il s'agit d'obtenir des données empiriques permettant d'analyser les performances moyennes de sujets au niveau des mots, pris individuellement. L'ambition d'une telle expérience est de proposer un test empirique robuste pour les modèles computationnels, permettant d'évaluer leurs prédictions au niveau des mots et non plus au niveau de groupes de mots. Par ailleurs, nous avons choisi un autre protocole que celui de Spieler et Balota (1997), pour les raisons invoquées au chapitre 2, c'est-à-dire que nous avons porté notre choix sur un protocole qui semble fournir des mesures plus directes des processus d'identification des mots écrits (le protocole de prononciation supposant la coopération de processus d'identification et de production orale, cf. Chap. 2). Ensuite, contrairement aux études de Seidenberg et Waters (1989), Spieler et Balota (1997) et Treiman et al. (1995), nous avons utilisé peu de mots (120) et beaucoup de

---

<sup>14</sup> Cette étude a été réalisée avec l'aide et l'accord du Prof. Guy Van Orden de l'Université d'Arizona State (USA) et en collaboration avec Florian Schmidt-Weigand de l'Université de Marburg (Allemagne)

sujets (144). L'idéal aurait été de combiner un grand nombre de mots avec un grand nombre de sujets ; toutefois pour des raisons pratiques, le temps d'exécution d'une expérience LIP, pour un même nombre de mots, étant beaucoup plus long que le temps nécessaire pour réaliser une expérience de prononciation, nous avons dû limiter le nombre de mots utilisés. Nous allons donc décrire maintenant cette expérience et présenter ensuite deux séries d'analyses : la première est d'ordre méthodologique et vise à éclairer la question du rôle du nombre de sujets dans ce type d'expérience ; la seconde met en relation certaines variables linguistiques avec les moyennes par mot obtenues.

## 8.1. Expérience 6 : 144 sujets, 120 mots

### Méthode

Sujets. 144 étudiants de l'Université d'Arizona State (USA) participent à cette expérience. Ils sont tous de langue maternelle anglaise et ont une vue normale ou corrigée.

Matériel expérimental. Afin de ne pas rendre le temps d'expérimentation trop long (et, de ce fait, préserver la motivation des sujets), nous limitons le nombre de mots utilisés à 120 mots. Dans cette expérience, notre objectif n'est pas de manipuler tel ou tel facteur linguistique, mais simplement d'obtenir des temps d'identification moyens pour un ensemble de mots. Nous n'avons donc pas fait de sélection particulière de cette liste de mots et les avons choisis suivant une procédure aléatoire. Toutefois, afin de limiter malgré tout le nombre de facteurs linguistiques, nous avons sélectionné uniquement des mots monosyllabiques composés de 5 lettres. Ces 120 mots sont tirés au hasard dans la base de données Celex (Baayen et al., 1993) et sont présentés dans l'Annexe VI. 10 mots supplémentaires sont utilisés lors de la phase d'entraînement. L'expérience est réalisée avec des ordinateurs PC 486. Les conditions expérimentales sont similaires à celles décrites pour l'expérience LIP du chapitre 2 (expérience 1).

Procédure. Les sujets sont assis à 50 cm de l'écran d'ordinateur. Après avoir lu les consignes, ils débutent l'expérience avec 5 des 10 mots de la liste d'entraînement. Après une pause, ils commencent l'expérience par les 5 mots restant de la liste d'entraînement, puis par les 120 mots de l'expérience présentés dans un ordre aléatoire différent pour chaque sujet. Les conditions de présentation des stimuli sont identiques à celles de l'expérience décrite au chapitre 2. L'expérience dure environ 30 minutes.

## Résultats

Erreurs. Les erreurs produites par les sujets sont rapportées en Annexe VII. Certaines de ces erreurs sont dues à des fautes de frappe (ex. : deux lettres identiques à la fin d'un mot, confusion entre deux lettres proches sur le clavier, etc.) et sont donc simplement corrigées. Sinon, l'ensemble des erreurs sont exclues de l'analyse des latences d'identification. 4 sujets sont par ailleurs exclus de notre analyse (sujets 40, 69, 89, et 109), ces sujets ayant un fort taux d'erreurs ( $n > 20/120$ ). Dans l'ensemble, peu d'erreurs sont commises dans cette expérience, avec une moyenne par sujet de 2.8 % d'erreurs. La Figure 8.1 donne la distribution des pourcentages d'erreur pour l'ensemble des 140 sujets restants.

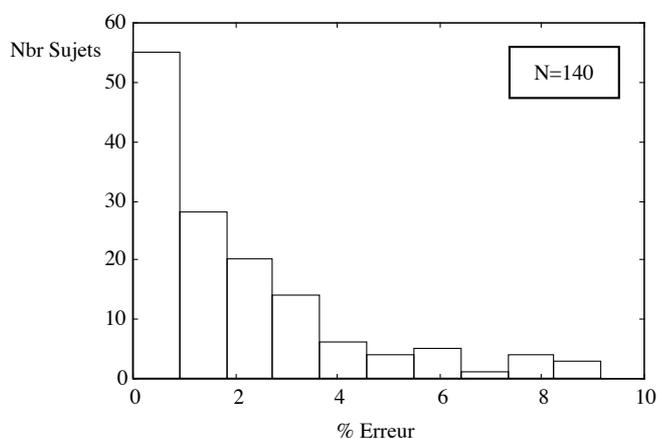


Figure 8.1. : Distribution des pourcentages d'erreur (% Err) sur l'ensemble des 140 sujets de l'expérience 6.

Latences. Pour l'ensemble des 140 sujets, nous calculons les latences d'identification moyennes pour l'ensemble des 120 mots (moins les erreurs). Nous éliminons ensuite les essais supérieurs à la moyenne plus 3 écarts types et inférieurs à la moyenne moins 3 écarts types. Le détail des moyennes des latences d'identification, des pourcentages d'erreurs et des erreurs standard<sup>15</sup> est présenté en Annexe VIII. La Figure 8.2.A représente la distribution des latences moyennes pour l'ensemble des 140 sujets et la Figure 8.2.B donne les distribution des erreurs standard calculées également pour chaque sujet.

<sup>15</sup> L'erreur standard est calculée en divisant l'écart type de la distribution par la racine carrée du nombre d'échantillons intervenant dans la moyenne.

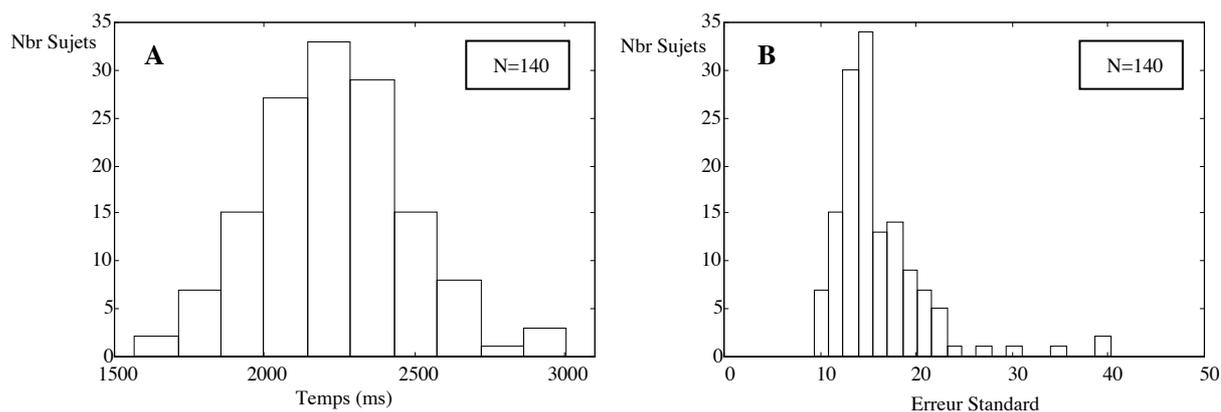


Figure 8.2. : Distribution des latences d'identification moyennes (A) et des erreurs standard (B) sur l'ensemble des 140 sujets de l'expérience 6.

Ces différents graphes indiquent que les performances des sujets sont dans l'ensemble homogènes. La répartition des latences de réponse moyennes suit une distribution normale et la plupart des erreurs standard par sujet se situent dans l'intervalle [9 25]. La Figure 8.3 fournit une description plus détaillée des performances des 140 sujets en présentant les distributions cumulées des temps de réponse pour chaque sujet. Les distributions cumulées des latences de réponse montrent également que les performances individuelles sont homogènes (à l'exception de quelques sujets ayant des latences de réponse particulièrement longues et une dispersion plus étendue que la majorité des sujets).

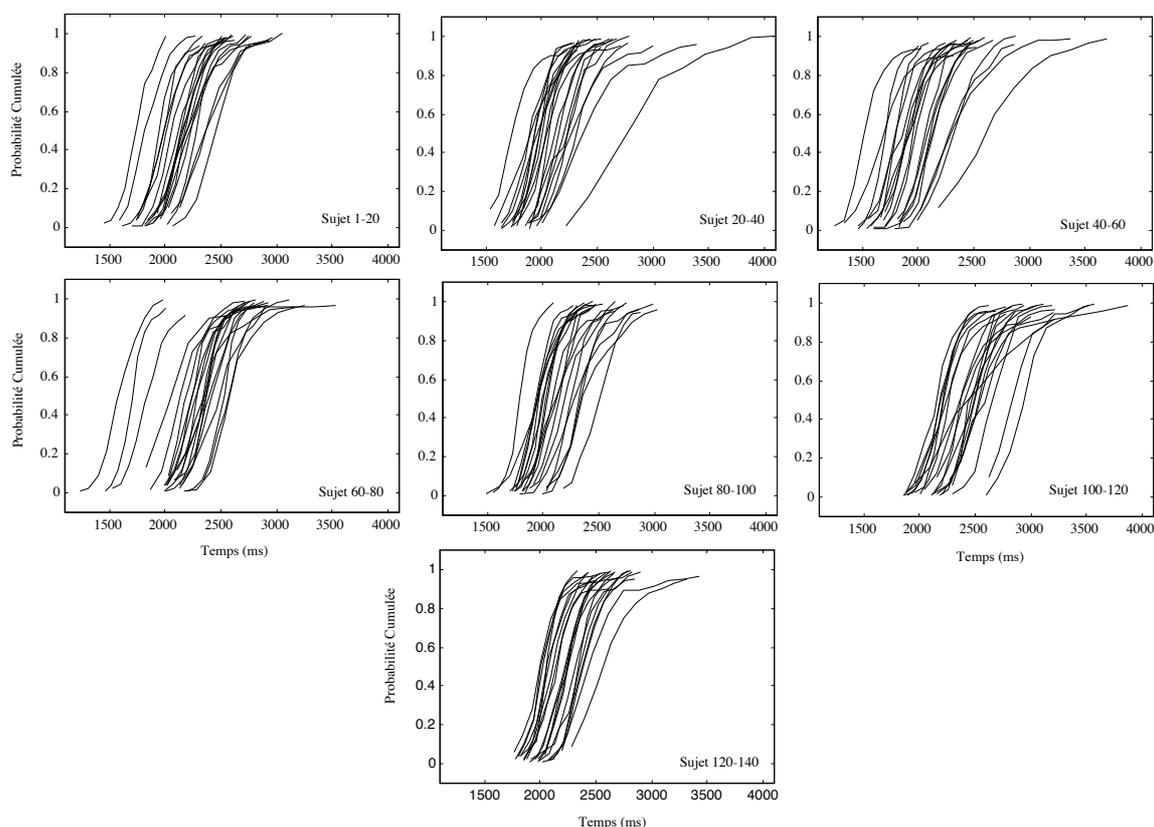


Figure 8.3. : Distributions cumulées des latences d'identification pour les 140 sujets de l'expérience 6.

En dépit de l'homogénéité des performances interindividuelles du point de vue de la forme

des distributions des latences, on constate que les performances d'un sujet à l'autre pour les 120 mots ne sont pas corrélées. C'est ce que montre la Figure 8.4. Cette figure présente les coefficients de corrélation obtenus en corrélant systématiquement les 140 sujets entre eux (9730 corrélations). Ce graphe indique l'absence de systémativité d'un individu à l'autre dans les temps d'identification des 120 mots.

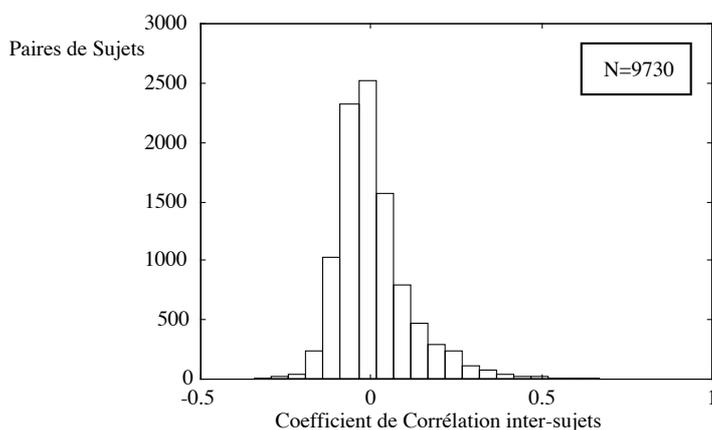


Figure 8.4. : Distribution des coefficients de corrélation entre les 9730 paires formées en combinant chacun des 140 sujets avec les autres.

Sur la base de ces données par sujet, nous calculons ensuite les latences d'identification moyennes pour chaque item, ainsi que le pourcentage d'erreurs et l'erreur standard (voir pour le détail de ces mesures l'Annexe VII). Pour les latences de réponse, on constate que la grande majorité des latences se trouvent dans l'intervalle [2200 2300] ms avec des différences allant jusqu'à 200 ms entre les items identifiés le plus rapidement et ceux identifiés le moins rapidement (cf. Figure 8.5A). Ces différences importantes entre items indiquent que la tâche de LIP permet une bonne discrimination entre les temps d'identification pour chaque item. Ainsi, la largeur de la distribution de ces latences permet d'envisager un ordonnancement relativement robuste depuis l'item reconnu le plus rapidement jusqu'à l'item reconnu le plus tardivement. Par ailleurs, les pourcentages d'erreurs pour chaque item sont dans l'ensemble inférieurs à 5% (cf. Figure 8.5.B). Ce type de résultat plaide en faveur de la tâche de LIP, puisque de faibles scores au niveau du pourcentage d'erreur permettent un plus grand nombre de mesures de latences prises en compte dans la moyenne de chaque item (d'où une meilleure estimation de cette moyenne).

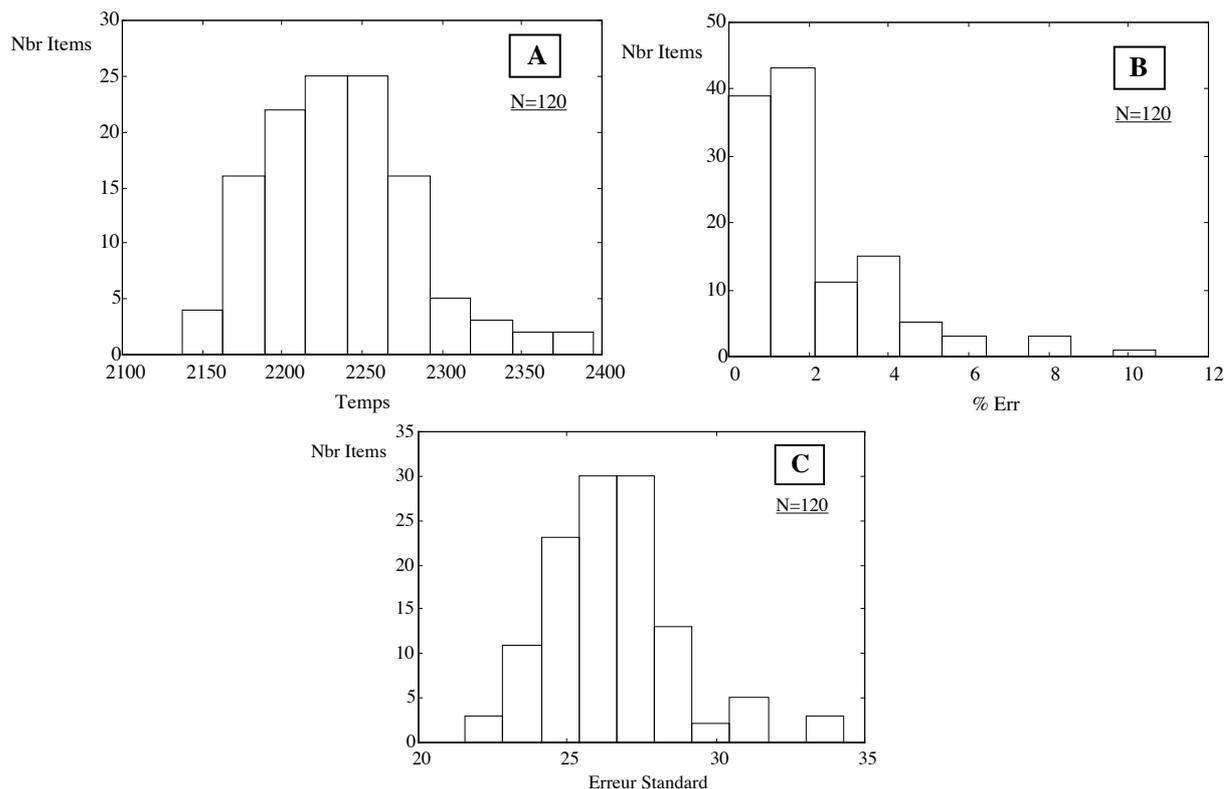


Figure 8.5. : Distribution des latences moyennes, des pourcentages d'erreur et des erreurs standard (sur 140 sujets) pour l'ensemble des 120 items.

On notera aussi, au regard de la Figure 8.6, une corrélation positive de 0.47 entre les latences d'identification pour chaque item et leur pourcentage d'erreur. Ce résultat indique que les latences de réponses moyennes ne sont pas sensibles à des effets stratégiques où la vitesse serait privilégiée sur l'exactitude (en d'autres termes, il n'y pas de "speed-accuracy trade-off"). Les mots identifiés le plus rapidement sont donc bien les mots les plus facilement traités par le système de reconnaissance des mots.

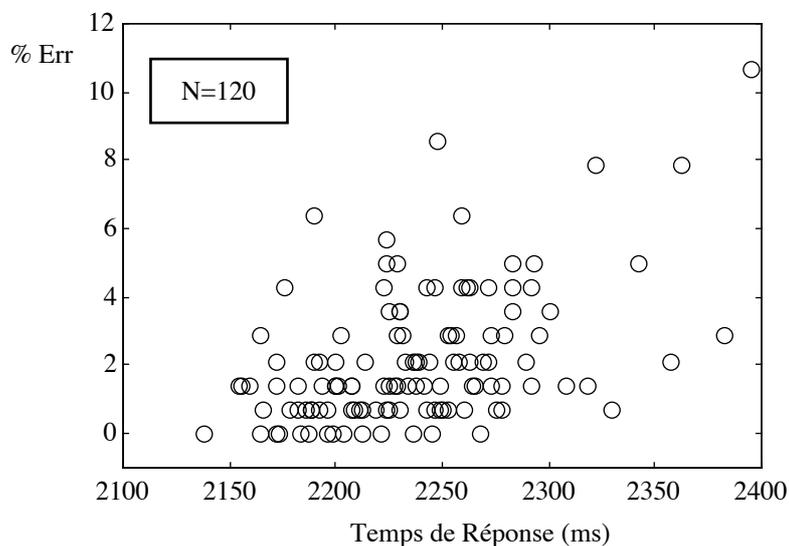


Figure 8.6. : Représentation des latences moyennes pour chaque item et de leur pourcentage d'erreur. Chaque point représente ici les performances obtenues pour un mot

Enfin, la Figure 8.5.C présente la distribution des erreurs standard mesurées pour chaque item. Comme nous allons le voir dans la section suivante, les scores d'erreur standard sont relativement bas en moyenne. Ceci est dû au grand nombre de sujets enregistrés qui nous permet de réduire de manière importante une grande partie de l'erreur.

## 8.2. Questions de méthodologie

Cette étude se distingue donc des précédentes études situant leur analyse au niveau des mots (1) par le nombre de mots choisis et (2) par le nombre de sujets enregistrés. Le point le plus important concerne le nombre de sujets. En effet, augmenter le nombre de sujets permet de diminuer l'erreur à la moyenne théorique et donc d'obtenir des moyennes par item plus fiables pour entreprendre l'évaluation des modèles. Nous illustrons ce point par différentes analyses, rendues possibles grâce au large échantillon de latences d'identification que nous avons obtenues.

Tout d'abord, si l'on considère le calcul de l'erreur standard comme un indice permettant d'estimer l'erreur à la moyenne théorique, on peut voir à la Figure 8.7 que cet indice décroît de manière exponentielle à mesure que le nombre de sujets (i.e., la taille de l'échantillon) augmente. Si nous nous plaçons dans la même situation expérimentale que Spieler et Balota (1997) notamment, si nous basons nos moyennes par item sur des échantillons de 30 sujets, nous obtenons une erreur standard deux fois plus importante que celle obtenue avec 140 sujets. Ainsi, en augmentant d'un facteur 100 l'échantillon pour le calcul de la moyenne, nous réduisons de moitié le bruit se trouvant dans nos moyennes par item.

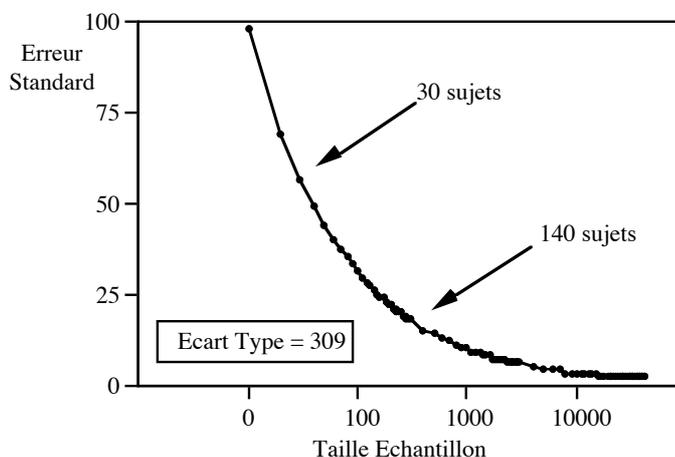


Figure 8.7. : Evolution de l'erreur standard en fonction de la taille de l'échantillon. L'erreur standard est calculée en fonction de l'écart type moyen obtenu en considérant l'ensemble des items.

Un autre argument en défaveur des études réalisées avec uniquement 30 sujets vient des faibles corrélations obtenues entre les moyennes par items de ces différentes études (Wayne State vs. McGill :  $r = .41$  ; Washington vs. McGill :  $r = .54$ ). Afin d'estimer comment varient ces corrélations en fonction du nombre de sujets utilisés, nous pouvons simuler, grâce à nos données, tout un ensemble d'expériences virtuelles différentes. Par exemple, nous pouvons constituer deux groupes A et B de 10 sujets pris au hasard parmi notre population de 140 sujets (tous les sujets de A étant différents de tous les sujets de B). Nous calculons les moyennes pour chacun des 120 items à partir des données de ces deux groupes de 10 sujets. Nous obtenons ainsi 120 moyennes pour A et 120 moyennes pour B. Nous corrélons ensuite ces deux ensembles de moyennes et obtenons un certain coefficient de corrélation entre les moyennes par item de ces deux groupes. Nous répétons cette opération 1000 fois et obtenons donc 1000 coefficients de corrélation. La Figure 8.8. présente les distributions de ces coefficients de corrélation obtenus pour différentes tailles d'échantillons : de 10 à 70 sujets par groupe<sup>16</sup>. Ces graphes nous montrent qu'en augmentant le nombre de sujets dans le calcul de la moyenne par items, on augmente la probabilité d'obtenir un coefficient de corrélation élevé entre deux études indépendantes. Plus précisément, dans la situation où se trouvent les études précédentes (i.e., avec des groupes indépendants constitués environ de 30 sujets chacun), on constate qu'elle ne peuvent espérer atteindre en moyenne qu'un coefficient de corrélation de 0.6 (l'intervalle des valeurs les plus probables étant [.5 .7]). En revanche, on remarque qu'en augmentant l'échantillon des groupes indépendants jusqu'à 60-70 sujets, les distributions des coefficients de corrélation tendent vers une valeur de .8 en moyenne (avec des valeurs minimales de .65). On voit alors que de tels choix expérimentaux (i.e., augmenter le nombre de sujets) peuvent se révéler cruciaux pour la robustesse et la réplicabilité des moyennes par items.

Afin d'aborder de manière plus quantitative (i.e., en termes de millisecondes) la question de la taille de l'erreur commise en fonction de la taille de l'échantillon, nous pouvons réaliser une analyse supplémentaire à l'aide de nos données. Dans cette analyse, nous commençons par classer dans un ordre aléatoire les 140 sujets. Puis, nous calculons les moyennes par item pour l'ensemble des 20 premiers sujets de la liste. Nous comparons ensuite ces moyennes

---

<sup>16</sup> Dans le cas où nos deux groupes sont constitués de 70 sujets, nous partageons donc en deux notre population de 140 sujets créant ainsi deux sous-groupes A et B indépendants

avec les moyennes obtenues pour les 140 sujets. Nous calculons pour cela simplement un écart entre ces deux moyennes, en soustrayant la moyenne sur 20 sujets à la moyenne sur 140 sujets. Puis, nous ajoutons les 10 sujets suivants de la liste aux 20 premiers et calculons de nouveau les moyennes par items pour ces 30 sujets. De même, nous calculons, avec les moyennes sur 30 sujets, l'écart avec les moyennes pour 140 sujets. Ainsi de suite, nous ajoutons les sujets de 10 en 10 et calculons les moyennes par item pour 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120 sujets. A chaque fois, nous calculons également leur écart à la moyenne sur 140 sujets. Nous répétons cette simulation 200 fois, c'est-à-dire que nous sélectionnons au hasard 200 ordres différents de nos 140 sujets et créons ainsi 200 listes différentes. Ainsi, nous obtenons des écarts à la moyenne pour chacune des listes et pour chacun des différents sous-groupes de sujets (de 20 à 120). Les résultats de cette simulation sont présentés dans les Figures 8.9, 8.10 et 8.11.

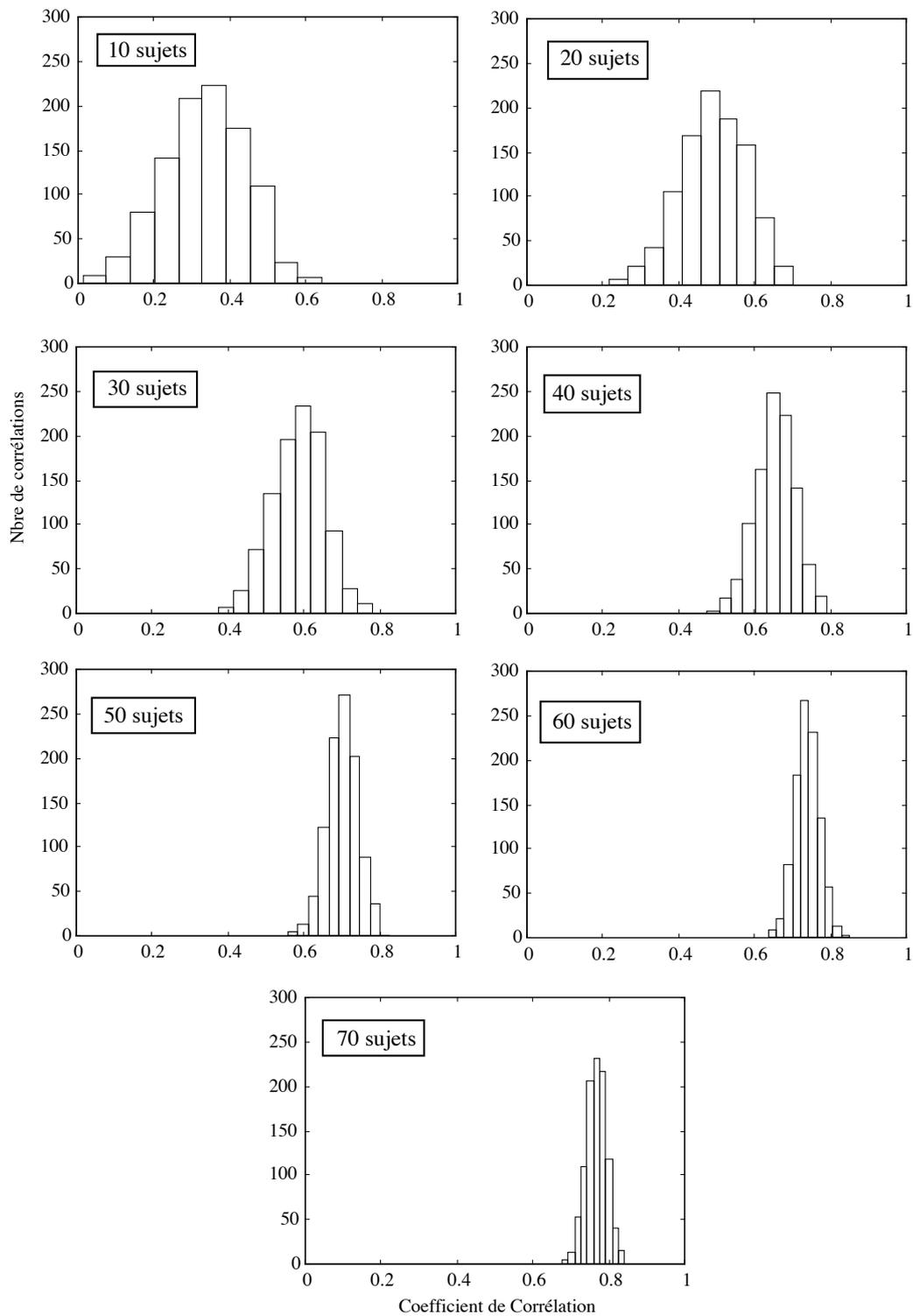
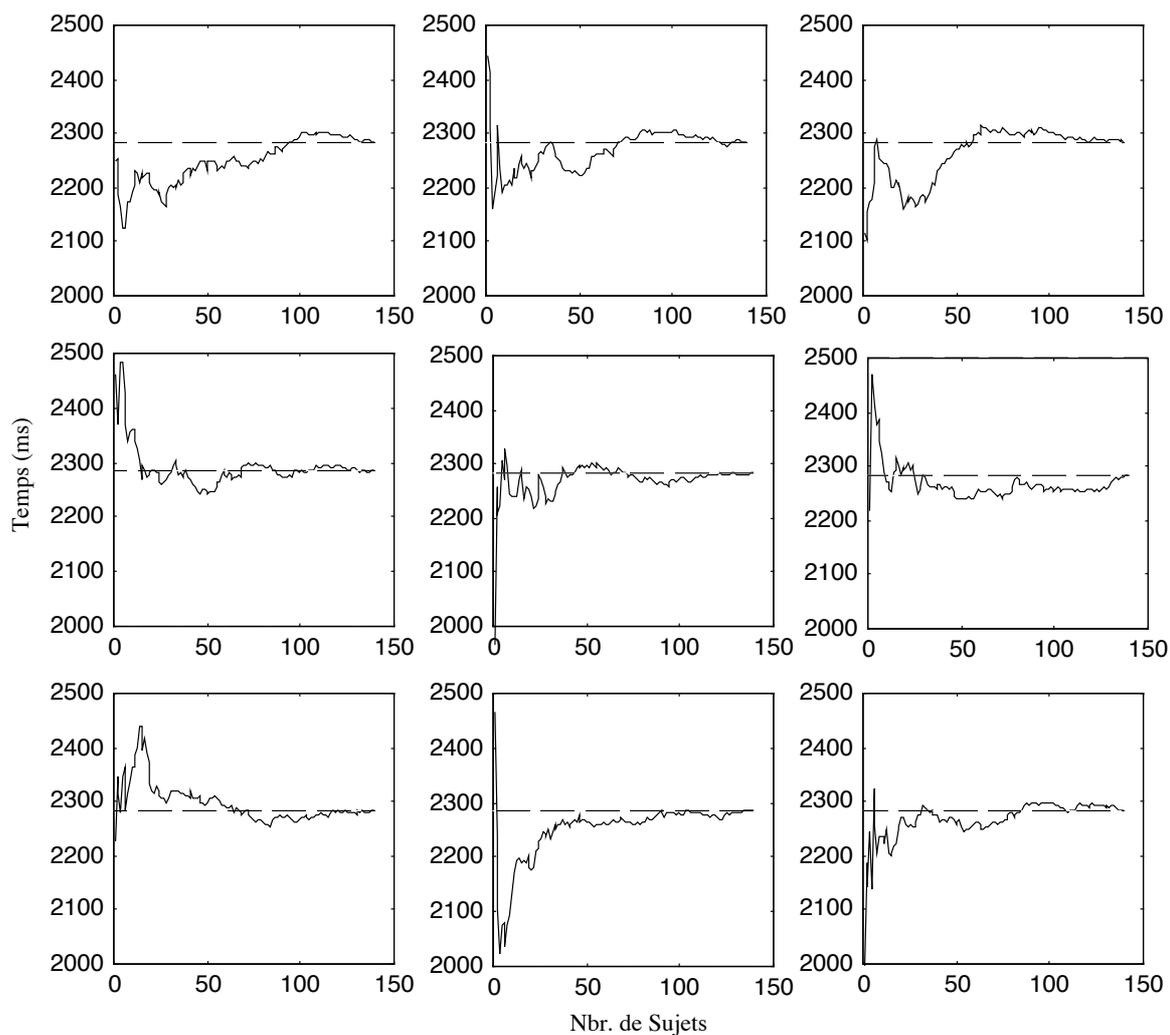


Figure 8.8. : Distribution des coefficients de corrélation pour un total de 1000 comparaisons effectuées pour chaque taille d'échantillon (i.e., 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 sujets).



**Figure 8.9.** : Neuf exemples de simulations obtenues pour les latences moyennes du mot CLAIM. Chacun de ces neuf graphes représente les moyennes obtenues en fonction du nombre de sujets. Chaque graphe est basé sur une liste différente. Chaque liste se distingue des autres par un ordre particulier des 140 sujets. Ainsi, la contribution de chaque sujet à la moyenne apparaît à différents moments, nous permettant de simuler différentes expériences. Le trait en pointillés représente la moyenne sur 140 sujets.

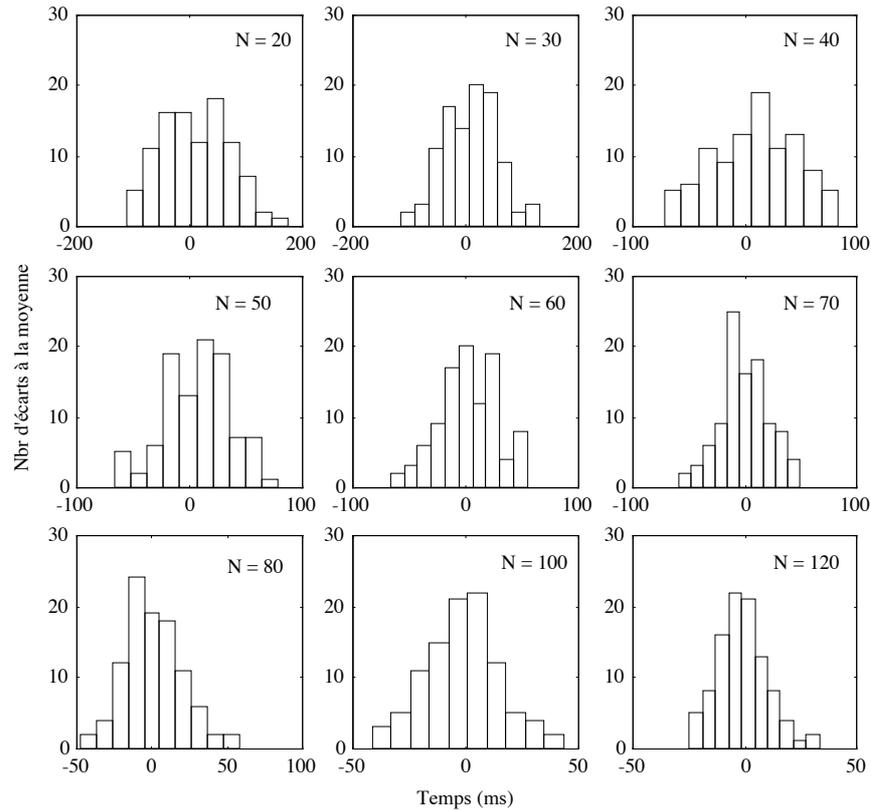


Figure 8.10. : Distributions des écarts à la moyenne obtenus, pour le mot CLAIM, après 200 simulations (i.e., 200 listes). Alors que le graphe 8.9 représente 9 des 200 simulations, ce graphe résume les écarts obtenus pour certaines valeurs d'échantillons seulement : 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 et 120 sujets.

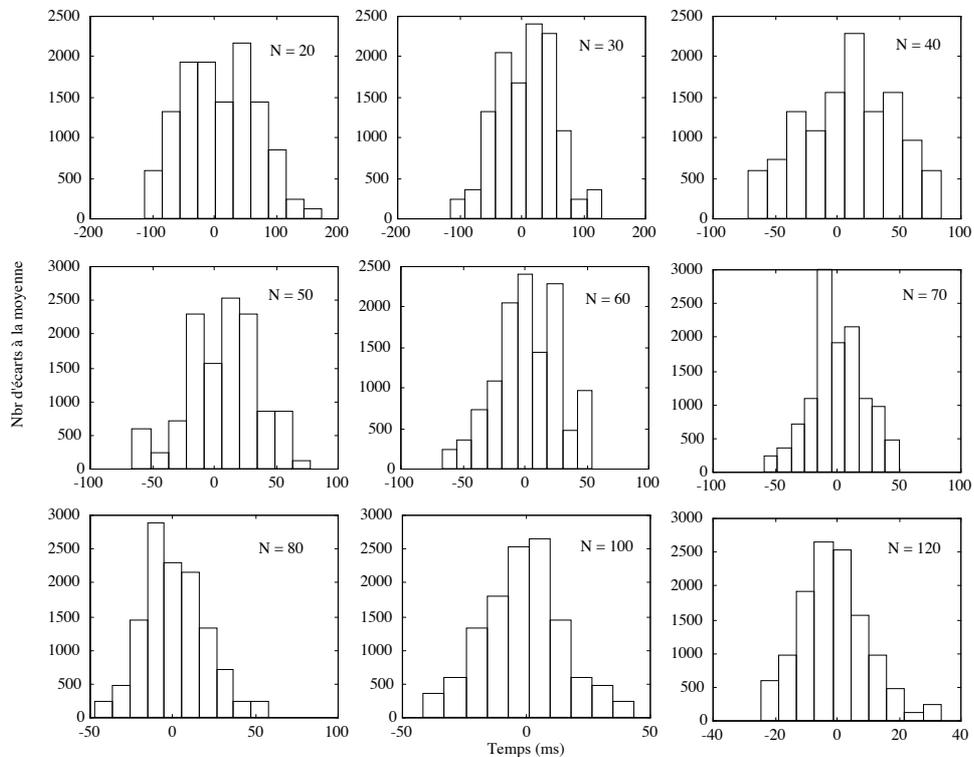


Figure 8.11. : Distributions des écarts à la moyenne obtenus, pour l'ensemble des 120 mots, après 200 simulations (i.e., 200 listes). Ce graphe résume les écarts obtenus pour certaines valeurs d'échantillons seulement : 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 et 120 sujets, pour l'ensemble des 120 mots.

La Figure 8.9 montre neuf exemples différents de l'évolution de la moyenne d'un item (ici le mot CLAIM) en fonction du nombre de sujets. On voit ici clairement qu'il existe encore de larges fluctuations de la moyenne tant que celle-ci ne comprend pas plus de 80 sujets. Si on se place encore une fois dans une position où la moyenne par item est calculée sur seulement 30 sujets, on voit qu'il existe encore pour ce nombre de sujets de très importants écarts par rapport à la moyenne à 140 sujets. Plus précisément, si l'on regarde les Figures 8.10 et surtout 8.11, on constate que, pour des échantillons de 30 sujets, les écarts à la moyenne calculée sur 140 sujets varient à l'intérieur de l'intervalle [-100 100] millisecondes. Si on se réfère à la Figure 8.5.A présentant les distributions des moyennes des latences d'identification pour les 120 mots (calculées sur 140 sujets), on voit que cet intervalle de [-100 100] millisecondes recouvrent alors la distribution des moyennes par items. En revanche, pour des moyennes calculées sur 120 sujets, on voit que les écarts se distribuent dans l'intervalle [-20 20] millisecondes. Cet intervalle reste important et indique qu'il reste encore une grande part d'erreur dans ces moyennes, mais il n'est toutefois pas comparable à l'intervalle de [-100 100] millisecondes obtenu pour des moyennes basées sur 30 sujets.

En résumé, avec ces différentes analyses, nous tentons de montrer l'importance, dans les choix expérimentaux, du nombre des sujets enregistrés pour le calcul des moyennes par items afin de pouvoir proposer, au niveau des objectifs théoriques, des tests robustes et répliquables. Ces analyses suggèrent que des expériences souhaitant mesurer le temps de traitement moyen de mots pris individuellement devraient se baser sur un échantillon d'au moins 100 sujets. Ceci permet de réduire considérablement l'erreur qui persiste dans ces mesures lorsqu'elles sont réalisées avec un échantillon de 30 sujets et ceci permet également d'obtenir des corrélations inter-études plus élevées (vers 0.8 en moyenne) confortant ainsi la fiabilité de ces mesures. L'étude que nous avons réalisée répond à ce critère et fournit ainsi une base de données empiriques solide qui peut être utilisée pour évaluer l'adéquation des prédictions des modèles computationnels existants.

### 8.3. Paramètres linguistiques

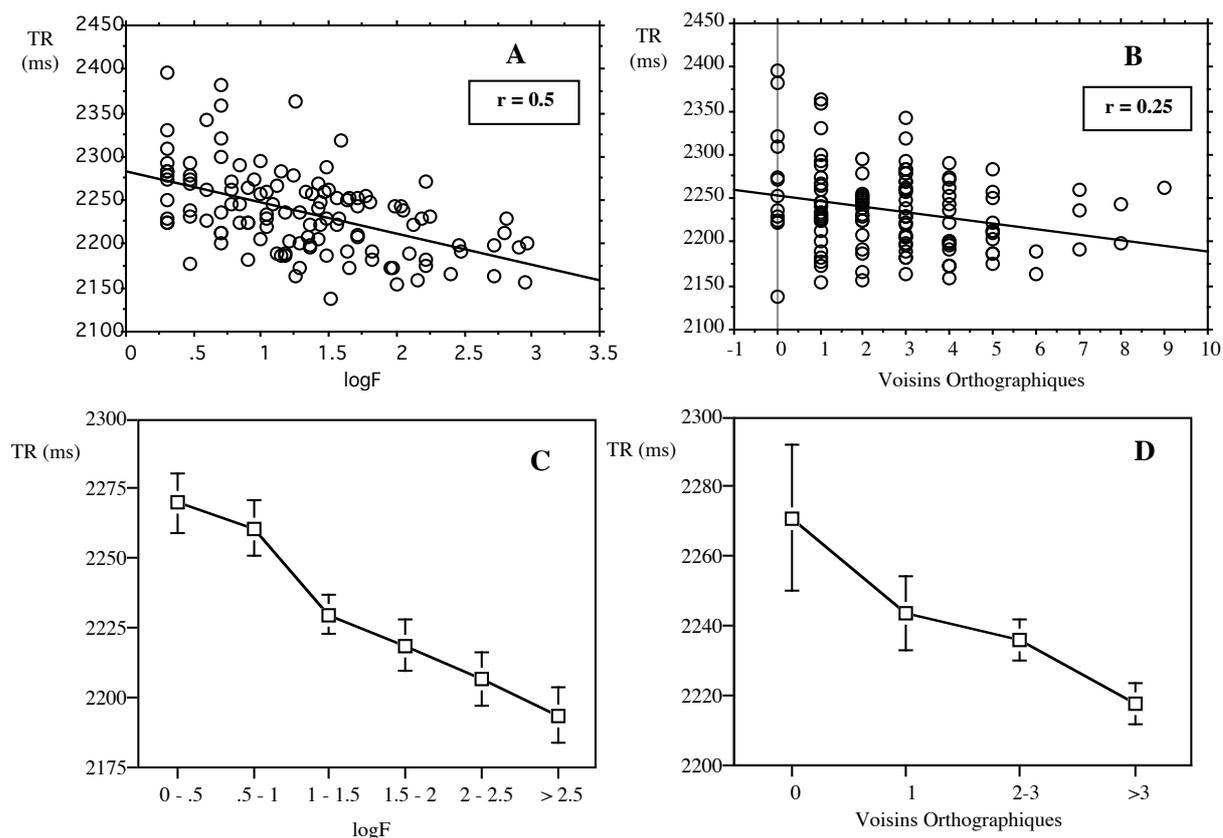
Dans cette section, nous présentons des analyses préliminaires réalisées avec les moyennes par items obtenues dans notre expérience. Ces analyses visent à déterminer le pourcentage de variance expliquée à l'aide de différents facteurs linguistiques ortho-phonologiques classiques

: la fréquence d'occurrence, le nombre de voisins orthographiques, le nombre de voisins orthographiques de plus haute fréquence et le nombre de phonèmes (cf. Chapitre 3 et 6). Nous montrons par ailleurs que la vitesse de réponse des sujets interagit avec certains facteurs linguistiques comme la fréquence d'occurrence et le nombre de voisins orthographiques.

Le Tableau 8.1 contient le résultat des régressions linéaires effectuées entre le temps de réponse moyen par item et les facteurs logF (logarithme de la fréquence d'occurrence), VO (voisinage orthographique), VOHF (nombre de voisins de plus haute fréquence) et nbrP (nombre de phonèmes). Les valeurs obtenues indiquent que 25% de la variance pour les temps de réponse par item sont expliqués par le facteur logF et que 6.2% de la variance sont expliqués grâce au facteur VO. La Figure 8.12 illustre ce résultat. Ces données produisent un effet de fréquence marqué, les latences d'identification diminuant graduellement avec l'augmentation de la fréquence d'occurrence. De même, on observe une tendance vers un effet facilitateur du nombre de voisins orthographiques. Les temps de réponse diminuent effectivement à mesure que le nombre de voisins orthographiques augmente. Mais, ni le nombre de voisins orthographiques de plus haute fréquence, ni le nombre de phonèmes ne semblent liés aux temps de réponse.

Tableau 8.1. : Régressions linéaires entre les latences d'identification moyennes pour chaque mot et le logarithme de la fréquence d'occurrence (logF), le nombre de voisins orthographiques (VO), le nombre de voisins orthographiques de plus haute fréquence (VOHF) et le nombre de phonèmes (nbrP).

	r	r <sup>2</sup>	p
logF	.5	.25	.0001
VO	.25	.062	.006
VOHF	.05	.003	.58
nbrP	.058	.003	.53



**Figure 8.12.** : Temps de réponse (TR) en fonction du logarithme de la fréquence d'occurrence (logF) (A) et en fonction du nombre de voisins orthographiques (B). Les graphes C et D représentent les temps de réponse moyens en fonction de différents groupes de fréquence (C) et du nombre de voisins orthographiques (D).

L'absence d'effet du nombre de voisins de plus haute fréquence peut être lié au fait que la régression ne distingue pas les mots de basse des mots de haute fréquence (cf. Chap. 3). Le Tableau 8.2 présente les temps de réponse moyens obtenus pour 3 groupes de mots. On voit ici qu'aucun effet des VOHF n'est décelable si on considère l'ensemble des mots. En revanche, en ne prenant que des mots de basse fréquence ( $F < 10$  occurrences par million), on peut noter un effet facilitateur des VOHF, les mots n'ayant pas de VOHF étant répondu en moyenne 50 ms plus tard que les mots ayant au moins un VOH. Toutefois, il est à noter qu'il ne s'agit pas là d'une véritable manipulation expérimentale et que le nombre de mots par condition n'est pas constant si l'on ne considère que les mots de basse fréquence.

De même, nous pouvons réaliser la même analyse pour la variable nombre de phonèmes. Comme nous l'avons vu au chapitre 6, l'effet du nombre de phonème (= nombre de graphèmes) n'est observé que pour des mots de basse fréquence. Nous avons donc essayé de constituer 3 groupes de mots de basse fréquence variant par le nombre de phonèmes (3, 4, et 5). Cette analyse s'avère cependant périlleuse car la distribution des mots dans ces différentes catégories pour l'ensemble de nos 120 mots n'est pas très équilibrée (nbrP = 3 : N = 29 ;

nbrP = 4 : N = 85 ; nbrP = 5 : N = 6). En prenant un critère de basse fréquence de 18 occurrences par million, nous pouvons conserver l'ensemble des 6 mots ayant 5 phonèmes. En appliquant ce critère aux autres catégories, on obtient des groupes de 11 et 43 mots pour les conditions nbrP = 3 et = 4 respectivement. Les moyennes calculées à partir de ces trois groupes présentent une faible tendance vers un effet du nombre de phonèmes comme l'indique le Tableau 8.3.

Tableau 8.2. : Temps de réponse moyens obtenus pour trois groupes de mots variant par le nombre de voisins de plus haute fréquence (VOHF). Les valeurs de gauche correspondent à des mesures réalisées sur l'ensemble des 120 mots, alors que les mesures de droite correspondent à des mesures réalisées uniquement sur les mots de basse fréquence (F < 10 occurrences par million ; N = 44).

VOHF	Tous les mots		Mots de basse fréquence	
	TR (ms)	Nombre de mots	TR (ms)	Nombre de mots
0	2239	37	2306	9
1	2237	43	2258	18
>1	2232	40	2249	17

Tableau 8.3. : Temps de réponse moyens obtenus pour trois groupes de mots variant par le nombre de phonèmes (nbrP). Les valeurs de gauche correspondent à des mesures réalisées sur l'ensemble des 120 mots, alors que les mesure de droite correspondent à des mesures réalisées uniquement sur les mots de basse fréquence (F < 18 occurrences par million ; N = 60).

nbrP	Mots de basse fréquence	
	TR (ms)	Nombre de mots
3	2259	6
4	2256	43
5	2252	11

Nous réalisons ensuite la même analyse de régression linéaire pour les pourcentages d'erreurs obtenus pour chaque mot. Le Tableau 8.4 présente le résultat de ces régressions. On remarque ici que seul le logarithme de la fréquence est corrélé de manière significative avec les pourcentages d'erreurs (cf. également la Figure 8.13). Il faut noter cependant que les sujets réalisent dans l'ensemble peu d'erreurs dans ce protocole expérimental. Le taux d'erreurs ne semble donc pas être un indice très pertinent dans la tâche de LIP.

Tableau 8.4. : Régression linéaire entre les pourcentages d'erreur pour chaque mot et le logarithme de la fréquence d'occurrence (logF), le nombre de voisins orthographiques (VO), le nombre de voisins orthographiques de plus haute fréquence (VOHF) et le nombre de phonèmes (nbrP).

	r	r <sup>2</sup>	p
logF	.22	.047	.01
VO	.12	.015	.18
VOHF	.03	.001	.73
nbrP	.06	.004	.49

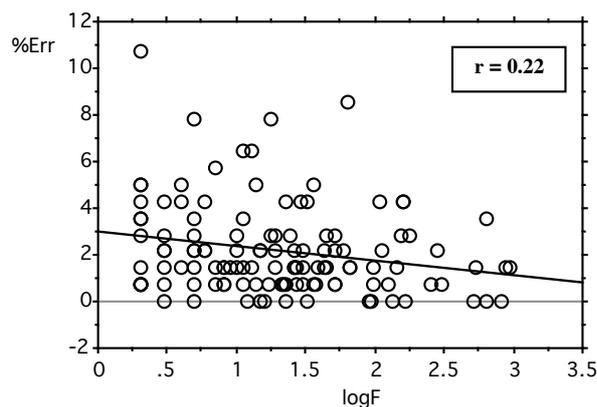


Figure 8.13. : Pourcentage d'erreurs (% Err) en fonction du logarithme de la fréquence d'occurrence (logF).

Nous présentons ici finalement une dernière analyse distinguant les sujets lents des sujets rapides afin de voir si la vitesse de réponse interagit avec le rôle des facteurs linguistiques considérés. La Figure 8.14 présente les valeurs des coefficients de corrélation obtenus entre les temps d'identification moyens de différentes populations de sujets lents et de sujets rapides et les facteurs "logarithme de la fréquence d'occurrence" et "nombre de voisins orthographiques". Les différentes populations correspondent aux 30, 40, 50, et 60 sujets les plus rapides et les plus lents du point de vue des temps des latences de réponses moyennes. On observe ici des coefficients de corrélation plus élevés entre logF et le groupe des sujets lents qu'entre logF et le groupe des sujets rapides. Inversement, les performances d'identification des sujets rapides sont mieux corrélées au nombre de voisins orthographiques que les performances d'identification des sujets lents. Ces résultats indiquent ainsi que les sujets lents sont plus sensibles à la fréquence d'occurrence des mots que les sujets rapides. En revanche, les sujets rapides sont plus sensibles au nombre de voisins orthographiques des mots que les sujets lents. Ceci est cependant étonnant car les effets de la densité du voisinage orthographique sont ici similaires à ceux observés en tâche de décision lexicale (cf. Grainger & Jacobs, 1996). Or le protocole LIP s'apparente plus à un paradigme d'identification perceptive qu'à la

TDL.

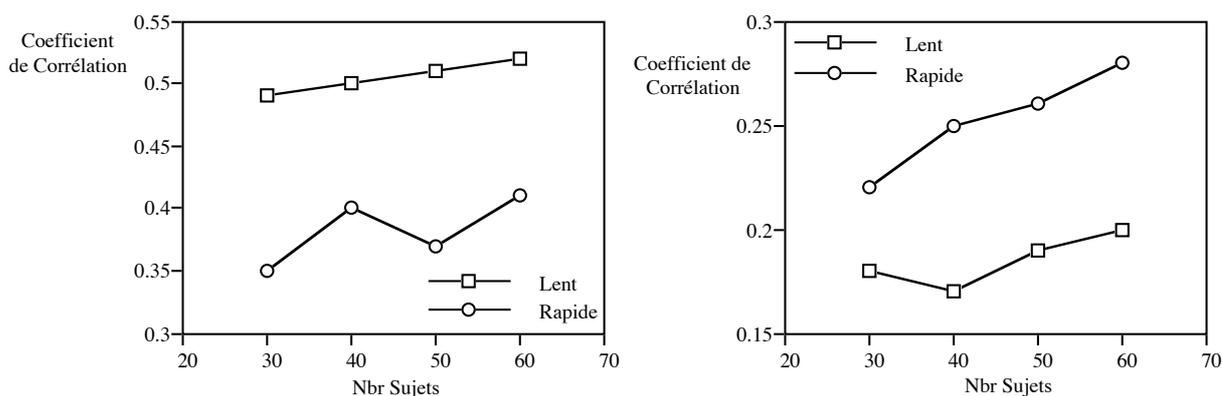


Figure 8.14. : Coefficients de corrélation entre les temps d'identification moyens de différentes populations de sujets lents et de sujets rapides et les facteurs "logarithme de la fréquence d'occurrence" et "nombre de voisins orthographiques". Le calcul de corrélation est réalisé avec des populations constituées respectivement des 30, 40, 50 et 60 sujets les plus lents et des 30, 40, 50 et 60 sujets les plus rapides.

## 8.4. Discussion

Cette étude se situe dans la lignée du travail présenté par Spieler et Balota (1997) et vise à fournir des données empiriques se situant au niveau des performances d'identification pour chaque mot. Ce type d'approche est complémentaire des études manipulant un facteur linguistique donné et cherchant à mettre à jour des relations entre des variations de ce facteur et des variations de la performance des sujets. En effet, les manipulations expérimentales classiques permettent de déceler des tendances à propos du rôle de certains facteurs sur les performances d'identification. Ces tendances fournissent des indices sur la dynamique interne du système de lecture. L'élaboration d'un modèle computationnel de la perception des mots écrits suppose de regrouper ces indices en spécifiant et en détaillant les mécanismes qui les génèrent. C'est ici que le type de données que nous avons présenté vient en complément des manipulations expérimentales classiques. Ces données imposent alors aux modèles, non seulement d'être en mesure de simuler les tendances expérimentales observées, mais également de pouvoir rendre compte des différences inter-mots dans les performances d'identification.

Il faut souligner toutefois que la force de ce type de données dépend grandement des choix expérimentaux que l'on fait. Notamment, nous avons mis l'accent sur l'importance d'enregistrer un grand nombre de sujets afin de réduire l'erreur réalisée sur les moyennes obtenues. D'autres solutions sont cependant envisageables. Une grande source d'erreur vient du fait que nous n'avons qu'une seule mesure pour rendre compte de la performance d'un sujet X sur l'identification d'un mot Y. Cette mesure est censée résumer la distribution théorique des

temps de réponse du sujet X pour le mot Y. On introduit donc ici une grande source de bruit. Une solution à ce problème est de faire répéter l'expérience une vingtaine de fois, par exemple, pour chaque sujet. Dans de telles conditions, on obtient une moyenne des performances du sujet X sur le même mot Y. Cette mesure fournit un meilleur indice pour résumer la distribution théorique des temps d'identification du sujet X pour le mot Y et permet de réduire encore l'erreur produite. Cependant, cette solution risque de générer un autre problème. En effet, en répétant le traitement d'un mot, on change aussi, d'une certaine manière, son statut lexical : un mot peu fréquent n'aurait plus tout à fait le statut de mot peu fréquent après avoir été traité plusieurs fois par le système de lecture. Le risque est donc que la répétition interagisse avec le statut lexical des mots.

Une autre solution au problème du bruit est de ne plus placer notre analyse strictement au niveau des mots mais au niveau de petits groupes de mots. En effet, l'objectif de ce type d'études est de parvenir à ordonner une série de mots en fonction de leur latences d'identification. Finalement, c'est bien cet ordre des performances que doivent reproduire et simuler les modèles. Or, la présence de bruit, inévitable, ne permet pas de considérer les mesures obtenues comme reflétant de manière fiable l'ordre théorique des performances pour ces mots. Ceci est illustré à la Figure 8.15. L'ordre des mots sur une échelle temporelle est défini par les temps d'identification moyens obtenus pour chaque mot. Cet ordre est variable d'une expérience à l'autre lorsque le nombre de sujets utilisés est peu élevé (cf. les coefficients de corrélations entre les études de Wayne State, McGill et Washington). Pour un grand nombre de sujets en revanche, les variations de l'ordre des performances, d'une étude à l'autre, sont réduites. Il reste néanmoins que, en dépit de ces variations de l'ordre des performances, certains groupes de mots seront toujours traités plus rapidement que d'autres. Aussi, en divisant en petits groupes l'ordre des performances au niveau des mots, et en calculant une moyenne commune pour ces groupes, les corrélations inter-études doivent être meilleures et, donc, les données proposées pour tester les performances des modèles de ce fait plus robustes.

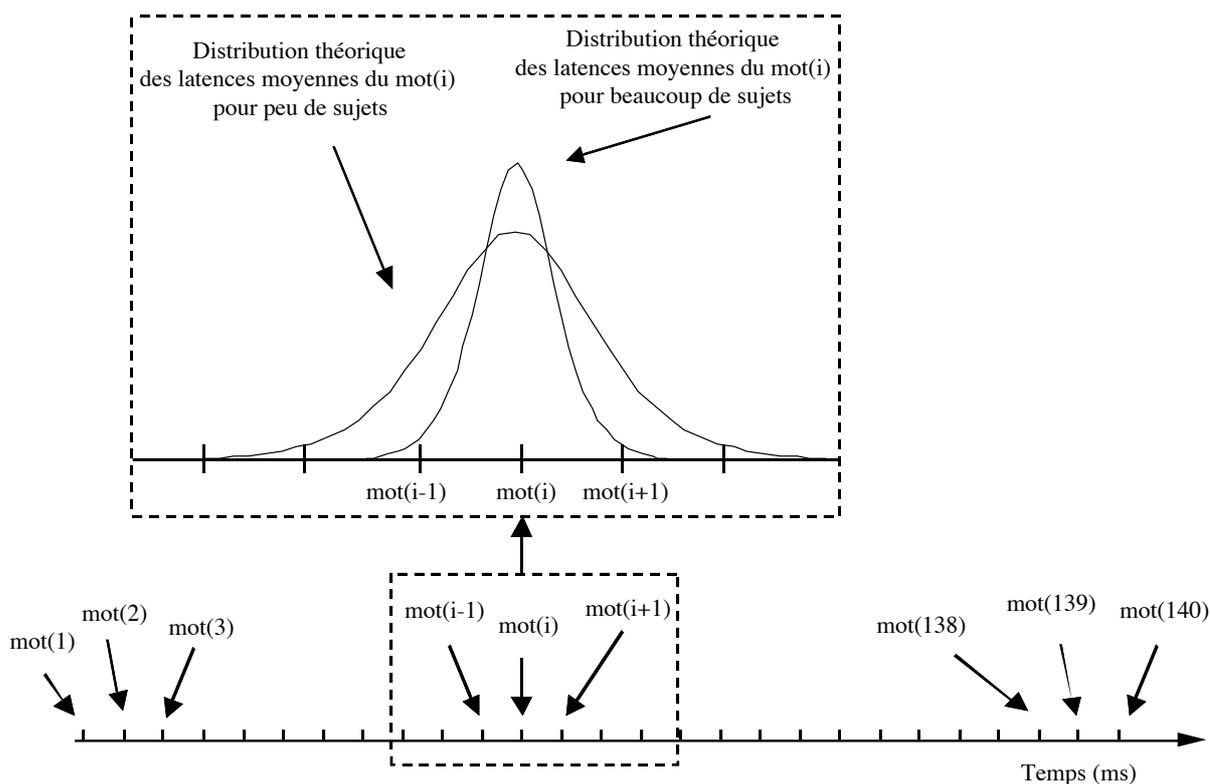


Figure 8.15. : Représentation de l'ordre des performances obtenues à la suite d'une expérience visant à mesurer les temps de réponse au niveau des mots. Selon le nombre de sujets, cet ordre peut être plus ou moins bruité. Ceci est illustré dans l'encart où sont représentées les distributions théoriques d'un mot( $i$ ) en fonction du nombre de sujets. Malgré ces variations, il reste que certains groupes de mots seront plus ou moins dissociables que d'autres.

La solution que nous proposons s'inspire de Ratcliff (1979) pour l'analyse des distributions de temps de réaction. On commence d'abord par ordonner les temps de réponse moyens pour l'ensemble des mots, du plus lent au plus rapide. On calcule ensuite la moyenne des temps de réponse pour les  $n$  premiers mots (le nombre  $n$  détermine le nombre de mots contenus dans un sous-groupe de mots). Puis, on calcule la moyenne pour le groupe de mots suivant, c'est-à-dire les mots placés dans l'ordre des performances du rang  $n+1$  au rang  $n+n$  (voir la Figure 8.16 pour un calcul avec  $n = 3$ ). On continue ainsi de suite jusqu'au dernier mot (ayant le temps de réponse le plus lent). On obtient alors, pour notre étude,  $120/n$  moyennes de  $120/n$  sous-groupes de mots. La Figure 8.17 représente le résultat de ce calcul pour notre expérience de 120 mots en découpant les 120 mots en 24 groupes de 5 mots. C'est à cette courbe empirique que doivent être comparées les performances des modèles. Pour cela, il s'agit simplement de calculer les moyennes des sous-groupes formés précédemment par rapport aux performances du modèle. L'évaluation des modèles peut ainsi se baser sur l'écart entre les valeurs empiriques moyennes de chaque sous-groupe et les valeurs prédites par les modèles.

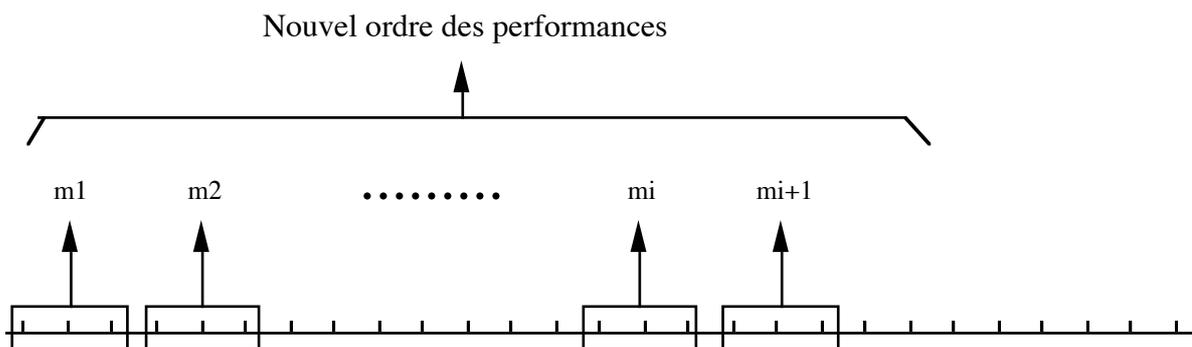


Figure 8.16. : Segmentation de l'ordre des performances au niveau des mots en sous-groupes de  $n=3$  items. Une moyenne est calculée pour chacun de ces sous-groupes constituant un nouvel ordre des performances moins bruité.

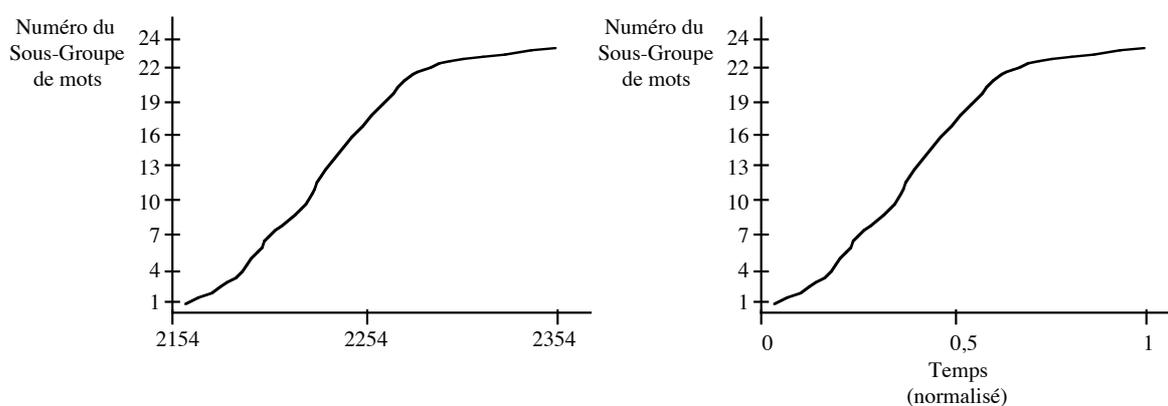


Figure 8.17. : Courbes représentant les moyennes des temps de réponse (en abscisse) de chaque sous-groupe, avec le numéro du sous-groupe (en ordonnée). Le graphe de gauche donne les valeurs de moyennes en millisecondes et le graphe de droite une valeur du temps normalisé suivant les valeurs temporelles maximales et minimales.

Pour illustrer notre proposition, prenons l'exemple du FUM. Ce modèle est l'un des rares modèles capable de donner des prédictions quantitatives dans la tâche de LIP. La plupart des autres modèles computationnels du traitement des mots écrits ont été réalisés pour rendre compte des données obtenues dans la tâche de prononciation. Nous avons donc réalisé des simulations avec le FUM sur les 120 mots de notre expérience et avec les paramètres définis au chapitre 7. Pour chaque mot, nous enregistrons le cycle de traitement pour lequel les courbes d'activation des mots dépassent un certain seuil d'identification fixé à 0.67. Nous corrélons ensuite les données empiriques par mot aux données simulées. Nous obtenons un coefficient de coefficient de corrélation de 0.10.

Ce résultat n'est évidemment pas très satisfaisant. Toutefois, comme nous l'avons signalé au chapitre 7, ce modèle présente encore, au niveau du traitement des mots individuels, quelques problèmes mineurs. Ces problèmes se situent au niveau de mots particuliers et se repercutent inévitablement sur les performances du modèle, et donc sur le coefficient de corrélation

avec les données. De plus, nous n'avons pas réalisé pour cette simulation d'adaptation propres à la tâche de LIP mais nous avons réalisé des simulations simples n'intégrant pas les contraintes potentielles de la tâche. Il n'est donc pas surprenant d'obtenir encore un score aussi faible.

La Figure 8.18 illustre finalement la performance du modèle lorsque l'on calcule les moyennes des latences prédites par le modèle pour chaque sous-groupe défini suivant l'ordre de nos données empiriques. On constate ainsi une grande différence entre les courbes prédites et les courbes empiriques (Figure 8.17). Même au niveau de groupes de mots, le FUM semble encore assez loin des courbes empiriques obtenues dans notre expérience, ces courbes fournissent néanmoins une contrainte empirique sur laquelle les modèles peuvent s'appuyer pour tester la validité des performances qu'ils prédisent.

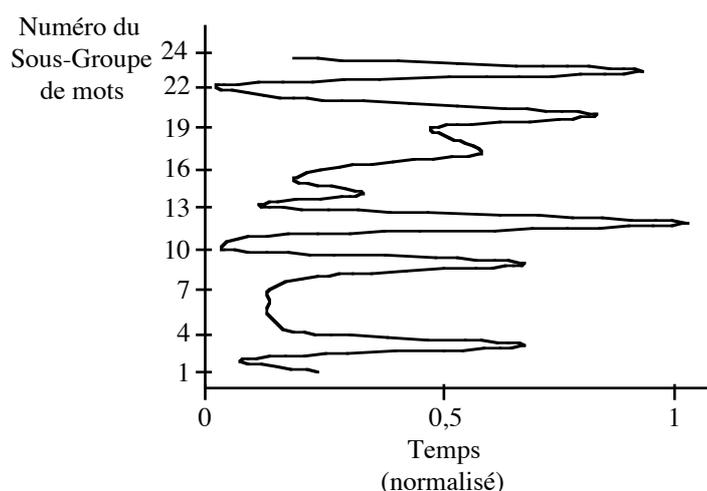


Figure 8.18. : Courbes représentant les moyennes des temps de réponse (en abscisse, les mesures temporelles en cycles ont été ici directement normalisées) de chaque sous-groupe, avec le numéro du sous-groupe (en ordonnée).

En résumé, nous avons montré dans ce chapitre que l'évaluation des modèles au niveau des items passe avant tout par l'évaluation des données empiriques. En ce sens, envisager une évaluation aussi contraignante des modèles computationnels suppose que les tests proposés soient fiables et robustes. Les études présentées jusqu'à maintenant ne répondent pas à ce double critère de fiabilité/robustesse, car elles se basent sur un nombre trop réduit de mesures (sujets) par mot. L'étude que nous avons présentée améliore la qualité des données qui vont servir de support à l'évaluation des modèles. Toutefois, une part d'erreur demeure dans ces données. C'est pourquoi pour pallier ce problème, nous proposons de ne plus placer l'éva-

luation au niveau des mots mais au niveau des groupes de mots. En classant les mots par ordre de performance (i.e., du plus petit temps de réponse moyen au plus élevé) et en moyennant les temps de réponse sur des groupes de mots (Ratcliff, 1979), on fournit une base de données fiable réduisant l'erreur commise inévitablement, sur laquelle une évaluation des modèles peut être entreprise.

L'évaluation des modèles doit-elle s'arrêter là ? Comme le suggère Collyer (1995), la compétition entre modèles ne s'arrête évidemment pas à une mesure d'adéquation à des données empiriques. D'autres critères doivent être pris en compte (Jacobs & Grainger, 1994 ; Jacobs et al., 1998). Citons-en deux : la simplicité et la plausibilité fonctionnelle. Un des exemples les plus parlants pour illustrer ce point est l'article de Keren et Baggen (1981) sur la modélisation des performances de reconnaissance des lettres. Keren et Baggen comparent deux modèles : un modèle proposé par Luce (1959, 1963) et un modèle s'inspirant de Tversky (1977). Ils testent ces deux modèles par rapport à une matrice de confusion obtenue par Gilmore, Hersh, Caramazza, et Griffin (1979). Ils rapportent les coefficients de corrélation entre les performances de ces deux modèles et les données empiriques et obtiennent respectivement un coefficient de .994 pour le modèle de Luce et de .917 pour le modèle inspiré de Tversky. Toutefois, malgré un meilleur score du modèle de Luce, les auteurs argumentent en faveur du second modèle, pour deux raisons : sa simplicité (ce modèle contient 29 paramètres libres contre 350 pour le modèle de Luce) et sa plausibilité (il est possible de fournir une interprétation psychologiquement plausible et fonctionnelle pour chacun des paramètres, ce qui n'est pas le cas des 350 paramètres du modèle de Luce). Avec cet exemple, on voit donc que la simple adéquation d'un modèle à des données empiriques, aussi fortes et contraignantes soient-elles, ne peut en aucun cas servir de critère unique pour l'évaluation des modèles proposés.

# Chapitre 9

## Les mots polysyllabiques

*Maël lisant l'étiquette d'un pot de yaourt à l'an-an-as :  
« Papa ? Ca existe un fruit qui s'appelle : han-han ? »*

**L**a plupart des études portant sur les rapports entre orthographe et phonologie lors de la perception d'un mot écrit se focalisent sur un échantillon réduit de mots : les mots monosyllabiques de 4-5 lettres. De même, les modèles computationnels proposés jusqu'à maintenant se concentrent également sur la modélisation du couplage ortho-phonologique pour cette catégorie réduite de mots. Le choix d'une telle approche s'explique et se justifie, d'un point de vue heuristique, si l'on considère, comme nous l'avons déjà dit, le grand nombre de dimensions linguistiques qui caractérisent un mot. Aussi, réduire l'échantillon des mots revient-il à simplifier, dans un premier temps, la question de la perception des mots écrits et à faciliter la compréhension des interactions, au sein du système de lecture, entre les dimensions linguistiques restantes. En effet, en ne considérant que des mots monosyllabiques, la structure phonologique des mots et la complexité de cette structure sont de ce fait plus homogènes d'un mot à l'autre. De même, en ne choisissant que des mots courts (4-5 lettres), on peut minimiser l'influence de facteurs tels que la "visibilité des lettres" et postuler que l'identification des mots manipulés est réalisée en une seule fixation, sans l'intervention de saccades oculaires.

Pourtant, bien entendu, les mots monosyllabiques, constitués de peu de lettres, ne sont qu'un cas particulier parmi l'ensemble des mots d'un lexique donné. Les modèles de la perception visuelle des mots ne peuvent donc se contenter de décrire uniquement les processus permettant de transcoder l'information orthographique en information phonologique pour des

mots monosyllabiques courts. Cependant, il existe encore assez peu d'études empiriques pour contraindre de manière claire et précise l'élaboration de tels modèles (cf. Chap. 3). C'est pourquoi, le propos des expériences présentées dans ce chapitre est d'apporter quelques indices empiriques supplémentaires sur le rôle des facteurs "nombre de syllabes" et "nombre de lettres" dans la perception des mots écrits.

Nous présentons pour cela trois expériences réalisées en Allemand. L'Allemand est une langue particulièrement intéressante pour l'étude du facteur "syllabe". En effet, elle est classée parmi les langues à orthographe "superficielle" ("shallow orthography", cf. Chap. 3) car les correspondances entre unités orthographiques et unités phonologiques sont relativement transparentes et directes. Ainsi, le passage du code sous-syllabique orthographique au code phonologique présente peu ou pas d'ambiguïtés. Cette langue réduit donc les problèmes de correspondances sous-syllabiques et est de ce fait idéale pour étudier le rôle d'unités plus grandes, comme la syllabe.

Dans ces expériences, notre objectif est de ne pas trop augmenter la complexité des dimensions linguistiques des mots manipulés. Nous nous contentons de comparer les performances pour des mots dissyllabiques par rapport à des mots monosyllabiques. De même, la manipulation du nombre de lettres porte sur un intervalle allant de 3 à 6 lettres. Avec un tel intervalle, on peut encore postuler qu'une fixation oculaire suffit pour identifier un mot. De plus, ces expériences sont toutes réalisées avec le protocole LIP. Une fois encore, ce protocole nous paraît fournir de meilleures mesures des processus d'identification des mots lors de la lecture silencieuse.

### **9.1. Expérience 7 : fréquence \* syllabe**

Cette expérience est similaire aux expériences 2 et 3 réalisées au chapitre 6. En effet, dans cette étude, nous maintenons constant le nombre de lettres (5) et manipulons la structure phonologique des mots et nous comparons les temps d'identification entre des mots ayant une structure phonologique monosyllabique et dissyllabique. Notre hypothèse ici est que la segmentation ortho-phonologique des mots dissyllabiques est, a priori, plus complexe que celle des mots monosyllabiques. Pour un mot dissyllabique, le système de lecture doit non seulement retrouver et convertir chaque graphème en phonème, mais également coupler certains graphèmes pour former une syllabe. Ce couplage n'est nécessaire qu'une seule fois pour les

mots monosyllabiques. Pour les mots dissyllabiques, il faut, a priori, que le système de lecture groupe les graphèmes de la première syllabe entre eux et les distingue des graphèmes de la seconde syllabe. Cette segmentation, ou ce double couplage, s'il a lieu, semble plus complexe à réaliser qu'un seul couplage. Nous devons donc observer, de ce fait, des temps d'identification plus élevés pour les mots dissyllabiques par rapport aux mots monosyllabiques. Par ailleurs, l'expérience 3 du chapitre 6 nous révèle une interaction entre la fréquence d'occurrence des mots et la manipulation de la structure phonologique. Dans cette précédente expérience, seuls les mots de basse fréquence présentent un effet de la manipulation phonologique. L'interprétation de ce résultat, en termes de modèles, est que les mots de haute fréquence sont traités rapidement sur la base d'un traitement global et parallèle de la forme visuelle. Par contre, les mots de basse fréquence requièrent un recodage phonologique sous-lexical, au sein duquel des conflits ortho-phonologiques peuvent émerger. Cette expérience manipule ainsi 3 groupes de fréquence (i.e., des mots de haute, moyenne et basse fréquences) divisés chacun en deux sous-groupes, l'un composé de mots monosyllabiques, l'autre de mots dissyllabiques.

### Méthode

Sujets. 15 étudiants de l'Université de Marburg (Allemagne) participent à cette expérience. Ils sont tous de langue maternelle allemande et ont une vision normale ou corrigée.

Matériel expérimental. Les stimuli utilisés se divisent en trois groupes de fréquence : 30 mots de haute fréquence ( $F > 150$  occurrences par million), 30 mots de moyenne fréquence ( $40 < F < 70$ ) et 30 mots de basse fréquence ( $F < 2$ ). Les valeurs de la fréquence d'occurrence proviennent de la base de données Celex (Baayen et al., 1993). Chaque groupe de fréquence est ensuite divisé en deux sous-groupes de 15 mots chacun : l'un composé de mots monosyllabiques et l'autre de mots dissyllabiques. Tous des mots allemands utilisés dans cette expérience sont composés de 5 lettres. Par ailleurs, nous avons maintenu constants autant que possible un certain nombre de facteurs comme la fréquence des bigrammes, le nombre de voisins orthographiques et le nombre de voisins de plus haute fréquence. Le Tableau 9.1 regroupe les valeurs moyennes de ces facteurs pour les 6 groupes expérimentaux de cette expérience. L'Annexe IX fournit le détail de ces valeurs pour l'ensemble des stimuli de l'expérience. 10 stimuli supplémentaires sont par ailleurs utilisés lors de la phase d'entraînement.

Tableau 9.1. : Description statistique des 6 groupes expérimentaux de l'expérience 7. HF = haute fréquence. MF = moyenne fréquence. BF = basse fréquence. F = fréquence. BiF = fréquence des bigrammes. VO = nombre de voisins orthographiques. VHF = nombre de voisins de plus haute fréquence.

	HF		MF		BF	
	1 Syl.	2 Syl.	1 Syl.	2 Syl.	1 Syl.	2 Syl.
F	962	685	52.96	53.56	0.57	0.57
BiF	9010	11653	2173	4890	3001	5602
VO	2.60	2.80	2.67	2.67	2.67	2.67
VHF	0.07	0.07	0.27	0.40	1.67	2.13

Procédure. Cette expérience, comme les suivantes, est réalisée avec un ordinateur PC Pentium. Les conditions d'expérimentation sont similaires à celles décrites dans l'expérience 1 du chapitre 2, de même que la procédure expérimentale (cf. Chap. 2).

### Résultats

La procédure d'exclusion des réponses trop tardives ("outliers") est identique à celle décrite au chapitre 2. Seuls les temps de réponse compris entre + et - trois écarts types depuis la moyenne par sujet sont conservés pour l'analyse des latences. Des analyses de variance sont réalisées en prenant les sujets et les items comme facteurs aléatoires et la fréquence d'occurrence croisée avec le nombre de syllabes comme facteurs intra-sujet.

La Figure 9.1 présente les résultats obtenus dans cette expérience. Nous observons d'abord, pour les temps de réponse, un effet graduel de la fréquence d'occurrence similaire à celui décrit au chapitre 2 ( $F(2,14) = 29.07, p < .0001$  ;  $F(2,84) = 22.62, p < .0001$ ). De même, nous obtenons un effet du nombre de syllabes, les mots monosyllabiques étant identifiés en moyenne 54 ms plus tôt que les mots dissyllabiques ( $F(1,14) = 41.13, p < .0001$  ;  $F(1,84) = 16.59, p < .0001$ ). L'interaction entre ces deux facteurs est significative par sujets ( $F(2,28) = 6.97, p < .01$ ) mais pas par item. Si l'on compare néanmoins les mots mono- et dissyllabiques pour les différents groupes de fréquence, on constate des différences de 46 ms, 24 ms et 90 ms pour les groupes de haute, moyenne, et basse fréquences respectivement, différences significatives pour les groupes de haute et basse fréquences uniquement.

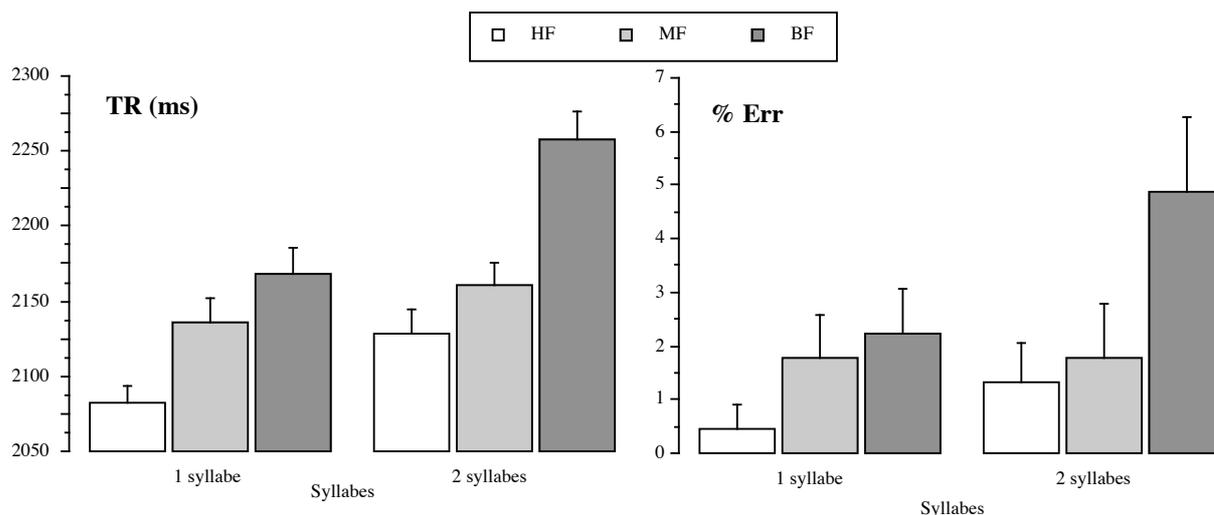


Figure 9.1. : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentages d'erreurs (% Err) dans l'expérience 7 croisant le nombre de syllabes (1 vs. 2) et la fréquence d'occurrence (HF = haute fréquence, MF = moyennes fréquence ; BF = basse fréquence). Le graphe fournit également les valeurs des erreurs standard pour chaque condition expérimentale.

Pour ce qui est des pourcentages d'erreurs, nous obtenons les mêmes tendances que pour les temps de réponse : un effet graduel de la fréquence d'occurrence ( $F(2,14) = 5.34, p < .05$  ;  $F(2,84) = 4.46, p < .05$ ) et un effet du nombre de syllabes, les mots disyllabiques générant plus d'erreurs que les mots monosyllabiques ( $F(1,14) = 4.35, .1 < p < .05$  ; non significatif par item). L'interaction entre ces deux facteurs n'est pas significative.

### Discussion

Dans cette expérience, nous obtenons un double effet marqué : l'un concerne la fréquence d'occurrence des mots (effet de fréquence classique), l'autre le nombre de syllabes dans les mots. Ainsi, le résultat le plus important est un avantage des mots monosyllabiques par rapport aux mots disyllabiques, pour ce qui concerne les latences d'identification. Cet avantage est plus fort lorsque ces mots sont de basse fréquence (90 ms) par rapport aux mots de haute fréquence (46 ms).

Dans la lignée de l'expérience réalisée en manipulant le nombre de graphèmes (Expériences 2 et 3, chapitre 6), cette expérience nous permet de mettre en évidence le rôle d'une autre dimension phonologique : le nombre des syllabes dans un mot. Ce résultat nous indique que le traitement de mots disyllabiques est plus long que celui de mots monosyllabiques. Ceci constitue donc un argument empirique supplémentaire pour souligner l'influence de la structure phonologique des mots sur leur identification visuelle. Ici encore, la structure phonologique sous-lexicale semble conditionner les latences d'identification des mots.

## 9.2. Expérience 8 : fréquence \* nombre de lettres

Dans cette expérience, nous manipulons cette fois un facteur orthographique, le nombre de lettres. Etudier le rôle spécifique du nombre de lettres est important lorsqu'on manipule un facteur comme le nombre de syllabes. En effet, en augmentant le nombre de syllabes, on augmente généralement aussi le nombre de lettres. Il est donc important de spécifier le rôle différentiel de chaque variable sur les temps d'identification. Comme nous l'avons dit au chapitre 3, la plupart des études obtiennent un effet du nombre de lettres pour des mots supérieurs à 6 lettres (e.g., O'Regan & Jacobs, 1992). Récemment, Weekes (1997) a étudié l'influence de ce facteur pour des mots composés de 3 à 6 lettres dans une tâche de prononciation. Cet auteur observe un effet du nombre de lettres de 11.3 ms par lettre uniquement pour des mots de basse fréquence. C'est pourquoi l'objectif de cette étude est double. Premièrement, il s'agit de voir si, dans un protocole d'identification perceptive, on observe également un effet du nombre de lettres sur les latences d'identification des mots et, ce, dans la même gamme que celle de Weekes (1997) (i.e., pour des mots de 3 à 6 lettres). Deuxièmement, nous croisons le facteur "nombre de lettres" avec le facteur "fréquence d'occurrence" afin de voir si, comme dans l'étude de Weekes (1997), l'effet du nombre de lettres n'apparaît que pour des mots de basse fréquence.

### Méthode

Sujets. 22 étudiants de l'Université de Marburg (Allemagne) participent à cette expérience. Ils sont tous de langue maternelle allemande et ont une vision normale ou corrigée.

Matériel expérimental. Les stimuli utilisés se divisent en deux groupes de fréquence : 60 mots de haute fréquence ( $F > 150$  occurrences par million) et 60 mots de basse fréquence ( $F < 10$  occurrences par million). Chaque groupe de fréquence est ensuite divisé en quatre sous-groupes de 15 mots chacun ayant un nombre de lettres différent : 3, 4, 5, et 6 lettres. Tous les mots allemands utilisés dans cette expérience sont des mots monosyllabiques. Par ailleurs, nous maintenons constants un certain nombre de facteurs tels que : la fréquence des bigrammes, le nombre de voisins orthographiques et le nombre de voisins de plus haute fréquence. Le Tableau 9.2 regroupe les valeurs moyennes de ces facteurs pour les 8 groupes expérimentaux de cette expérience. L'Annexe X fournit le détail de ces valeurs pour l'ensemble des

stimuli de l'expérience. 10 stimuli supplémentaires sont par ailleurs utilisés lors de la phase d'entraînement.

Tableau 9.2 : Description statistique des 8 groupes expérimentaux de l'expérience 8. HF = haute fréquence. BF = basse fréquence. F = fréquence. BiF = fréquence des bigrammes. VO = nombre de voisins orthographiques. VHF = nombre de voisins de plus haute fréquence.

	Nombre de Lettres							
	3		4		5		6	
	HF	BF	HF	BF	HF	BF	HF	BF
F	587	3.26	572	3.46	711	3.86	639	3.06
BiF	8157	7771	8639	8811	9537	8957	10603	8884
N	3.67	3	3.27	2.93	2.73	2.4	2.33	2.53
HFN	0.93	2.2	0.8	2.2	0	1.67	0	1.47

### Résultats

Un item (ZAHM) avec un pourcentage d'erreurs de 43.5% est exclu de nos analyses. La procédure d'exclusion des réponses trop tardives ("outliers") est identique à celle utilisée dans les autres expériences. Des analyses de variance sont réalisées en prenant les sujets et les items comme facteurs aléatoires, et la fréquence d'occurrence croisée avec le nombre de lettres comme facteurs intra-sujet.

La Figure 9.2 présente les résultats obtenus dans cette expérience avec le facteur "nombre de lettres". Nous observons tout d'abord pour les temps de réponse, un effet graduel du nombre de lettres, les mots composés de peu de lettres (3-4) étant identifiés plus rapidement que les mots composés d'un plus grand nombre de lettres (5-6) ( $F(3,21) = 4.39, p < .05$  ;  $F(2,111) = 4.03, p < .01$ ). En ajustant ces quatre valeurs à une droite de régression linéaire, on obtient un coefficient de corrélation de .96 ( $p < .05$ ) et une pente de 13.7 ms par lettre (en comparaison, Weekes (1997) obtient une pente de 11.3 ms par lettre). Nous observons également un net effet de fréquence ( $F(1,21) = 21.27, p < .001$  ;  $F(1,111) = 12.08, p < .001$ ). La Figure 9.3 montre l'effet du nombre de lettres pour les deux groupes de fréquence. L'interaction entre fréquence et nombre de lettres n'est significative que dans l'analyse par sujets ( $F(3,63) = 3.82, p < .05$ ).

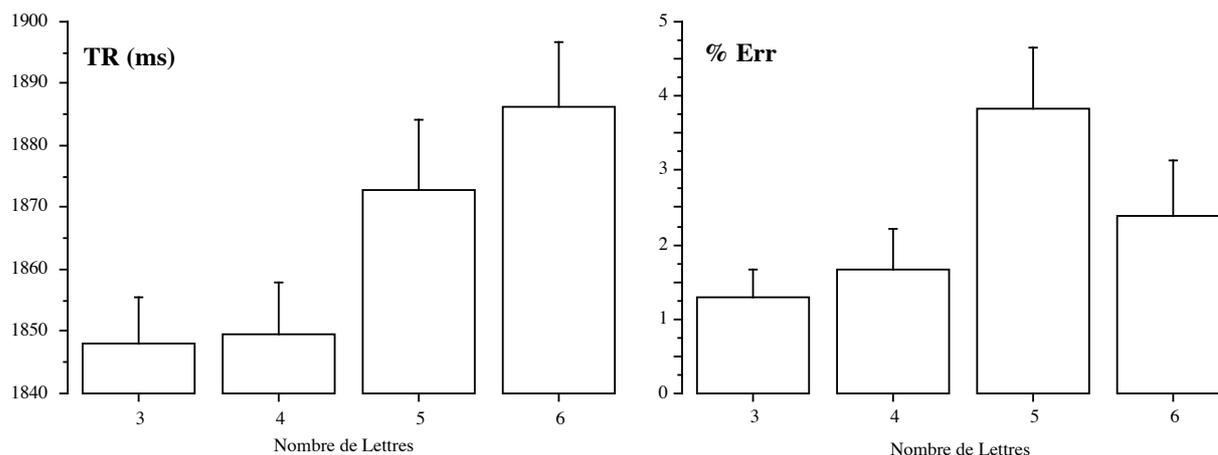


Figure 9.2. : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentages d'erreurs (% Err) dans l'expérience 8 pour les 4 groupes différant par le nombre de lettres (3, 4, 5, et 6). Le graphe fournit également les valeurs des erreurs standard pour chaque condition expérimentale.

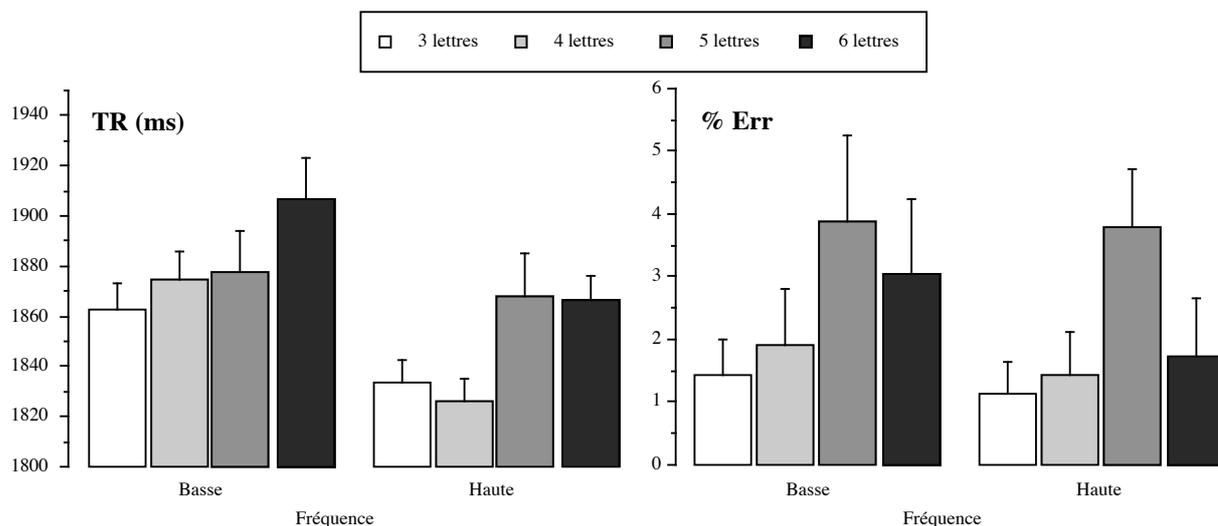


Figure 9.3. : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentages d'erreurs (% Err) dans l'expérience 8 croisant le nombre de lettres (3, 4, 5, et 6) et la fréquence d'occurrence (haute vs. basse fréquences). Le graphe fournit également les valeurs des erreurs standard pour chaque condition expérimentale.

Pour ce qui est des pourcentages d'erreurs, seul l'effet de la longueur des mots dépasse le seuil de significativité ( $F(3,21) = 2.96, p < .05$  ;  $F(3,111) = 2.91, p < .05$ ). Un plus grand nombre d'erreurs est réalisé sur les mots comprenant le plus de lettres.

### Discussion

Dans cette expérience, nous obtenons un effet graduel du nombre de lettres pour quatre catégories de mots allant de 3 à 6 lettres. Contrairement à Weekes (1997), nous n'observons cependant pas d'interaction avec la fréquence des mots. L'effet du nombre de lettres est également présent pour les deux groupes de fréquence. Toutefois, alors que l'effet du nombre de

lettres est similaire pour les mots de basse et haute fréquences si l'on considère seulement les mots de 3 et 6 lettres, il diverge pour ce qui est des mots de 4 et 5 lettres. Pour les mots de basse fréquence l'effet du nombre de lettres paraît plus gradué, alors que pour les mots de haute fréquence on peut distinguer les performances pour les mots de 3-4 vs. 5-6 lettres.

Les résultats de cette expérience indiquent que le nombre de lettres dans un mot peut influencer les latences de réponse dans une tâche d'identification perceptive. Même pour des longueurs de mots de 4-5-6 lettres, ce facteur orthographique ne semble donc pas être un facteur à négliger.

### 9.3. Expérience 9 : syllabe \* nombre de lettres

Les deux expériences (7 et 8) précédentes indiquent qu'à la fois le nombre de syllabes et le nombre de lettres dans un mot sont deux facteurs influençant les performances d'identification des sujets. Cette troisième expérience vise à coupler ces deux facteurs afin de préciser leur influence respective sur les latences d'identification. Il nous sera alors possible de voir plus particulièrement comment évolue l'effet marqué du nombre de syllabes observé dans l'expérience 7. Cet effet est observé pour des mots de 5 lettres, mais on peut se demander si cet effet sera tout aussi marqué pour des mots de 4 et 6 lettres. De même, réciproquement, on pourra estimer si l'effet du nombre de lettres dépend de la structure syllabique des mots.

#### Méthode

Sujets. 23 étudiants de l'Université de Marburg (Allemagne) participent à cette expérience. Ils sont tous de langue maternelle allemande et ont une vision normale ou corrigée.

Matériel expérimental. Les stimuli utilisés se divisent en trois groupes de nombre de lettres : 30 mots de 4 lettres, 30 mots de 5 lettres et 30 mots de 6 lettres. Chaque groupe est ensuite divisé en deux sous-groupes de 15 mots monosyllabiques et 15 mots disyllabiques. Tous des mots allemands utilisés dans cette expérience sont des mots de basse fréquence ( $F < 10$  occurrences par million). Par ailleurs, nous maintenons constants un certain nombre de facteurs comme la fréquence d'occurrence, la fréquence des bigrammes, le nombre de voisins orthographiques et le nombre de voisins de plus haute fréquence. Le Tableau 9.3 regroupe les valeurs moyennes de ces facteurs pour les 6 groupes expérimentaux de cette expérience (l'An-

nexe XI fournit le détail de ces valeurs pour l'ensemble des stimuli). 10 stimuli supplémentaires sont par ailleurs utilisés lors de la phase d'entraînement.

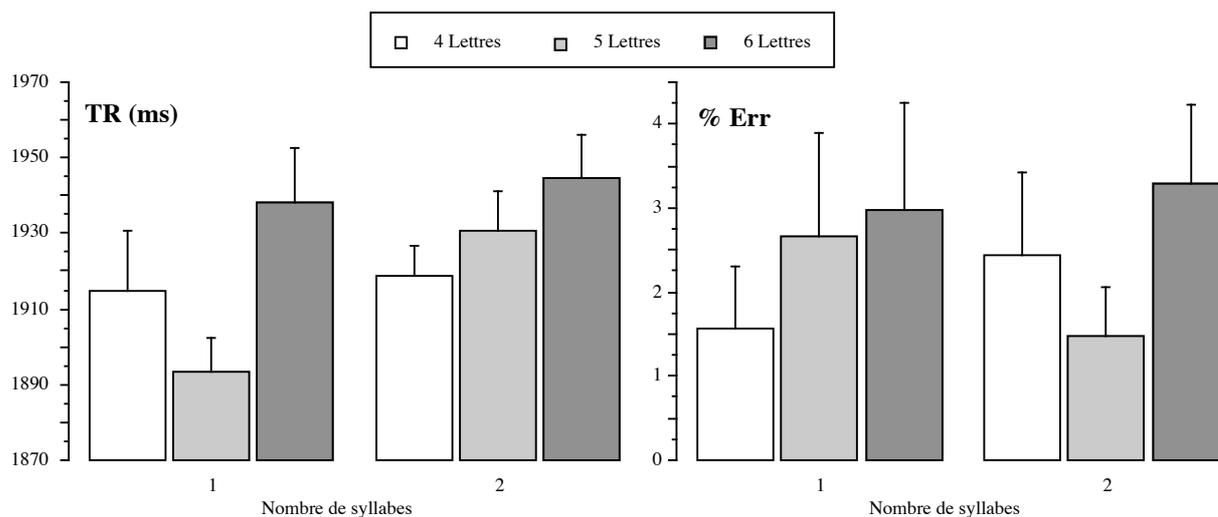
Tableau 9.3. : Description statistique des 6 groupes expérimentaux de l'expérience 9. F = fréquence. BiF = fréquence des bigrammes. VO = nombre de voisins orthographiques. VHF = nombre de voisins de plus haute fréquence.

	Nombre de Lettres					
	4		5		6	
	1 Syl.	2 Syl.	1 Syl.	2 Syl.	1 Syl.	2 Syl.
F	5.93	6	5.8	6	5.73	5.93
BiF	7412	5127	7656	6789	8502	7864
N	1.87	1.87	1.8	1.8	1.67	1.73
HFN	1.33	0.8	0.8	0.73	0.73	0.93

### Résultats

Trois items (FIRN, EBBE et OVAL) avec un pourcentage d'erreurs de 26.08, 21.73 et 21.73% respectivement sont exclus de nos analyses. La procédure d'exclusion des réponses trop tardives ("outliers") est identique à celle utilisée dans les autres expériences. Des analyses de variance sont réalisées en prenant les sujets et les items comme facteurs aléatoires et le nombre de syllabes croisé avec le nombre de lettres comme facteurs intra-sujet.

La Figure 9.4 présente les résultats obtenus dans cette expérience. Nous observons tout d'abord, pour les temps de réponse, un effet graduel du nombre de lettres, les mots composés de 4-5 lettres étant identifiés plus rapidement que les mots composés de 6 lettres ( $F(1,22) = 8.62, p < .001$  ;  $F(2,81) = 3.62, p < .05$ ). En ajustant les valeurs obtenues à une droite de régression linéaire, on obtient un coefficient de corrélation de .88 ( $p > .1$ ) et une pente de 13.5 ms par lettre (nous obtenons une pente de 13.7 ms par lettre dans l'expérience 8). Nous observons également un effet du nombre de syllabes ( $F(1,22) = 4.6, p < .05$  ;  $F(2,81) = 2.68, p = .1$ ). On retrouve donc ici aussi une tendance vers un avantage des mots monosyllabiques par rapport aux mots disyllabiques. L'interaction entre nombre de lettres et nombre de syllabes n'est cependant pas significative.



**Figure 9.3.** : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentage d'erreurs (% Err) dans l'expérience 9 croisant le nombre de lettres (4, 5, et 6) et le nombre de syllabes (1 vs. 2). Le graphe fournit également les valeurs des erreurs standards pour chaque condition expérimentale.

Pour ce qui est des pourcentages d'erreurs, on n'observe pas d'effet du nombre de syllabes ni d'effet du nombre de lettres (tous les  $F_s < 1.5$ ).

### Discussion

Dans cette expérience, nous répliquons à la fois l'effet du nombre de syllabes et l'effet du nombre de lettres sur les latences d'identification dans la tâche de LIP. Toutefois, on remarque plus spécifiquement que l'effet du nombre de syllabes apparaît essentiellement pour les mots de 5 lettres. Ceci est conforme aux résultats de l'expérience 7 réalisée avec uniquement des mots de 5 lettres. En revanche, pour les mots de 4 ou 6 lettres, l'effet du nombre de syllabes est presque inexistant. Au regard des résultats obtenus dans l'expérience 7 et 9, il semble donc que seuls les mots de 5 lettres soient sensibles au facteur "nombre de syllabes".

Du point de vue de l'effet du nombre de lettres, on observe dans cette expérience un effet graduel de ce facteur sur les temps d'identification des mots disyllabiques ; mais cet effet semble moins net pour les mots monosyllabiques. Pour cette catégorie de mots, on observe un désavantage des mots de 6 lettres par rapport aux mots de 4 et 5 lettres. Ce même désavantage est également présent dans l'expérience 8. Toutefois, tout comme dans l'expérience 8, il n'existe pas de différence marquée entre mots de 4 et 5 lettres. Sans pour autant interpréter cet effet nul, il reste que ces données sont en accord avec le point de vue selon lequel les mots monosyllabiques de 4 et 5 lettres forment ensemble une population de mots homogène.

## 9.4. Discussion

Avec les trois expériences (7, 8 et 9) présentées ici, nous réalisons un travail préliminaire sur la question des rapports entre orthographe et phonologie lors la reconnaissance visuelle des mots polysyllabiques. En effet, les mots polysyllabiques semblent soulever un grand nombre de questions quant au passage de l'orthographe à la phonologie. Lire un mot dissyllabique, par exemple, suppose de retrouver non seulement la bonne séquence de phonèmes à partir de la séquence de lettres (tout comme pour les mots monosyllabiques) mais aussi de grouper certains phonèmes pour former l'unité plus large qu'est la syllabe. C'est en effectuant le groupement adéquat de ces phonèmes que l'on est en mesure de retrouver la bonne prononciation d'un mot polysyllabique. Ainsi, sur le plan du transcodage ortho-phonologique, on retrouve ici un problème de segmentation se situant, cette fois, au niveau des unités syllabes.

Si on prend l'exemple du mot ANIMAL, ce mot se segmente au niveau phonologique de la manière suivante : /a-ni-mal/. On peut de ce fait faire l'hypothèse que la représentation phonologique de ce mot est, elle aussi, segmentée de cette manière et non pas en /an-im-al/, par exemple. La question est donc de savoir comment le système de lecture parvient à réaliser ce regroupement fonctionnel.

A cette question, vient s'ajouter un autre problème qui est celui du conflit possible entre unités syllabes et unités graphèmes. Considérons, par exemple, le mot ANANAS. Du point de vue du transfert ortho-phonologique, la segmentation fonctionnelle ici (i.e., permettant de retrouver la bonne prononciation de ce mot) est une segmentation syllabique : A-NA-NAS. Pourtant, une autre segmentation, au niveau graphémique, est tout aussi possible mais ne donne pas cette fois la prononciation correcte : AN-AN-AS. On voit donc clairement apparaître ici un conflit entre unités syllabes et unités graphèmes. Ce conflit nous rappelle d'ailleurs le conflit évoqué au chapitre 6 entre unités graphèmes et unités lettres. Il se dessine ainsi ce que l'on peut appeler une hiérarchie de conflits entre différentes unités sous-lexicales : les lettres, puis les graphèmes, puis les syllabes, puis sans doute peut-on étendre cette liste jusqu'aux morphèmes pour finalement parvenir aux mots. On peut alors se demander si la solution proposée pour résoudre le conflit lettres/graphèmes pour les mots monosyllabiques (i.e., le FUM) peut également être valable pour le conflit graphèmes/syllabes et résoudre par la même occasion, le problème de la segmentation des mots polysyllabiques. Cette question reste ouverte et constitue clairement une perspective de recherche importante.

## Chapitre 10

# Conclusion

*« La grandeur de l'homme, c'est qu'il est un pont et non une fin : ce qu'on peut aimer chez l'homme, c'est qu'il est transition et chute ».*

*Friedrich Nietzsche*

Lire un mot écrit conduit à activer automatiquement et rapidement le code phonologique qui lui correspond. Orthographe et phonologie apparaissent donc comme intimement liées au cours de la perception des mots écrits. L'objectif de travail était de spécifier la nature de ce lien et de mieux comprendre comment le système de lecture traduit une séquence de lettres en une séquence phonologique.

Le principal résultat de nos expériences est que le temps d'identification d'un mot est dépendant de sa structure phonologique. Ce résultat conforte, dans un premier temps, l'idée que l'information phonologique participe activement à la perception visuelle d'un mot. Les propriétés phonologiques des mots semblent ainsi conditionner la structure et la dynamique de leur perception visuelle. Elles imposent une certaine organisation fonctionnelle des informations orthographiques, organisation dont le degré de complexité varie d'un mot à l'autre.

Les manipulations de la structure phonologique que nous avons effectuées et les variations des temps d'identification que nous avons observées nous renseignent, dans un deuxième temps, sur le format du lien ortho-phonologique. Nous avons notamment montré que l'identification des mots monosyllabiques semble être rapide lorsque leur organisation ortho-phonologique est simple et directe. En revanche, leur identification semble être ralentie lorsque leur organisation ortho-phonologique est plus complexe et demande de regrouper certaines lettres en graphèmes. Nous avons ainsi montré que les unités graphèmes, pour les mots monosyllabiques, semblent jouer précisément le rôle de lien ou de "pont fonctionnel" entre orthographe et phonologie. Ces unités graphèmes supplantent en quelque sorte les unités lettres au sein du système de lecture pour acquérir un statut d'unité perceptive orthographique.

En ce sens, le rôle de la phonologie pour la lecture est de structurer les informations orthographiques. La phonologie vient ainsi modeler l'orthographe et les unités orthographiques sont, dans un tel contexte, le reflet des unités phonologiques (Treiman, 1994).

Nous avons formalisé cette idée en développant un modèle computationnel de la perception des mots écrits basé sur la notion d'unité orthographique fonctionnelle. Ce modèle postule l'existence d'unités orthographiques au sein du système de lecture, unités se situant à l'interface entre orthographe et phonologie. L'établissement de ces unités, au cours de l'acquisition de la lecture, dépend des associations récurrentes entre certaines formes orthographiques et certaines formes phonologiques. Ces unités constituent ainsi le lieu du couplage ortho-phonologique.

### **10.1. Les unités de la lecture**

Dans l'implémentation de ce modèle, proposée au chapitre 7, le niveau des unités orthographiques fonctionnelles est uniquement composé de graphèmes. Plusieurs études en Anglais et en Français suggèrent toutefois que d'autres types d'unités auraient un statut particulier au sein du système de lecture (cf. Chap. 3, sur les unités syllabiques et sous-syllabiques). Ces unités, tout comme les graphèmes, joueraient un rôle fonctionnel dans les relations ortho-phonologiques. Plusieurs développements du présent modèle, incluant d'autres types d'unités orthographiques (les onsets et les rimes orthographiques, par exemple), peuvent être envisagés. La notion d'unité orthographique fonctionnelle est alors élargie à des groupements orthographiques correspondant à des groupements d'unités phonologiques. La stabilité de telles unités dépend de la fréquence d'occurrence des associations ortho-phonologiques dont elles sont le support.

Plus généralement, ce modèle rejoint celui de Laberge et Samuel (1974), modèle qui postule différents niveaux de représentations orthographiques entre le niveau des lettres et celui des mots. Ces auteurs proposent que ces différents niveaux prendraient place au cours de l'acquisition de la lecture, permettant ainsi d'augmenter le traitement parallèle d'une séquence de lettres. Alors qu'un jeune lecteur effectue un décodage sériel sur des petits groupes de lettres, un lecteur adulte, lui, est en mesure de placer son analyse à un niveau plus global. Les unités orthographiques accentuent un traitement rapide et parallèle des mots. Seulement, alors que Laberge et Samuel (1974) envisagent un système de type hiérarchique, nous proposons

plutôt un système où ces unités prennent place à un même niveau des unités orthographiques fonctionnelles.

## 10.2. Unités perceptives et acquisition de la lecture

Quelles implications pour l'acquisition de la lecture pouvons-nous déduire du modèle que nous proposons ? L'idée centrale de cette modélisation est l'établissement, au cours de l'apprentissage de la lecture, d'unités orthographiques fonctionnelles de plus en plus larges (des graphèmes jusqu'aux mots). Notre hypothèse est que la lecture devient fonctionnelle, rapide et automatisée lorsque l'on traite les mots à des niveaux de plus en plus intégrés.

Par exemple, l'identification des mots courts et fréquents se fait en l'absence de tout recodage ortho-phonologique de bas niveau, sur la base d'un recodage basé directement sur le mot dans son ensemble. Le mot est alors traité par le système de lecture comme un tout. En revanche, l'identification de mots moins fréquents, dont la combinaison ortho-phonologique n'a pas été traitée par le système de lecture un grand nombre de fois, est basée sur un recodage sous-lexical et des unités orthographiques fonctionnelles plus élémentaires.

L'établissement de telles unités lexicales et sous-lexicales pour un enfant suppose ainsi deux conditions nécessaires :

1) une bonne sensibilité phonologique qui favorise la différenciation des différents sons et groupes de sons du langage oral. Cette bonne segmentation phonologique facilite ensuite les associations entre unités phonologiques et unités visuelles qui leur correspondent (Bradley & Bryant, 1978 ; Content, Morais, Alegria, & Bertelson, 1986 ; Stanovich, 1986, 1987, 1988 ; Tallal, 1980 ; Tallal, Miller, Bedi, Byma, Wang, Nagarajan, Schreiner, Jenkins, & Merzenich, 1996). Ces associations récurrentes conduisent ainsi à la formation des unités orthographiques fonctionnelles<sup>17</sup>.

2) une capacité à traiter, à associer et à mémoriser des unités de plus en plus larges. Cette capacité dépend de l'acquisition d'unités plus élémentaires et de la stabilité de cette acquisition mais, également, de la vitesse et de l'efficacité du traitement visuel (Lagerge & Samuel, 1974).

Le niveau de lecture d'un enfant peut ainsi dépendre du niveau auquel il traite les mots et, donc, du type d'unités dont il dispose. Cette hypothèse peut être formalisée au sein du modèle

---

<sup>17</sup> Ces associations phono-visuelles permettent par la même occasion de stabiliser ou d'accentuer les segmentations phonologiques, affinant ainsi la sensibilité phonologique.

computationnel que nous avons présenté et être testée expérimentalement. En effet, l'une des forces de ces modèles est de pouvoir fournir des descriptions du système de lecture d'individus (Ziegler, Rey, & Jacobs, 1998). Il est alors possible d'obtenir des prédictions comportementales de ces modélisations individualisées et de comparer ces prédictions aux résultats d'expériences réalisées avec des enfants (e.g., Aghababian, 1998) ; cette approche différentielle permet une description individualisée du système de lecture de chaque enfant.

### **10.3. Les mots dissyllabiques**

Nous ne lisons malheureusement pas que des mots monosyllabiques. Aussi, la question du transcodage ortho-phonologique doit-elle être généralisée à l'ensemble des mots, dont les mots polysyllabiques. Nous avons présenté ici un premier pas dans cette direction en considérant le cas des mots dissyllabiques. Les études préliminaires que nous avons rapportées au chapitre 9 montrent également des différences dans les temps d'identification de mots mono- et dissyllabiques. Il apparaît que le traitement des mots polysyllabiques pose d'autres problèmes au système de lecture.

La modélisation du transcodage ortho-phonologique des mots polysyllabiques constitue donc clairement l'une des perspectives de recherche du présent travail. Il s'agit notamment de voir dans quelle mesure l'hypothèse des unités orthographiques fonctionnelles peut s'appliquer à cette catégorie de mots. Comme nous l'avons vu, une segmentation graphémique est problématique pour certains mots (i.e., ANANAS) qui nécessitent plutôt une segmentation syllabique. Une solution à ce conflit serait certainement d'inclure des unités syllabiques au niveau des unités orthographiques fonctionnelles. Cette hypothèse reste à tester, tant au niveau expérimental qu'au niveau computationnel.

### **10.4. Modèles computationnels et tests empiriques**

Avec l'étude de Spieler et Balota (1997), l'élaboration et l'évaluation des modèles computationnels rentrent dans une nouvelle aire. Ces modèles, bien que proposant des descriptions détaillées et des simulations quantitatives, ne sont testés jusqu'à maintenant que sur des données empiriques qualitatives. Leur objectif est de reproduire des tendances comportementales et de simuler les effets de certaines variables sur les performances de sujets. En proposant de

tester les prédictions des modèles au niveau des mots, on demande alors à ces modèles d'accentuer la précision de leurs prédictions.

Plusieurs difficultés persistent toutefois tant sur le plan théorique que sur le plan empirique. Sur le plan théorique, ces modèles restent encore limités par rapport aux dimensions linguistiques qu'ils intègrent. Leurs descriptions ne s'appliquent pas aux dimensions sémantiques des mots, par exemple, ou encore aux processus visuels de bas niveau (Seidenberg & Plaut, 1998). Sur le plan empirique, la question de la robustesse et de la réplicabilité des mesures reste posée. Néanmoins, cette approche demeure extrêmement intéressante car elle entraîne à la fois les études empiriques et les modélisations théoriques vers une analyse encore plus détaillée des processus de perception des mots écrits.

## 10.5. Modèles computationnels et neurolinguistiques

Les modèles computationnels fournissent des descriptions fonctionnelles précises et dynamiques des systèmes cognitifs. Dans le cas du système de lecture, ces modèles sont des outils théoriques puissants permettant de décrire les interactions multiples entre les différentes composantes linguistiques d'un mot lors de son identification. Ils participent à la réalisation d'une anatomie fonctionnelle du système de lecture.

Par ailleurs, un nombre croissant d'études utilisant des techniques de neuro-imagerie (i.e., potentiels évoqués cognitifs (PEC), tomographie par émission de positrons (TEP), imagerie par résonance magnétique nucléaire (RMN)) tentent de préciser la structure et la dynamique du traitement des mots écrits d'un point de vue anatomo-fonctionnel (Démonet, Chollet, Ramsay, Cardebat, Nespoulous, Wise, Rascol & Frackowiak, 1992 ; Howard, Patterson, Wise, Brown, Friston, Weiller, & Frackowiak, 1992 ; Paulesu, Frith, & Frackowiak, 1993 ; Petersen, Fox, Posner, Mintum, & Raichle, 1989 ; Pugh, Shaywitz, Shaywitz, Constable, Skudlarski, Fulbright, Bronen, Shankweiler, Katz, Fletcher, & Gore, 1996).

Ces deux approches sont évidemment amenées à se rencontrer et à s'enrichir mutuellement (Jacobs & Carr, 1995). Les modèles computationnels permettent de définir le domaine de performance du système de lecture en analysant les performances de sujets dans des protocoles expérimentaux précis. Ces analyses psycholinguistiques semblent manquer à un grand nombre d'études en imagerie cérébrale qui aboutissent à des résultats inconsistants (d'après

l'analyse de Poeppel, 1996). En couplant les prédictions et les analyses de ces modèles aux études de neuro-imagerie, on pourra à la fois mieux contraindre les interprétations des données d'imagerie et, en retour, apporter de nouvelles contraintes pour l'élaboration des modèles de la lecture.

## Bibliographie

Aaronson, D., & Ferres, S. (1983). A model for coding lexical categories during reading. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 9, 700-725.

- Aderman, D., & Smith, E. E. (1971). Expectancy as a determinant of functional units in perceptual recognition. *Cognitive Psychology*, 2, 117-129.
- Aghababian, V. (1998). Acquisition de la lecture : Aspects développementaux et neuropsychologiques. Thèse de Doctorat de l'Université de Provence.
- Aghababian, V., & Nazir, T. (soumis). Developing normal reading skills : Visual aspects.
- Andrews, S. (1982). Phonological recoding : Is the regularity effect consistent? *Memory and Cognition*, 10, 565-575.
- Andrews, S. (1989). Frequency and neighborhood size effects on lexical access : Activation or search? *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 15, 802-814.
- Andrews, S. (1992). Frequency and neighborhood effects on lexical access : Lexical similarity or orthographic redundancy? *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 18, 234-254.
- Antis, S. M. (1974). A chart demonstrating variations in acuity with retinal position. *Vision Research*, 14, 589-592.
- Appelman, I. B., & Mayzner, M.S. (1982). Application of geometric models to letter recognition : Distance and density. *Journal of Experimental Psychology : General*, 111, 60-100.
- Atkinson, R. C., & Juola, J. F. (1973). Factors influencing speed and accuracy of word recognition. In S. Kornblum (Ed.), *Attention and Performance IV*. New York : Academic Press, pp. 583-612.
- Baayen, R. H., Dijkstra, T., & Schreuder, R. (1997). Singulars and plurals in Dutch : Evidence for a parallel dual-route model. *Journal of Memory and Language*, 37, 94-117.
- Baayen, R. H., Piepenbrock, R., & van Rijn, H. (1993). *The CELEX Lexical Database (CD-ROM)*. Linguistic Data Consortium, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.
- Babin, J. P. (1996). Derivational morphology and lexical access : prefixed and pseudo-prefixed verbs. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 50, 371-385.
- Bachelard, G. (1927). *Essai sur la connaissance approchée*. Paris : Editions Vrin.
- Backman, J., Bruck, M., Hébert, M., & Seidenberg, M. S. (1984). Acquisition and use of spelling-sound information in reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38, 114-133.
- Balota, D. A., & Chumbley, J. I. (1984). Are lexical decisions a good measure of lexical access ? The role of word frequency in the neglected decision stage. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 10, 340-357.
- Balota, D. A., & Chumbley, J. I. (1985). The locus of word-frequency effects in the pronunciation task : Lexical access and/or production frequency ? *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 24, 89-106.
- Baron, J. (1973). Phonemic stage not necessary for reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 25, 241-246.
- Baron, J., & Strawson, C. (1976). Use of orthographic and word-specific knowledge in reading words aloud. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 2, 386-393.
- Baron, J., & Thurston, C. (1973). An analysis of the word superiority effect. *Cognitive Psychology*, 4, 207-228.
- Beauvois, M. F., & Derouesne, J. (1979). Phonological dyslexia : Three dissociations. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 42, 1115-1124.
- Becker, C. A. (1976). Allocation of attention during visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 2, 556-566.
- Becker, C. A. (1980). Semantic context effect in visual word recognition : An analysis of semantic strategies. *Memory & Cognition*, 8, 493-512.

- Berent, I. (1997). Phonological priming in the lexical decision task : regularity effects are not necessary evidence for assembly. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 23, 1727-1742.
- Berent, I., & Perfetti, C. A. (1995). A rose is a reez : The two-cycles model of phonology assembly in reading English. *Psychological Review*, 102, 146-184.
- Berent, I., & Shimron, J. (1997). The representation of Hebrew words : evidence from the obligatory contour principle. *Cognition*, 64, 39-72.
- Berndt, R. S., Lynne D'Autrechy, C., & Reggia, J. A. (1994). Functional pronunciation units in English words. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 20, 977-991.
- Berndt, R., Reggia, J., & Mitchum, C. (1987). Empirically-derived probabilities for grapheme-to-phoneme correspondences in English. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 19, 1-19.
- Besner, D., Davelaar, E., Alcott, D., & Parry, P. (1984). Wholistic reading of alphabetic print : Evidence from the FDM and the FBI. In L. Henderson (Ed.), *Orthographies and reading : Perspectives from cognitive psychology, neuropsychology, and linguistics* (pp. 121-135). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Besner, D., Dennis, I., & Davelaar, E. (1985). Reading without phonology ? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 39A, 85-94.
- Besner, D., Twilley, L., McCann, R. S., & Seergobin, K. (1990). On the connection between connectionism and data : Are a few words necessary? *Psychological Review*, 97, 432-446.
- Biederman, G. B. (1966). The recognition of tachistoscopically presented five-letter words as a function of digram frequency. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 5, 208-209.
- Bosman, A., M., & de Groot, A. M. (1996). Phonologic mediation is fundamental to reading : evidence from beginning readers. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, A, 49, 715-744.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226, 177-178.
- Bouma, H. (1971). Visual recognition of isolated lower-case letters. *Vision Research*, 11, 459-474.
- Bouma, H. (1973). Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Research*, 13, 767-782.
- Bouma, H., & Legein, Ch. P. (1977). Foveal and parafoveal recognition of letters and words by dyslexics and by average readers. *Neuropsychologia*, 15, 69-80.
- Bovens, N., & Brysbaert, M. (1990). IBM PC/XT AT and PS/2 Turbo Pascal timing with extended resolution. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 22, 332-334.
- Bower, T. G. R. (1970). Reading by eye. In H. Levin & J. P. Williams (Eds.), *Basic studies on reading* (pp. 134-146). New York : Basic Books.
- Bowey, J. A., 1990. Orthographic onsets and rimes as functional units of reading. *Memory and Cognition* 18, 419-427.
- Bowey, J. A., 1993. Orthographic rime priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 46A, 247-271.
- Bradley, L., & Bryant, P. (1978). Difficulties in auditory organization as a possible cause of reading backwards. *Nature*, 271, 746-747.
- Broadbent, D. E., & Gregory, G. M. (1968). Visual perception of words differing in letter digram frequency. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 7, 569-571.
- Browman, C. P., & Goldstein, L. (1986). Towards an articulatory phonology. *Phonology Yearbook*, 3, 219-252.
- Brown, G. D. A. (1987). Resolving inconsistency : A computational model of word naming. *Journal of Memory and Language*, 26, 1-23.

- Brysbart, M., Vitu, F., & Schroyens, W. (1996). The right visual field advantage and the optimal viewing position effect : On the relation between foveal and parafoveal word recognition. *Neuropsychology*, 10, 385-395.
- Butler, B., & Hains, S. (1979). Individual differences in word recognition latency. *Memory & Cognition*, 7, 68-76.
- Carello, C., Turvey, M. T., & Lukatela, G. (1992). Can theories of word recognition remain stubbornly nonphonological? In R. Frost, & L. Katz (Eds.), *Orthography, phonology, morphology, and meaning* (pp. 211-266). Amsterdam : North-Holland.
- Carr, T., Davidson, B. J., & Hawkins, H. L. (1978). Perceptual flexibility in word recognition : Strategies affect orthographic computation but not lexical access. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 4, 674-690.
- Carr, T. H., & Pollatsek, A. (1985). Recognizing printed words : A look at current models. In D. Besner, T. G. Waller, & G. E. MacKinnon (Eds.), *Reading research : Advances in theory and practice 5* (pp. 1-82). Orlando, FL : Academic Press.
- Carreiras, M., Alvarez, C. J., & De Vega, M. (1993). Syllable frequency and visual word recognition in Spanish. *Journal of Memory and Language*, 32, 766-780.
- Carreiras, M., Perea, M., & Grainger, J. (1997). Effects of Orthographic neighborhood in visual word recognition : Cross-task comparison. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition* 23, 857-871.
- Carver, R. P. (1972). Speed readers don't read ; They skim. *Psychology Today*, 6, 22-30.
- Cattell, J. M. (1886). The time taken up by cerebral operations. *Mind*, 11, 220-242.
- Clark, A., & Thornton, C. (1997). Trading spaces : Computation, representation, and the limits of uninformed learning. *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 57-65.
- Clark, H. C. (1973). The language-as-fixed-effect fallacy : A critique of language statistics in psychological research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 335-359.
- Clements, G. N. (1985). The geometry of phonological features. *Phonology*, 2, 225-252.
- Colé, P., Segui, J., & Taft, M. (1997). Words and morphemes as units for lexical access. *Journal of Memory and Language*, 37, 312-330.
- Collyer, C. E. (1985). Comparing strong and weak models by fitting them to computer-generated data. *Perception and Psychophysics*, 38, 476-481.
- Coltheart, M. (1978). Lexical access in simple reading tasks. In G. Underwood (Ed.), *Strategies of Information Processing*. London : Academic Press.
- 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 S. Dornic (Ed.), *Attention and Performance VI*. London : Academic Press.
- Coltheart, V., & Leahy, J. (1992). Children's and adult's reading of nonwords : Effects of regularity and consistency. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 18, 718-729.
- Coltheart, V., Patterson, K., & Leahy, J. (1994). When a ROWS is a ROSE : Phonological effects in written word comprehension. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47A, 917-955.
- Connine, C. M., Mullenix, J., Chernov, E., & Yelen, J. (1992). Word familiarity and frequency in visual and auditory word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 16, 1084-1096.
- Content, A. (1991). The effect of spelling-to-sound regularity on naming in French. *Psychological Research*, 53, 3-12.

- Content, A., Morais, J., Alegria, J., & Bertelson, P. (1986). Acquisition de la lecture et analyse segmentale de la parole. *Psychologica Belgica*, 21, 1-15.
- Content, A., Mousty, P., Radeau, M. (1990). BRULEX : Une base de données lexicales informatisée pour le Français écrit et parlé. *Année Psychologique*, 90, 551-566.
- Content, A., & Peereman, R. (1992). Single and multiple process models of print to speech conversion. In J. Alegria, D. Holender, J. Morais, & M. Radeau (Eds.), *Analytic approaches to human cognition* (pp. 351-375). Amsterdam : North Holland.
- Corcoran, D. W. J. (1966). An acoustic factor in letter cancelation. *Nature*, 210, 658.
- Dell, G. S. (1986). A spreading activation theory of retrieval in sentence production. *Psychological Review*, 93, 405-434.
- Delosh, E. L., Busemeyer, J. R., & McDaniel, M. A. (1997). Extrapolation : The Sine Qua Non for abstraction in function learning. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 23, 968-986.
- Démonet, J.-F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J.-L., Wise, R., Rascol, A., & Frackowiak, R. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115, 1753-1768.
- Descola, P. (1993). *Les lances du crépuscule*. Editions Plon, Paris.
- Deutsch, A., Frost, R., & Forster, K. I. (1998). Verbs and nouns are organized and accessed differently in the mental lexicon : evidence from Hebrew. *Journal of Experimental Psychology : Learning Memory and Cognition*, 24, 1238-1255.
- Dorfman, D., & Glanzer, M. (1988). List composition effects in lexical decision and recognition memory. *Journal of Memory and Language*, 27, 633-648.
- Drewnowski, A., & Healy, A. F. (1977). Detection errors on *the* and *and* : Evidence for reading units larger than the word. *Memory and Cognition*, 5, 154-168.
- Drews, E., & Zwitserlood, P. (1995). Morphological and orthographic similarity in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21, 1098-1116.
- Dzhafarof, E. N. (1993). Grice-representability of response time distribution families. *Psychometrika*, 58, 281-314.
- Eco, U. (1973). *Segno*. Editions Idedi, Milan. (pour la traduction française, 1988, Editions Labor, Bruxelles)
- Eriksen, C. W., Pollack, M. D., & Montague, W. E. (1970). Implicit speech : Mechanism in perceptual coding ? *Journal of Experimental Psychology*, 84, 502-507.
- Etiemble (1973). *L'écriture*. Paris : Gallimard.
- Evett, L. J., & Humphreys, G. W. (1981). The use of abstract graphemic information in lexical access. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 33, 325-350.
- Feldman, L. B., & Bentin, S. Q. (1994). Morphological analysis of disrupted morphemes : evidence from Hebrew. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47A, 407-435.
- Ferrand, L. (1995). Evaluation du rôle de l'information phonologique dans l'identification des mots écrits. *L'Année Psychologique*, 95, 293-315.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1992). Phonology and orthography in visual word recognition : evidence from masked nonword priming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 33A, 325-350.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1993). The time-course of orthographic and phonological code activation in the early phases of visual word recognition. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 31, 119-122.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1994). Effects of orthography are independent of phonology in masked form priming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47A, 365-382.

- Ferrand, L., Segui, J., & Grainger, J. (1996). Masked priming of word and picture naming : The role of syllabic units. *Journal of Memory and Language*.
- Ferrand, L., Segui, J., & Humphreys, G. W. (1996). The syllable's role in word naming. *Memory & Cognition*, in press.
- Feustel, T. L., Shiffrin, R. M., & Salasoo, A. (1983). Episodic and lexical contributions to the repetition effect in word identification. *Journal of Experimental Psychology : General*, 112, 309-346.
- Février, J. G. (1995). *Histoire de l'écriture*. Paris : Payot.
- Fisher, D. F., Monty, R. A., & Glucksberg, S. (1969). Visual confusion matrices : Fact or artifact ? *Journal of Psychology*, 71, 111-125.
- Forster, K. I. (1976). Accessing the mental lexicon. In R. J. Wales & E. W. Walker (Eds.), *New approaches to language mechanisms*. Amsterdam : North-Holland, pp. 257-287.
- Forster, K. I. (1987). Form priming with masked primes : The best match hypothesis. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and Performance XII : The psychology of reading* (pp. 127-146). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Forster, K. I., & Chambers, S. M. (1973). Lexical access and naming time. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 627-635.
- Forster, K. I., & Davis, C. (1984). Repetition priming and frequency attenuation in lexical access. *Journal of Experimental Psychology : Learning Memory and Cognition*, 10, 680-698.
- Forster, K. I., & Davis, C. (1991). The density constraint on form-priming in the naming task : Interference effects from a masked prime. *Journal of Memory and Language*, 30, 1-25.
- Forster, K. I., & Davis, C., Schoknecht, C., & Carter, R. (1987). Masked priming with graphemically related forms : Repetition or partial activation ? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 39A, 211-251.
- Forster, K. I., & Shen, D. J. (1996). No enemies in the neighborhood : absence of inhibitory neighborhood effects in lexical decision and semantic categorization. *Journal of Experimental Psychology : Learning Memory and Cognition*, 22, 696-713.
- Fowler, C., Napps, S. E., & Feldman, L. (1985). Relations among regular and irregular morphologically related words in the lexicon as revealed by repetition priming. *Memory & Cognition*, 13, 241-255.
- Fraisse, P., & Piaget, J. (1981). *Traité de psychologie expérimentale*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Frauenfelder, U. H., Baayen, R. H., Hellwig, F. M., & Schreuder, R. (1993). Neighborhood density and frequency across languages and modalities. *Journal of Memory and Language*, 32, 781-804.
- Frederiksen, J. R., & Kroll, J. F. (1976). Spelling and sound : Approaches to the internal lexicon. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 2, 361-379.
- Frost, R. (1994). Prelexical and postlexical strategies in reading : Evidence from a deep and a shallow orthography. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 21, 398-408.
- Frost, R. (1998). toward a strong phonological theory of visual word recognition : True issues and false trails. *Psychological Bulletin*, 123, 71-99.
- Frost, R., Forster, K. I., & Deutsch, A. (1997). What can we learn from the morphology of Hebrew? A masked-priming investigation of morphological representation. *Journal of Experimental Psychology : Learning Memory and Cognition*, 23, 829-56.
- Frost, R., Katz, L., & Bentin, S. (1987). Strategies for visual word comparison and orthographic depth : A multilingual comparison. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 13, 104-115.
- Fudge, E. C. (1969). Syllables. *Journal of Linguistics*, 5, 253-286.

- Funnel, E. (1983). Phonological processes in reading : New evidence from acquired dyslexia. *British Journal of Psychology*, 74, 159-180.
- Gatuso, B., Smith, L. B., & Treiman, R. (1991). Classifying by dimensions and reading : A comparison of the auditory and visual modalities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 51, 139-169.
- Gernsbacher, M. A. (1984). Resolving 20 years of inconsistent interactions between lexical familiarity and orthography, concreteness, and polysemy. *Journal of Experimental Psychology : General*, 113, 256-281.
- Geyer, L. H. (1977). Recognition and confusion of lowercase alphabet. *Perception & Psychophysics*, 22, 487-490.
- Gibson, E. J. (1965). Learning to read. *Science*, 148, 1066-1072.
- Gibson, E. J., Pick, A. D., Osler, H., & Hammond, M., 1962. The role of grapheme-phoneme correspondence in the perception of words. *American Journal of Psychology* 75, 554-570.
- Gilmore, G. C., Hersh, H., Caramazza, A., & Griffin, J. (1979). Multidimensional letter similarity derived from recognition errors. *Perception & Psychophysics*, 25, 425-431.
- Glanzer, M., & Ehrenreich, S. L. (1979). Structure and search of the internal lexicon. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 18, 381-398.
- Glushko, R. J. (1979). The organization and activation of orthographic knowledge in reading aloud. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 5, 674-691.
- Goldsmith, J. (1976). An overview of autosegmental phonology. *Linguistic Analysis*, 2, 23-68.
- Goldsmith, J. (1990). *Autosegmental and metrical phonology*. Oxford, England : Basil Blackwell.
- Goodman, K. S. (1969). Analysis of reading miscues : Applied psycholinguistics. *Reading Research Quarterly*, 5, 9-30.
- Gordon, B. (1983). Lexical access and lexical decision : Mechanisms of frequency sensitivity. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 22, 24-44.
- Gordon, B. (1985). Subjective frequency and the lexical decision latency function : Implications for mechanisms of lexical access. *Journal of Memory and Language*, 24, 631-654.
- Gough, P. B. (1972). One second of reading. In J. P. Kavanagh & I. G. Mattingly (Eds.), *Language by eye and by ear* (pp. 331-358). Cambridge, MA : M.I.T. Press.
- Gough, P. B., & Cosky, M. J. (1977). One second of reading again. In N. J. Castellan, D. B. Pisoni, & G. R. Potts (Eds.), *Cognitive theory* (Vol. 2). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Grainger, J. (1990). Word frequency and neighborhood frequency effects in lexical decision and naming. *Journal of Memory & Language*, 29, 228-244.
- Grainger, J., Colé, P., & Segui, J. (1991). Masked morphological priming in visual word recognition. *Journal of Memory and Language*, 30, 370-384.
- Grainger, J., & Ferrand, L. (1994). Phonology and orthography in visual word recognition : Effects of masked homophone primes. *Journal of Memory and Language*, 33, 218-233.
- Grainger, J., & Ferrand, L. (1996). Masked orthographic and phonological priming in visual word recognition and naming : Cross-task comparisons. *Journal of Memory and Language*.
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1993). Masked partial-word priming in visual word recognition : Effect of positional letter frequency. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 19, 951-964.
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1994). A dual-read out model of word context effects in letter perception : Further investigations of the word superiority effect. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20, 1158-1176.

- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1996). Orthographic processing in visual word recognition : A multiple read-out model. *Psychological Review*, 103, 518-565.
- Grainger, J., & Jacobs, A. (1998). On localist connectionism and psychological science. In Grainger, J. & Jacobs, A. M. (Eds.) *Symbolic connectionist approaches to human cognition*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, pp. 1-38.
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (sous presse). Temporal integration of information in orthographic priming. *Visual Cognition*.
- Grainger, J., O'Regan, J. K., Jacobs, A. M. & Segui, J. (1989). On the role of competing word units in visual word recognition : The neighborhood frequency effect. *Perception & Psychophysics*, 45, 189-195.
- Grainger, J., O'Regan, J. K., Jacobs, A. M., & Segui, J. (1992). Neighborhood frequency effects and letter visibility in visual word recognition. *Perception & Psychophysics*, 51, 49-56.
- Grainger, J., & Segui, J. (1990). Neighborhood frequency effects in visual word recognition : A comparison of lexical decision and masked identification latencies. *Perception & Psychophysics*, 47, 191-198.
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York : Wiley.
- Grice, G. R. (1968). Stimulus intensity and response evocation. *Psychological Review*, 75, 359-373.
- Grice, G. R., Nullmeyer, R., & Spiker, V. A. (1982). Human reaction time : Toward a general theory. *Journal of Experimental Psychology : General*, 111, 135-153.
- Haber, R., N., & Hershenson, M. (1965). Effect of repeated brief exposures on the growth of a percept. *Journal of Experimental Psychology*, 69, 40-46.
- Hanna, P. R., Hanna, J. S., Hodges, R. E., Ruderf, E. H. (1966). *Phoneme-grapheme correspondances as cues to spelling improvement*. Washington, DC : US Government Printing Office.
- Hansen, D., & Rodgers, T. S. (1965). An exploration of psycholinguistic units in initial reading. In *Proceedings of the Symposium on the Psycholinguistic Nature of the Reading Process*. Detroit : Wayne State University.
- Healy, A.F. (1994). Letter detection : A window to unitization and other cognitive processes. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1, 333-344.
- Heathcote, A., Popiel, S. J., & Mewhort, D. J. K. (1991). Analysis of response time distributions : An example using the stroop task. *Psychological Bulletin*, 109, 340-347.
- van der Heijden, A. H. C., Malhas, M. S. M., & van der Roovaart, B. P. (1984). An empirical interletter confusion matrix for continuous-line capitals. *Perception & Psychophysics*, 35, 85-88.
- Henderson, L. (1982). *Orthography and word recognition in reading*. London : Academic Press.
- Henderson, L. (1985). On the use of the term "grapheme". *Language and Cognitive Processes*, 1, 135-148.
- Hockley, W. E. (1984). Analysis of response time distributions in the study of cognitive processes. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 6, 598-615.
- Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, D. W., Friston, K., Weiller, C., Frackowiak, R. (1992). The cortical localization of the lexicons. *Brain*, 115, 1769-1782.
- Howes, D. H., & Solomon, R. L. (1951). Visual duration thresholds as a function of word probability. *Journal of Experimental Psychology*, 41, 401-410.
- Hudson, P. T. W., & Bergman, M. W. (1985). Lexical knowledge in word recognition : Word length and word frequency in naming and lexical decision tasks. *Journal of Memory and Language*, 24, 46-58.
- Huey, E. B. (1908). *The psychology and pedagogy of reading*. New York : Macmillan Press.
- Humphreys, G. W., & Evett, L. J. (1985). Are there independent lexical and nonlexical routes in word processing? An evaluation of the dual-route theory of reading. *Behavioral and Brain Sciences*, 8, 689-740.

- Humphreys, G. W., Evett, L. J., & Quinlan, P. T. (1990). Orthographic processing in visual word identification. *Cognitive Psychology*, 22, 517-560.
- Huntsman, L. A., & Lima, S. D. (1996). Orthographic neighborhood structure and lexical access. *Journal of Psycholinguistic Research*, 25, 417-428.
- Inhoff, A. W., & Topolski, R. (1994). Use of phonological codes during eye fixations in reading and in on-line and delayed naming tasks. *Journal of Memory and Language*, 33, 689-713.
- Israel, G. (1996). *La mathématisation du réel*. Paris : Editions du Seuil.
- Jacobs, A. M. (1994). On computational theories and multilevel, multitask models of cognition : The case of word recognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 670-672.
- Jacobs, A. M., & Carr, T. H. (1995). Mind mappers and cognitive modelers : Toward cross-fertilization. *Behavioral and Brain Sciences*, 18, 362-363.
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1991). Automatic letter priming in an alphabetic decision task. *Perception & Psychophysics*, 49, 43-52.
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1992). Testing a semistochastic variant of the Interactive Activation Model in different word recognition experiments. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 18, 1174-1188.
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1994). Models of visual word recognition : Sampling the state of the art. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20, 1311-1334.
- Jacobs, A. M., Rey, A., Ziegler, J. C., & Grainger, J. (1998). MROM-P : An interactive activation, multiple read-out model of orthographic and phonological processes in visual word recognition. in Grainger, J. & Jacobs, A. M. (Eds.) *Symbolic connectionist approaches to human cognition*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, pp. 147-188.
- Jacoby, L. L., & Dallas, M. (1981). On the relationship between autobiographical memory and perceptual learning. *Journal of Experimental Psychology : General*, 110, 306-340.
- Jakobson, R., Fant, M. & Halle, M., 1952. *Le concept de trait distinctif. Preliminaries to speech analysis*. Cambridge, MA : The M.I.T. Press.
- James, C. T. (1975). The role of semantic information in lexical decision. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 1, 130-136.
- Jared, D. (1997). Spelling-sound consistency affects the naming of high-frequency words. *Journal of Memory & Cognition*, 36, 505-529.
- Jared, D., McRae, K., & Seidenberg, M. S. (1990). The basis of consistency effects in word naming. *Journal of Memory and Language*, 29, 687-715.
- Jared, D., & Seidenberg, M. S. (1990). Naming multisyllabic words. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 16, 92-105.
- Jared, D., & Seidenberg, M. S. (1991). Does word identification proceed from spelling to sound to meaning? *Journal of Experimental Psychology : General*, 120, 358-394.
- Jastrzembski, J. E. (1981). Multiple meanings, number of related meanings, frequency of occurrence, and the lexicon. *Cognitive Psychology*, 13, 278-305.
- Jastrzembski, J. E., & Stanners, R. F. (1975). Multiple word meanings and lexical search speed. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14, 534-537.
- Johnson, N. F., & Pugh, K. R. (1994). A cohort model of visual word recognition. *Cognitive Psychology*, 26, 240-346.
- Katz, L., & Feldman, L. B. (1983). Relation between pronunciation and recognition of printed words in deep and shallow orthographies. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 9, 157-166.

- Kay, J., & Bishop, D. (1987). Anatomical differences between nose, palm, and hand, or, the body in question : Further dissection of the processes of sub-lexical spelling-to-sound translation. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and Performance XII : The psychology of reading* (pp. 449-469). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Kay, J., & Marcel, A. J. (1981). One process, not two, in reading words aloud : Lexical analogies do the work of non-lexical rules. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 33A, 397-413.
- Kelly M. H., Morris J., & Verrekia L. (1998). Orthographic cues to lexical stress : effects on naming and lexical decision. *Memory and Cognition*, 26, 822-832.
- Keren, G., & Bagen, S. (1981). Recognition models of alphanumeric characters. *Perception & Psychophysics*, 29, 234-246.
- Klapp, S. T., Anderson, W. G., & Berrian, R. W. (1973). Implicit speech in reading reconsidered. *Journal of Experimental Psychology*, 100, 368-374.
- Kleiman, G. M. (1975). Speech recoding in reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14, 323-339.
- Kolers, P. A. (1970). Three stages of reading. In H. Levin & J. P. Williams (Eds.), *Basic studies on reading* (pp. 134-146). New York : Basic Books.
- Krumhansl, C. L. (1978). Concerning the applicability of geometric models to similarity data : The interrelationship between similarity and spatial density. *Psychological Review*, 85, 445-463.
- Krumhansl, C. L. (1982). Density versus feature weights as predictors of visual identifications : Comment on Appelman and Mayzner. *Journal of Experimental Psychology : General*, 111, 101-108.
- Kucera, H., & Francis, W. N. (1967). *Computational analysis of present-day American English*. Providence, RI : Brown University Press.
- Laberge, D., & Samuel, S. J. (1974). Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology* 6, 293-323.
- Landauer, T. K. (1962). Rate of implicit speech. *Perceptual and Motor Skills*, 15, 646.
- Landauer, T. K., & Streeter, L. A. (1973). Structural differences between common and rare words : Failure of equivalence assumptions for theories of word recognition. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 119-131.
- Lange, M. (1997). *Spelling-sound regularities in polysyllabic English words and their effects on reading*. Ms. Thesis : Cambridge University.
- Laxon, V. J., Coltheart, M., & Keating, C. (1988). Children find friendly words friendly too : Words with many orthographic neighbors are easier to read and spell. *British Journal of Educational Psychology*, 58, 103-119.
- Laxon, V., Masterson, J., & Coltheart, V. (1991). Some bodies are easier to read : The effect of consistency and regularity on children's reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 43A, 793-824.
- Leroi-Gourhan, A. (1964). *Le geste et la parole - I - Technique et langage*. Editions Albin Michel, Paris.
- Lévi-Strauss, C. (1955). *Tristes tropiques*. Editions Plon, Paris.
- Lieberman, A. M., Ingram, F., Lisker, L., Delattre, P., & Cooper, F. S. (1959). Minimal rules for synthesizing speech. *Journal of the Acoustic Society of America*, 31, 1490-1499.
- Luce, R. D. (1959). *Individual choice behavior*. New York : Wiley.
- Luce, R. D. (1963). Detection and recognition. In R.D. Luce, R.R. Bush, & S.E. Galanter (Eds.), *Handbook of mathematical psychology (Vol.1)*. New York : Wiley.
- Luce, R. D. (1986). *Response times : Their role in inferring elementary mental organisation*. New York : Oxford University Press.

- Lukatela, G., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phonemic, associative, and grammatical context effects with identified and unidentified primes. *Language and Speech*, 33, 1-18.
- Lukatela, G., & Turvey, M. T. (1990a). Automatic and pre-lexical computation of phonology in visual word identification. *European Journal of Cognitive Psychology*, 2, 325-343.
- Lukatela, G., & Turvey, M. T. (1990b). Phonemic similarity effects and prelexical phonology. *Memory and Cognition*, 18, 128-152.
- Mandelblit, N., & Zachar, O. (1998). The notion of dynamic unit : Conceptual developments in cognitive science. *Cognitive Science*, 22, 229-268.
- Manguel, A. (1998). *Une histoire de la lecture*. Editions Actes Sud.
- Marcel, A. J. (1980). Surface dyslexia and beginning reading : A revised hypothesis of the pronunciation of print and its impairments. In M. Coltheart, K. Patterson, J.C. Marshall (Eds.), *Deep dyslexia*. London : Routledge, and Chapman & Hall. (pp. 227-258)
- Marcel, A. J. (1983). Conscious and unconscious perception : Experiments on visual masking and word recognition. *Cognitive Psychology*, 15, 197-237.
- Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco : Freeman.
- Marshall, J. C., & Newcombe, F. (1973). Patterns of paralexia : A psycholinguistic approach. *Journal of Psycholinguistic Research*, 2, 175-199.
- Martin, H.-J. (1988). *Histoire et pouvoirs de l'écrit*. Première édition : Librairie Académique Perrin. Edition au format de poche (1996) : Albin Michel, Paris.
- Martin, R. C. (1982). The pseudohomophone effect : The role of visual similarity in nonword decisions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34A, 395-409.
- Massaro, D. W., & Cohen, M. M. (1994). Visual, orthographic, phonological, and lexical influences in reading. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20, 1107-1128.
- Massaro, D., W., & Klitzke, D. (1979). The role of lateral masking and orthographic structure in letter and word recognition. *Acta Psychologica*, 43, 413-426.
- McCarthy, R., & Warrington, E. K. (1986). Phonological reading : Phenomena and paradoxes. *Cortex*, 22, 359-380.
- McClelland, J. L. (1979). On the time relations of mental processes : An examination of systems of processes in cascade. *Psychological Review*, 86, 287-330.
- McClelland, J. L., & Johnston, J. L. (1977). The role of familiar units in the perception of words and non-words. *Perception and Psychophysics*, 22, 249-261.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception : Part I. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88, 375-407.
- McClusker, L. X., Hillinger, M. L., & Bias, R. C. (1981). Phonological recoding and reading. *Psychological Bulletin*, 88, 217-245.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D., Zola, D., & Jacobs, A. M. (1989). Eye movement control during reading : II. Frequency of refixating a word. *Perception & Psychophysics*, 46, 245-253.
- McNamara, T. P. (1992). Priming and constraints it places on theories of memory and retrieval. *Psychological Review*, 99, 650-662.
- McNamara, T. P. (1994). Theories of priming II : Types of primes. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 20, 507-520.
- McQuade, D. V. (1981). Variable reliance on phonological information in visual word recognition. *Language and Speech*, 24, 99-109.

- Mewhort, D. J. K., & Beal, A. L. (1977). Mechanism of word identification. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 3, 629-640.
- Mewhort, D. J. K., Braun, J. G., & Heathcote, A. (1992). Response time distributions and the stroop task : A test of the Cohen, Dunbar, and McClelland (1990) model. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 18, 872-882.
- Meyer, D. E., Osman, A. M., Irwin, D. E., & Yantis, S. (1988). Modern mental chronometry. *Biological Psychology*, 26, 3-67.
- Meyer, D. E., Schvaneveldt, R. W., & Ruddy, M. G. (1974). Functions of graphemic and phonemic codes in visual word recognition. *Memory and Cognition*, 2, 309-321.
- Millis, M. L. (1986). Syllables and spelling units affect feature integration in words. *Memory and Cognition*, 14, 409-419.
- Millis, M. L., & Button, S. B. (1989). The effect of polysemy on lexical decision time : Now you see it, now you don't. *Memory and Cognition*, 17, 141-147.
- Monsell, S. (1991). The nature and locus of word frequency effects in reading. In D. Besner and G. W. Humphreys (Eds.), *Basic Processes in Reading : Visual Word Recognition* (pp. 148-197). Hillsdale NJ : Erlbaum.
- Monsell, S., Doyle, M., C., & Haggard, P., N. (1989). Effects of frequency on visual word recognition tasks : where are they ? *Journal of Experimental Psychology : General*, 118, 43-71.
- Montant, M. (1998). Les étapes de traitement pré-lexical dans la reconnaissance visuelle des mots : Approche comportementale et neuropsychologique. Thèse de Doctorat de l'Université de Provence.
- Montant, M., Nazir, T., & Poncet, M. (1998). Pure alexia and the viewing position effect in printed words. *Cognitive Psychology*, 15, 93-140.
- Morton, J., & Patterson, K. E. (1980). A new attempt at an interpretation, or, an attempt at a new interpretation. In M. Coltheart, K.E. Patterson, & J.C. Marshall (Eds.), *Deep dyslexia*. London : Routledge & Kegan Paul.
- Mozer, M. C. (1987). Early parallel processing in reading : A connectionist approach. In M. Coltheart (Ed.), *Attention and Performance : Vol 12. The psychology of reading*(pp. 83-104). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Murrell, G. A., & Morton, J. (1974). Word recognition and morphemic structure. *Journal of Experimental Psychology*, 102, 963-968.
- Naish, P. (1980). The effects of graphemic and phonemic similarity between targets and masks in a backward visual masking paradigm. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 57-68.
- Nazir, T. A. (1993). On the relation between the optimal and the preferred viewing position in words during reading. In : G. d'Ydewalle & J. van Rensbergen (eds.), *Perception & Cognition : Advances in eye movement research*, (pp. 349 - 361). Amsterdam : North-Holland.
- Nazir, T. A., Heller, D., & Sußmann, C. (1992). Letter visibility and word recognition : The optimal viewing position in printed words. *Perception and Psychophysics*, 52, 315-328.
- Nazir T. A., Jacobs A. M., & O'Regan J. K. (1998). Letter legibility and visual word recognition. *Memory and Cognition*.
- Neely, J. H. (1991). Semantic priming effects in visual word recognition : A selective review of current findings and theories. In D. Besner & G. W. Humphreys (Eds.), *Basic processes in reading : Visual word recognition* (pp. 264-336). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York : Appleton-Century-Crofts.
- Nietzsche, F. (1883). *Ainsi parlait Zarathoustra*. Traduction et édition au format de poche (1983) : Librairie Générale Française.
- Norris, D. (1994). A quantitative multiple-levels model of reading aloud. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20, 6, 1212-1232.

- Norris, D., & Brown, G. (1985). Race models and analogy theories : A dead heat ? Reply to Seidenberg. *Cognition*, 20, 155-168.
- Nuërk, H. C., Rey, A., Graf, R., & Jacobs, A. M. (soumis). Subcomponent frequency (SCF) : A phonology-based sublexical measure for visual word recognition.
- Olzak, L. A., & Thomas, J. P. (1986). Seeing spatial patterns. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance* (Vol. II, pp. 7 :1-7 :56). New York : Wiley.
- O'Regan, J. K., & Jacobs, A. M. (1992). Optimal viewing position effect in word recognition : a challenge to current theory. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 18, 185-197.
- O'Regan, J. K., Lévy-Schoen, A., Pynte, J., & Brugailière, B. (1984). Convenient fixation location within isolated words of different length and structure. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 10, 250-257.
- Paap, K. R., & Noel, R. W. (1991). Dual-route models of print to sound : Still a good horse race. *Psychological Research*, 53, 13-24.
- Parkin, A. J. (1982). Phonological recoding in lexical decision : Effect of spelling-to-sound regularity depend on how regularity is defined. *Memory & Cognition*, 10, 43-53.
- Parkin, A. J. (1984). Redefining the regularity effect. *Memory & Cognition*, 12, 287-292.
- Parkin, A. J., McMullen, M., & Graystone, D. (1986). Spelling-to-sound regularity affects pronunciation latencies but not lexical decision. *Psychological Research*, 48, 87-92.
- Patterson, K. (1982). The reation between reading and phonological coding : Further neuropsychological observations. In A. Ellis (Ed.), *Normality and pathology in cognitive functions*. New York : Academic Press. (pp. 77-111)
- Patterson, K. E., Marshall, J. C., & Coltheart, M. (1985). Surface dyslexia : Neuropsychological and cognitive studies of phonological reading. Erlbaum : London.
- Patterson, K. E., & Morton, J. (1985). From orthography to phonology : An attempt at an old interpretation. In K. E. Patterson, J. C. Marshall, & M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia : Neuropsychological and cognitive studies of phonological reading* (pp. 15-34). Hove : Erlbaum.
- Paulesu, E., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362, 342-345.
- Pavio, A., & O'Neill, B. J. (1970). Visual recognition thresholds and dimensions of word meaning. *Perception & Psychophysics*, 8, 273-275.
- Perfetti, C. A., & Bell, L. C. (1991). Phonemic activation during the first 40 ms of word identification : Evidence from backward masking and priming. *Journal of Memory and Language*, 30, 473-485.
- Perfetti, C. A., Bell, L. C., & Delaney, S. M. (1988). Automatic (prelexical) phonetic activation in silent reading : Evidence from backward masking. *Journal of Memory and Language*, 27, 59-70.
- Peereman, R., & Content, A. (1995). The neighborhood size effect in naming : lexical activation or sublexical correspondences. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 21, 409-421.
- Peereman, R., & Content, A. (1997). Orthographic and phonological neighborhoods in naming : Not all neighbors are equally influential in orthographic space. *Journal of Memory and Language*, 37, 382-410.
- Peereman, R., Content, A., & Bonin, P. (1998). Is perception a two-way street ? The case of feedback consistency in visual word recognition. *Journal of Memory and Language*, 39, 151-174.
- Pennac, D. (1992). *Comme un roman*. Editions Gallimard.
- Perea, M., & Carreiras, M. (1998). Effects of syllable frequency and syllable neighborhood frequency in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 134-144.

- Perea, M., & Pollatsek, A. (1998). The effects of neighborhood frequency in reading and lexical decision. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 767-779.
- Peter, M., & Turvey, M. T. (1994). Phonological codes are early sources of constraint in visual semantic categorization. *Perception & Psychophysics*, 55, 497-504.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M., & Raichle, M. E. (1988). Positron emission tomographic studies of cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331, 585-588.
- Pierce, J. R., & Karlin, J. E. (1957). Reading rate and the information rate of a human channel. *Bell System Technical Journal*, 36, 497-516.
- Pisoni, D. B., Nusbaum, H. C., Luce, P. A., & Slowiaczek, L. M. (1985). Speech perception, word recognition and the structure of the lexicon. *Speech Communication*, 4, 75-95.
- Plaut, D. C., McClelland, J. M., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading : Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, 103, 1, 56-115.
- Poepple, D. (1996). A critical review of PET studies of phonological processing. *Brain*, 55, 317-351.
- Posner, M. I. (1978). *Chronometric explorations of mind*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Pring, L. (1981). Phonological codes and functional spelling units : Reality and implications. *Perception and Psychophysics*, 30, 573-578.
- Prinzmetal, W. (1981). Principles of feature integration in visual perception. *Perception & Psychophysics*, 30, 330-340.
- Prinzmetal, W. (1990). Neon colors illuminate reading units. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 16, 584-597.
- Prinzmetal, W., Treiman, R., & Rho, S. H. (1986). How to see a reading unit. *Journal of Memory and Language*, 25, 461-475.
- Pugh, K. R., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Bronen, R. A., Shankweiler, D. P., Katz, L., Fletcher, J. M., & Gore, J. (1996). Cerebral organization of component processes in reading. *Brain*, 119, 1221-1238.
- Pulvermuller, F., Lutzenberger, W., & Birbaumer, N. (1995). Electro cortical distinction of vocabulary types. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 94, 357-370.
- Rapp, B. C., 1992. The nature of sublexical orthographic organization : The bigram trough hypothesis examined. *Journal of Memory and Language* 31, 33-53.
- Rastle, K. & Coltheart, M. (1998). Whammy and double whammy : Length effects in nonword naming. *Psychonomic Bulletin and Review*, 5, 277-282.
- Ratcliff, R. (1979). Group reaction time distributions and analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86, 446-461.
- Ratcliff, R., & Murdock, B. B. (1976). Retrieval processes in recognition memory. *Psychological Review*, 83, 190-214.
- Read, J. D. (1983). Detection of F's in a single statement : The role of phonological recoding. *Memory and Cognition*, 11, 390-399.
- Reggia, J. A., Marsland P. M., & Berndt, R. S. (1988). Competitive dynamics in a dual-route connectionist model of print-to-sound translation. *Complex Systems*, 2, 509-517.
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 274-280.
- Rey, A., Grainger, J., Chesnet, D., Bijeljac-Babic, R., & Jacobs, A.M. (soumis). LIP : A Luminance Increasing Procedure.

- Rey, A., Jacobs, A. M., Schmidt-Weigand, F., & Ziegler, J. C. (1998). A phoneme effect in visual word recognition. *Cognition*, 68, 41-50.
- Rey, A., Ziegler, J. C., & Jacobs, A. M. (soumis). Graphemes are perceptual reading units.
- Richards, L. G. (1976). Concreteness as a variable in word recognition. *American Journal of Psychology*, 89, 707-718.
- Richardson, J. T. E. (1976). The effect of stimulus attributes upon latency of word recognition. *British Journal of Psychology*, 67, 315-325.
- Rice, G. A., & Robinson, D. O. (1975). The role of bigram frequency in perception of words and nonwords. *Memory and Cognition*, 3, 513-518.
- Rosson, M. B. (1985). The interaction of pronunciation rules and lexical representations in reading aloud. *Memory & Cognition*, 13, 90-99.
- Rubenstein, H., Garfield, L., & Millikan, J. (1970). Homographic entries in the internal lexicon. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 9, 487-494.
- Rubenstein, H., Lewis, S. S., & Rubenstein, M. (1971). Homographic entries in the internal lexicon : Effects of systematicity and relative frequency of meaning. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 10, 645-657.
- Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., & the P. D. P. Research Group (1986). *Parallel and distributed processing : Explorations in the microstructure of cognition, Vol. 1. Foundations*. Cambridge (Mass.) : M.I.T. Press.
- Rumelhart, D. E., & Siple, P. (1974). The process of recognizing tachistoscopically presented words. *Psychological Review*, 81, 99-118.
- Saussure, F. de (1916). *Cours de linguistique générale*. Editions Payot, Paris.
- Schilling, H. E. H., Rayner, K., & Chumbley, J. I. (sous presse). Comparing naming, lexical decision, and eye fixation times : Word frequency effects and individual differences. *Memory and Cognition*.
- Schmauder, A. R. (1996). Ability to stand alone and processing of open-class and closed-class words : isolation versus context. *Journal of Psycholinguistic Research*, 25, 443-481.
- Schneider, V. I., Healy, A. F., & Gesi, A. T. (1991). The role of phonetic processes in letter detection : A reevaluation. *Journal of Memory and Language*, 30, 294-318.
- Sears, C. R., Hino, Y., & Lupker, S. J. (1995). Neighborhood size and neighborhood frequency effects in word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21, 876-900.
- Seidenberg, M. S. (1987). Sublexical structures in visual word recognition : Access units or orthographic redundancy ? In M. Coltheart (Ed.), *Attention and Performance XII : The psychology of reading*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, 96, 523-568.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1990). More words but still no lexicon : Reply to Besner et al. (1990). *Psychological Review*, 97, 477-452.
- Seidenberg, M. S., Petersen, A., MacDonald, M. C., & Plaut, D. C. (1996). Pseudohomophone effects and models of word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 22, 48-62.
- Seidenberg, M., and Plaut, D. C. (1998). Evaluating word reading models at the item level : Matching the grain of theory and data. *Psychological Science*, 9, 234-237.
- Seidenberg, M. S., & Waters, G. S. (1989). Word recognition and naming : A mega study [Abstract 30], *Bulletin of the Psychonomic Society*, 27, 48-62.

- Seidenberg, M. S., Waters, G. S., Barnes, M. A., & Tanenhaus, M. K. (1984). When does irregular spelling or pronunciation influence word recognition? *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23, 383-404.
- Sejnowski, T. J., & Rosenberg, C. R. (1986). *Nettalk : A parallel network that learns to read aloud* (EE and CS Techn. Rep. No. JHU/EECS-86/01). Baltimore, MD : Johns Hopkins University.
- Selkirk, E. O. (1982). The syllable. In H. Van der Hulst and N. Smith (Eds.), *The structure of phonological representations (Part II)*. Dordrecht, Holland : Foris.
- Sereno, J. A. (1991). Graphemic, associative, and syntactic priming effects at a brief stimulus onset asynchrony in lexical decision and naming. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 17, 459-477.
- Sereno, J. A., & Jongman, A. (1997). Processing of English inflectional morphology. *Memory & Cognition*, 25, 425-437.
- Shallice, T., & McCarthy, R. (1985). Phonological reading : From patterns of impairment to possible procedures. In K. Patterson, J.C. Marshall, & M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia : Neuropsychological and cognitive studies of phonological reading*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Shallice, T., Warrington, E. K., & McCarthy, R. (1983). Reading without semantics. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35A, 111-138.
- Shannon, C. A. (1951). Prediction and entropy of printed English. *Bell System Technical Journal*, 30, 50-64.
- Shimron, J., & Navon, D. (1981). The distribution of information within letters. *Perception & Psychophysics*, 30, 483-491.
- Smith, F. (1971). *Understanding reading : A psycholinguistic analysis of reading and learning to read*. New York : Holt, Rinehart & Winston.
- Smolensky, P. (1988). On the proper treatment of connectionism. *Behavioral and Brain Sciences*, 11, 1-22.
- Snodgrass, J. G. & Mintzer, M. (1993). Neighborhood effects in visual word recognition : Facilitatory or inhibitory? *Memory and Cognition*, 21, 247-266.
- Snodgrass, J. G., & Poster, M. (1992). Visual-word recognition thresholds for screen-fragmented names of the Snodgrass and Vanderwart pictures. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 24, 1-15.
- Sperling, G. (1967). Successive approximations to a model for short-term memory. *Acta Psychologica*, 27, 285-292.
- Spieler, D.H., & Balota, D. A. (1997). Bringing computational models of word naming down to the item level. *Psychological Science*, 8, 411-416.
- Spoehr, K. T., & Smith, E. E. (1973). The role of syllables in perceptual processing. *Cognitive Psychology*, 5, 71-89.
- Srinivas, K., Roediger, H. L., & Rajaram, S. (1992). The role of syllabic and orthographic properties of letter cues in solving word fragments. *Memory and Cognition*, 20, 219-230.
- Stanhope, N., & Parkin, A. J. (1987). Further explorations of the consistency effect in word and nonword pronunciation. *Memory and Cognition*, 15, 169-179.
- Stanovich, K. E. (1986). Matthew effects in reading : Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy. *Reading Research Quarterly*, XXI, 4, 360-406.
- Stanovich, K. E. (1987). Perspectives on segmental analysis and alphabetic literacy. *Cahiers de Psychologie Cognitive / European Bulletin of Cognitive Psychology*, 7, 5, 514-519.
- Stanovich, K. E. (1988). Explaining the differences between the dyslexic and the garden-variety poor reader : The phonological-core variable difference model. *Journal of Learning Disabilities*, 22, 590-612.

- Stanovich, K. E., & Bauer, D. W. (1978). Experiments on the regularity effect. *Memory & Cognition*, 6, 410-415.
- Stone, G. O., Vanhoy, M. D., & Van Orden, G. C. (1997). Perception is a two-way street : Feedforward and feedback phonology. *Journal of Memory and Language*, 36, 337-359.
- Stone, G. O., & Van Orden, G. C. (1993). Strategic control of processing in word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 19, 744-774.
- Taft, M. (1979). Lexical access via an orthographic code : The basic orthographic syllabic structure (BOSS). *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 18, 21-39.
- Taft, M. (1982). An alternative to grapheme-phoneme conversion rules ? *Memory & Cognition*, 10, 465-474.
- Taft, M., & Forster, K. I. (1976). Lexical storage and the retrieval of polymorphemic and polysyllabic words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 15, 607-620.
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain & Language*, 9, 182-198.
- Tallal, P., Miller, S. L., Bedi, G., Byma, G., Wang, X., Nagarajan, S. S., Schreiner, C., Jenkins, W. M., & Merzenich, M. M. (1996). Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science*, 271, 81-83.
- Taraban, R., & McClelland, J. L. (1987). Conspiracy effects in word pronunciation. *Journal of Memory and Language*, 26, 608-631.
- Thorndike, E. L., & Lorge, I. (1944). *The teacher's word book of 30,000 words*. New York : Teachers Col. Bur. Publ., Columbia University.
- Townsend, J. T. (1971). Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Perception & Psychophysics*, 9, 40-50.
- Townsend, J. T., & Ashby, F. G. (1983). *The stochastic modeling of elementary psychological process*. Cambridge, England : Cambridge University Press.
- Townsend, J. T., & Ashby, F. G. (1984). Measurement scales and statistics : The misconception misconceived. *Psychological Bulletin*, 96, 394-401.
- Townsend, J. T., Taylor, S. G., & Brown, D. R. (1971). Lateral masking for letters with unlimited viewing time. *Perception & Psychophysics*, 10, 375-378.
- Treiman, R. (1989). The internal structure of the syllable. In : G. Carlson & M. Tanenhaus (Eds.), *Linguistic structure in language processing*. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer.
- Treiman, R. (1994). To what extent do orthographic units in print mirror phonological units in speech ? *Journal of Psycholinguistic Research*, 23, 91-110.
- Treiman, R., & Chafetz, J. (1987). Are there onset- and rime- like units in written words ? In : M. Coltheart (Ed.), *Attention & Performance XII*. London : Erlbaum.
- Treiman, R., Goswami, U., & Bruck, M. (1990). Not all words are alike : Implications for reading development and theory. *Memory and Cognition* 18, 559-567.
- Treiman, R., Mullennix, J., Bijeljac-Babic, R., & Richmond-Welty, E. D. (1995). The special role of rimes in the description, use, and acquisition of English orthography, *Journal of Experimental Psychology : General*, 124, 107-136.
- Treiman, R., & Zukowski, A. (1988). Units in reading and spelling. *Journal of Memory and Language* 27, 466-477.
- Treiman, R., & Zukowski, A. (1990). Toward an understanding of English syllabification. *Journal of Memory and Language*, 29, 66-85.

- Treiman, R., & Zukowski, A. (1996). Children's sensitivity to syllables, onsets, rimes, and phonemes. *Journal of Experimental Child Psychology*, 61, 193-215.
- Treisman, A., & Schmidt, H. (1982). Illusory conjunctions in the perception of objects. *Cognitive Psychology*, 14, 107-141.
- Turvey, M. T. (1973). On peripheral and central processes in vision : inferences from an information processing analysis of masking with patterned stimuli. *Psychological Review*, 80, 1-52.
- Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Psychological Review*, 79, 327-352.
- Underwood, G., Clews, S., Everatt, J. (1990). How do readers know where to look next ? Local information distribution influence eye fixations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 42A, 39-66.
- Underwood, G., Roberts, M., & Thomason, H. (1988). Strategic invariance in lexical access : The reappearance of the pseudohomophone effect. *Canadian Journal of Psychology*, 42, 24-34.
- Uttal, W. R. (1990). On some two-way barriers between models and mechanisms. *Perception & Psychophysics*, 48, 188-203.
- Van Orden, G. C. (1987). A ROWS is a ROSE : spelling, sound, and reading. *Memory & Cognition*, 15, 181-198.
- Van Orden, G. C. (1991). Phonologic mediation is fundamental to reading. In D. Besner & G. Humphreys (Eds.), *Basic processing in reading : Visual word recognition* (pp. 77-103). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Van Orden, G. C., Johnston, J. C., Hale, B. L. (1988). Word identification in reading proceeds from spelling to sound to meaning. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 14, 371-386.
- Van Orden, G. C., Stone, G. O., Garlington, K. L., Markson, L., R., Pinnt, G. S., Simonfy, C. M., & Bricchetto, T. (1992). "Assembled" phonology and reading : A case study in how theoretical perspective shapes empirical investigation. In R. Frost & L. Katz (Eds.), *Orthography, phonology, morphology, and meaning* (pp. 249-292). Amsterdam : North-Holland.
- Venezky, R. L., (1970). *The structure of English orthography*. The Hague : Mouton.
- Venezky, R. L., (1981). Letter-sound regularity and orthographic structure. In M. L. Kamil (Ed.), *Directions in reading research and instructions*. Washington, DC : NRC.
- Véronis, J. (1986). Etude quantitative sur le système graphique et phono-graphique du français. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 6, 501-531.
- Vitu, F., O'Regan, J. K., & Mittau, M. (1990). Optimal landing position in reading isolated words and continuous texts. *Perception & Psychophysics*, 47, 583-600.
- Voker, J. R., Baker, J. G., Hayman, G., & Jacoby, L. L. (1986). Perceptual identification of visually degraded stimuli. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 18, 1-9.
- Warrington, E. K., & Weiskrantz, L. (1968). New method of testing long-term retention with special reference to amnesic patients. *Nature*, 217, 972-974.
- Waters, G. S., & Seidenberg, M. S. (1985). Spelling-sound effects in reading : Time course and decision criteria. *Memory and Cognition*, 13, 557-572
- Weekes, B. S. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 50A, 439-456.
- Whaley, C. P. (1978). Word-nonword classification time. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 17, 143-154.
- Wijk, A. (1966). *Rules of pronunciation for the English language*. Oxford, England : Oxford University Press.
- Wise, B. W., Olson, R. K., & Treiman, R., 1990. Subsyllabic units in computerized reading instruction : Onset-rime vs. postvowel segmentation. *Journal of Experimental Child Psychology* 49, 1-19.

- Ziegler, J. C. (1996). La lecture en tant que système de résonance : Une approche expérimentale et computationnelle de l'activation et de la rétroaction phonologique. Thèse de Doctorat de l'Université de Provence.
- Ziegler, J. C., & Jacobs, A. M. (1995). Phonological information provides early sources of constraint in the processing of letter strings. *Journal of Memory and Language*, 34, 567-593.
- Ziegler, J. C., Jacobs, A. M., & Stone, G. O. (1996). Statistical analysis of the bidirectional inconsistency of spelling and sound in French. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 28, 504-515.
- Ziegler, J. C., Montant, M., & Jacobs, A. M. (1997). The feedback consistency effect in lexical decision and naming. *Journal of Memory and Language*, 37, 533-554.
- Ziegler, J. C., Rey, A., & Jacobs, A. M., (1998). Individual word identification thresholds and errors in the fragmentation task. *Memory and Cognition*, 26, 490-501.
- Ziegler, J. C., Stone, G. O., & Jacobs, A. M. (1997). What's the pronunciation for \_OUGH and the spelling for /u/? A database for computing feedforward and feedback inconsistency in English. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 29, 600-618.
- Ziegler, J. C., Van Orden, G. C., & Jacobs, A. M. (1997). Phonology can help or hurt the perception of print. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23, 845-860.
- Zorzi, M., Houghton, G., & Butterworth, B (1998). Two Routes or One in Reading Aloud? A Connectionist Dual-Process Model. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 1131-1161.

# Annexes

Annexe I : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentage d'erreurs (% Err) pour les trois conditions de fréquence et pour chaque item dans l'expérience 1 du Chapitre 2.

HF			MF			BF		
mot	TR	% Err	mot	TR	% Err	mot	TR	% Err
quand	2468	0	ronde	2517	0	frire	2618	7.1
grand	2477	0	patte	2537	0	mante	2704	14.3
chose	2490	0	corde	2520	3.6	rance	2619	0
temps	2476	0	songe	2560	3.6	gnose	2676	7.1
monde	2535	3.6	pente	2522	0	soute	2694	0
moins	2535	7.1	digne	2508	3.6	veule	2549	7.1
point	2566	3.6	creux	2455	0	havre	2618	3.6
heure	2554	0	mince	2587	7.1	jatte	2541	0
force	2588	0	toile	2537	3.6	groin	2598	3.6
doute	2508	0	reine	2567	0	miche	2608	3.6
terre	2556	0	brume	2524	0	grive	2519	0
place	2517	0	ruine	2598	3.6	pagne	2591	7.4
juste	2484	0	seuil	2565	0	rouet	2600	0
aller	2548	0	usine	2564	3.6	civet	2545	0
notre	2585	3.6	perte	2506	0	lopin	2598	7.1
petit	2490	0	fusil	2499	3.6	giron	2591	3.6
ainsi	2542	3.6	gorge	2501	0	paria	2684	22.2
avant	2476	0	barbe	2547	3.6	ruade	2627	3.7
assez	2525	0	cruel	2526	0	gibet	2566	0
votre	2494	0	agent	2526	0	rebus	2582	0
enfin	2503	3.6	appui	2567	0	humus	2680	0
alors	2521	0	enfer	2507	3.7	serpe	2567	0
aussi	2454	0	actif	2588	7.1	gober	2582	0
celui	2532	0	avril	2491	3.6	serin	2630	10.7
matin	2578	0	ennui	2578	0	cornu	2677	3.6
livre	2573	0	nuage	2562	0	fluet	2579	0

Annexe II : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentage d'erreurs (% Err) pour les trois conditions expérimentales et pour chaque item dans l'expérience 2 du Chapitre 6.

3 phonèmes			4 phonèmes			5 phonèmes		
Item	TR	% Err	Item	TR	% Err	Item	TR	% Err
girth	2275	3.7	clout	2233,7	0	frond	2292	11.1
leech	2208	0	preen	2233,2	0	brunt	2249	3.7
poise	2200	0	fiend	2347,5	0	graft	2252	0
noose	2292	7.4	roost	2196,1	3.7	stomp	2123	3.7
teeth	2196	0	bleat	2218,8	3.7	slink	2255	7.4
hoard	2300	14.8	staid	2275,6	3.7	slant	2255	3.7
sheen	2211	3.7	taint	2241,3	0	clink	2225	0
feign	2289	0	flair	2237	0	crank	2186	0
shear	2197	0	stair	2207,8	3.7	gland	2183	0
niece	2365	0	hoist	2230,3	0	clamp	2248	0
poach	2183	7.4	wield	2210,4	0	tract	2262	0
yearn	2317	3.7	guild	2210,9	3.7	stink	2137	0
sheaf	2268	18.5	freak	2166,7	0	glint	2185	3.7
roach	2219	7.4	bream	2236,4	3.7	quest	2228	0
shawl	2289	0	greed	2114,6	0	stunt	2237	3.7
lurch	2217	0	stout	2207,8	3.7	frost	2165	3.7
booth	2245	3.7	smear	2198,1	0	blond	2186	7.4
beech	2193	7.7	bleak	2194,5	3.7	flint	2237	0
couch	2227	3.7	trait	2216,2	3.7	brand	2121	3.7
tease	2279	3.7	haunt	2246	0	quint	2205	18.5
heath	2272	7.4	saint	2180,1	0	grunt	2147	7.4
cough	2174	0	feast	2191	0	blast	2206	0
beard	2209	3.7	steam	2236,3	0	trunk	2160	0
rough	2186	0	sweat	2207,9	0	grind	2197	3.7
cheek	2195	3.7	stein	2237,3	11.1	trend	2185	0

Annexe III : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentage d'erreurs (%Err) pour les quatres conditions expérimentales et pour chaque item dans l'expérience 3 du Chapitre 6.

Mots de Haute Fréquence						Mots de Basse Fréquence					
4 phonèmes			2-3 phonèmes			4 phonèmes			2-3 phonèmes		
Item	TR	%Err	Item	TR	%Err	Item	TR	%Err	Item	TR	%Err
boire	2114	0	chair	2189	0	bride	2139	0	baume	2228	0
bruit	2133	0	chant	2150	0	clore	2287	9.1	chaux	2157	0
clair	2246	0	chien	2188	4.5	crabe	2231	0	cotte	2260	0
crime	2181	0	choix	2127	0	cuire	2197	0	craie	2261	0
crise	2207	0	corps	2201	0	fiolle	2326	9.1	faune	2226	0
croix	2146	0	doigt	2173	4.5	flair	2275	0	frein	2234	4.5
drame	2163	0	faute	2158	0	flore	2180	0	gaine	2249	0
fleur	2179	4.5	filie	2301	0	frite	2184	0	gueux	2237	0
froid	2186	0	genre	2209	0	grade	2216	0	heurt	2247	4.5
fruit	2169	0	haine	2170	0	liane	2272	4.8	jarre	2276	0
glace	2166	0	honte	2192	0	poire	2190	0	liant	2333	4.5
grave	2153	0	lutte	2281	0	prime	2196	0	maure	2282	0
nuage	2204	0	neige	2158	0	prune	2198	0	meule	2313	20
place	2159	4.5	pente	2182	0	rieur	2305	0	ouate	2373	0
pluie	2211	4.5	reine	2212	0	stage	2172	0	pouls	2336	4.5
plume	2201	0	saint	2169	0	store	2224	0	rente	2217	0
style	2211	0	seuil	2187	0	suave	2251	0	rhume	2265	0
suite	2175	0	soeur	2235	0	trame	2187	0	rhume	2270	4.5
toile	2181	0	sourd	2191	0	tripe	2184	0	veule	2257	0
trois	2249	0	vingt	2213	4.5	tueur	2185	4.5	vouer	2239	4.5

Annexe IV : Temps de réponse moyens (TR) et pourcentage d'erreurs (%Err) pour les quatres conditions expérimentales, pour chaque item et chaque lettre (L), dans l'expérience 4 et 5 du Chapitre 6.

L	Mots de Basse Fréquence						Mots de Haute Fréquence					
	Graphème Multi-Lettre			Graphème Uni-Lettre			Graphème Multi-Lettre			Graphème Uni-Lettre		
	item	TR	%Err	item	TR	%Err	item	TR	%Err	item	TR	%Err
Anglais (Exp. 4)												
A	peach	521	5	stark	523	10	reach	524	0	class	500	15
A	yeam	561	5	tract	501	10	learn	559	5	black	517	0
A	lease	610	5	slack	548	5	peace	620	0	grass	534	5
A	leach	532	5	graft	479	0	teach	564	10	glass	516	5
A	poach	583	15	trash	493	5	coast	541	15	track	516	5.3
A	hoard	593	5.6	brash	518	15	board	572	10	staff	466	5
E	niece	522	0	speck	517	15.8	piece	561	5	dress	686	10.5
E	wield	546	5	theft	568	10	field	601	15	press	575	10
I	waive	563	5	skimp	535	10	paint	549	15	quick	519	20
I	maize	631	15.8	whisk	538	20	raise	584	20	stick	554	0
I	poise	582	0	twine	565	10	joint	540	15.8	shift	525	0
I	hoist	541	10.5	slick	509	15.8	noise	580	15	skill	559	10
U	rouse	588	10	pluck	599	20	count	646	15	trust	585	5
U	mourn	634	15	crumb	616	20	mouth	534	0	truth	628	0
U	louse	626	30	snuff	669	5.3	youth	552	10	stuff	580	20
Français (Exp. 5)												
A	taupe	533	5.6	casse	474	0	faute	521	0	vague	423	10.5
A	faune	535	0	bagne	440	0	jaune	505	5.3	basse	458	5.3
A	lange	501	0	latte	449	0	danse	431	5.3	balle	424	0
A	saule	486	5.3	panne	490	0	cause	516	0	salle	473	10.5
A	stand	511	0	stage	481	0	franc	520	0	grave	453	0
I	beige	543	10.5	tripe	485	10.5	neige	577	5.3	crime	478	0
I	moite	532	21.1	prime	549	10.5	poids	541	5.3	crise	539	10.5
I	poire	551	10.5	bribe	527	5.3	voile	555	15.8	prise	551	5.3
N	gland	706	10.5	gaine	714	5.6	blanc	600	22.2	peine	604	11.8
N	plant	608	26.3	liane	678	11.8	chant	642	26.3	haine	717	15.8
N	coing	692	17.6	frêne	689	21.1	poing	630	5.6	reine	633	27.8
O	sonde	592	10.5	colle	510	10.5	honte	554	11.1	poche	467	5.3
U	guêpe	651	15.8	pulpe	528	5.3	quart	679	21.1	russe	538	5.3
U	loupe	594	10.5	prune	501	0	sourd	620	0	plume	547	0
U	moule	535	10.5	rhume	493	10.5	douze	648	15.8	chute	531	5.6

**Annexe V** : Tableau des correspondances grapho-phonémiques établi à partir de l'ensemble des mots monosyllabiques du lexique Anglais de 3 à 5 lettres (N=2506 mots). Chaque ligne code pour une correspondance, avec : Graph.= le graphème ; Phon. = le phonème ; F-Tot = fréquence d'occurrence totale de ce graphème ; N-Tot = nombre de mots ayant ce graphème ; N-Corr = nombre de correspondances possibles pour ce graphème ; F-Corr = fréquence d'occurrence de cette correspondance ; N-Corr = nombre de mots ayant cette correspondance ; Ex. O&P : exemples d'un mot avec son correspondant phonologique contenant cette correspondance.

Graph.	Phon.	F-Tot	N-Tot	N-Corr	F-Corr	N-Corr	Ex.	O&P
a	A	95614	473	6	65797	219	and	And
a	l				13286	145	make	mIk
a	\$				6292	19	all	\$l
a	#				5139	54	ask	#sk
a	Q				4268	19	what	wQt
a	8				832	17	care	k8R
ach	Q	6	1	1	6	1	yacht	jQt
ah	#	5	1	1	5	1	shah	S#
ai	l	3491	65	4	2686	55	wait	wIt
ai	8				788	7	air	8R
ai	2				10	1	aisle	2l
ai	A				7	2	plait	plAt
air	8	5	2	1	5	2	cairn	k8n
al	\$	1383	13	2	939	6	talk	t\$k
al	#				444	7	half	h#f
ao	l	35	1	1	35	1	gaol	_ll
ar	#	3915	65	2	3671	56	part	p#t
ar	\$				244	9	warm	w\$m
are	8	2	1	1	2	1	wares	w8z
au	\$	706	18	4	484	14	cause	k\$z
au	#				212	2	laugh	l#f
au	l				6	1	gauge	g1_
au	5				4	1	mauve	m5v
aul	\$	2	1	1	2	1	baulk	b\$k
aw	\$	719	24	1	719	24	draw	dr\$
awe	\$	12	1	1	12	1	awe	\$
ay	l	9805	28	2	9799	26	say	s1
ay	i				6	2	quay	ki
aye	2	3	1	1	3	1	aye	2
b	b	17137	256	1	17137	256	but	bVt
bb	b	5	1	1	5	1	ebb	Eb
be	b	134	9	1	134	9	tribe	tr2b
bt	t	224	2	1	224	2	doubt	d6t
c	k	15549	216	2	14832	212	can	kAn
c	s				717	4	cent	sEnt
ce	s	4618	40	1	4618	40	place	plIs
ch	J	11544	84	4	11240	65	which	wIJ
ch	S				278	14	lunch	lVnS
ch	k				22	4	conch	kQNk
ch	x				4	1	loch	lQx
che	k	25	3	3	18	1	ache	lk
che	J				5	1	niche	nIJ
che	S				2	1	cache	kAS
ck	k	4296	71	1	4296	71	back	bAk
d	d	57953	330	2	57865	327	and	And

d	t				88	3	fixed	fI%t
dt	d	318	3	1	318	3	add	Ad
dē	d	1470	29	1	1470	29	side	s2d
dge	_	316	12	1	316	12	edge	E_
e	@	99240	175	8	62034	1	the	D@
e	E				21915	160	when	wEn
e	3				4452	3	her	h3R
e	I				4312	1	she	SI
e	8				4308	2	there	D8R
e	i				1413	5	these	Diz
e	7				803	2	here	h7R
e	1				3	1	suede	sw1d
ea	i	13173	119	5	7219	86	leave	liv
ea	7				3057	14	hear	h7R
ea	E				1312	10	head	hEd
ea	1				1156	5	great	gr1t
ea	8				429	4	wear	w8R
eah	8	22	1	1	22	1	yeah	j8
ear	3	718	8	3	521	6	learn	l3n
ear	#				171	1	heart	h#t
ear	7				26	1	beard	b7d
eau	5	3	1	1	3	1	beau	b5
ee	i	9368	90	2	9173	79	see	si
ee	7				195	11	beer	b7R
ei	1	137	9	3	55	7	vein	v1n
ei	2				48	1	stein	st2n
ei	i				34	1	seize	siz
eigh	1	130	2	1	130	2	eight	1t
eir	8	2984	2	2	2976	1	their	D8
eir	7				8	1	weird	w7d
er	3	645	25	2	613	24	serve	s3v
er	#				32	1	clerk	kl#k
eu	§	3	1	1	3	1	feud	f§d
eue	§	16	1	1	16	1	queue	k§
ew	§	1969	17	3	1837	8	new	n§
ew	u				120	8	screw	skru
ew	5				12	1	sew	s5
ewe	§	3	1	1	3	1	ewe	§
ey	1	5005	7	2	4913	6	they	D1
ey	i				92	1	key	ki
eye	2	559	1	1	559	1	eye	2
f	f	28154	206	1	28154	206	for	f\$R
fe	f	1252	5	1	1252	5	life	l2f
ff	f	1122	13	1	1122	13	off	Qf
g	g	11412	184	2	11320	175	get	gEt
g	_				92	9	gaol	_1l
ge	_	1592	29	2	1583	27	large	l#_
ge	Z				9	2	tinge	tInZ
gg	g	88	1	1	88	1	egg	Eg
gh	f	326	6	3	291	4	laugh	l#f
gh	g				33	1	ghost	g5st
gh	x				2	1	ugh	Vx

gn	n	221	5	1	221	5	sign	s2n
gu	g	339	7	1	339	7	guess	gEs
gue	g	33	3	1	33	3	vague	v1g
h	h	36673	113	1	36673	113	have	hAv
hei	8	10	1	1	10	1	heir	8R
i	I	60375	379	4	44900	259	with	wID
i	2				15528	112	like	l2k
i	3				111	5	sir	s3R
i	i				28	3	suite	swit
ie	2	1374	19	4	725	5	lie	l2
ie	i				634	11	field	fild
ie	7				13	2	pier	p7R
ie	I				2	1	sieve	sIv
iew	§	277	1	1	277	1	view	v§
igh	2	2912	11	1	2912	11	right	r2t
ir	3	2516	23	1	2516	23	first	f3st
j	_	2395	33	1	2395	33	just	_Vst
k	k	12598	159	1	12598	159	think	TINk
ke	k	7115	37	1	7115	37	make	m1k
kh	k	7	1	1	7	1	khan	k#n
kn	n	2351	12	1	2351	12	know	n5
l	l	33034	472	1	33034	472	like	l2k
le	l	2641	34	1	2641	34	while	w2l
ll	l	15745	64	1	15745	64	will	wll
lle	l	4	2	1	4	2	belle	bEl
m	m	32008	253	1	32008	253	from	frQm
mb	m	316	11	1	316	11	climb	kl2m
me	m	8247	36	1	8247	36	time	t2m
mn	m	52	2	1	52	2	damn	dAm
n	n	76955	391	2	74320	348	and	And
n	N				2635	43	think	TINk
ne	n	5250	45	1	5250	45	one	on
ng	N	4055	31	1	4055	31	long	lQN
nn	n	12	1	1	12	1	inn	In
nne	n	10	1	1	10	1	tonne	tVn
o	Q	49778	283	7	16183	141	not	nQt
o	\$				10119	18	for	f\$R
o	5				7890	97	old	5ld
o	u				6183	10	who	hu
o	V				5336	14	come	kVm
o	o				4054	2	one	on
o	U				13	1	wolf	wUlf
oa	5	1084	43	2	981	38	road	r5d
oa	\$				103	5	broad	br\$d
oar	\$	116	2	1	116	2	board	b\$d
oe	u	145	8	2	83	1	shoe	Su
oe	5				62	7	toe	t5
oh	Q	8	2	2	6	1	john	_Qn
oh	5				2	1	kohl	k5l
oi	4	1442	19	1	1442	19	point	p4nt
ol	5	29	3	1	29	3	folk	f5k
oo	U	8487	78	5	4044	15	look	lUk

oo	u				3395	57	too	tu
oo	\$				593	2	door	d\$R
oo	9				269	2	poor	p9R
oo	V				186	2	blood	blVd
or	3	4614	40	2	2617	8	work	w3k
or	\$				1997	32	form	f\$m
ou	u	15081	58	7	7028	5	you	\$
ou	6				5280	42	out	6t
ou	\$				2003	3	your	j\$R
ou	V				612	3	young	jVN
ou	5				77	2	soul	s5l
ou	9				57	2	tour	t9R
ou	Q				24	1	cough	kQf
ough	\$	106	3	3	92	1	ought	\$t
ough	5				11	1	dough	d5
ough	6				3	1	bough	b6
oul	U	1026	1	1	1026	1	would	wUd
oup	u	9	1	1	9	1	coup	ku
our	\$	211	4	1	211	4	court	k\$t
ow	5	9698	46	2	4969	21	know	n5
ow	6				4729	25	now	n6
owe	5	31	2	2	28	1	owe	5
owe	6				3	1	bowed	b6d
oy	4	471	8	1	471	8	boy	b4
p	p	17380	362	1	17380	362	put	pUt
pe	p	918	24	1	918	24	hope	h5p
ph	f	149	4	1	149	4	phone	f5n
ps	s	3	1	1	3	1	psalm	s#m
pt	t	19	1	1	19	1	tempt	tEmt
qu	q	781	22	2	761	20	quite	q2t
qu	k				20	2	queue	k\$
r	r	48305	436	2	25978	361	from	frQm
r	R				22327	75	for	f\$R
re	R	7850	39	1	7850	39	there	D8R
rh	r	5	1	1	5	1	rhyme	r2m
rps	R	20	1	1	20	1	corps	k\$R
rr	R	11	4	1	11	4	purr	p3R
s	s	51311	501	3	44453	458	this	DIs
s	z				7020	43	his	hIz
s	S				295	1	sure	S9R
sc	s	136	2	1	136	2	scene	sin
se	z	7607	59	2	5659	27	these	Diz
se	s				1948	32	case	k1s
sh	S	8713	94	1	8713	94	she	SI
sle	l	24	2	1	24	2	isle	2l
ss	s	2275	30	1	2275	30	pass	p#s
t	t	73263	549	1	73263	549	that	DAt
tch	J	792	17	1	792	17	watch	wQJ
te	t	3885	45	1	3885	45	late	11t
th	D	108014	83	3	99596	20	the	D@
th	T				8415	62	think	TINK
th	t				3	1	thyme	t2m

the	D	14	3	1	14	3	bathe	bID
tt	t	34	5	1	34	5	butt	bVt
tte	t	6	1	1	6	1	matte	mAt
tz	s	2	1	1	2	1	waltz	wQIs
u	V	20572	237	8	15854	188	but	bVt
u	U				1495	6	put	pUt
u	§				1427	19	use	§z
u	u				1334	13	thru	Tru
u	9				306	2	sure	S9R
u	ü				87	2	pure	püR
u	3				54	5	fur	f3R
u	w				15	2	suite	swit
ue	u	534	10	2	424	6	true	tru
ue	§				110	4	due	d§
ui	I	448	4	2	248	1	build	bIId
ui	u				200	3	suit	sut
ur	3	1256	25	1	1256	25	turn	t3n
uy	2	299	2	1	299	2	buy	b2
v	v	1015	33	1	1015	33	voice	v4s
ve	v	18775	47	1	18775	47	have	hAv
w	w	24370	127	1	24370	127	with	wID
wh	h	14677	29	2	14677	29	who	hu
wh	w				11445	24	which	wIJ
wo	u	1362	1	1	1362	1	two	tu
wor	\$	18	1	1	18	1	sword	s\$d
wr	r	764	11	1	764	11	write	r2t
x	%	1238	19	1	1238	19	next	nE%t
xe	%	77	3	1	77	3	fixed	fl%t
y	j	13383	47	3	11109	22	you	§
y	2				2222	19	try	tr2
y	I				52	6	myth	mIT
ye	2	20	3	1	20	3	dye	d2
z	s	57	11	2	57	11	blitz	blIts
z	z				51	10	zone	z5n
zē	z	348	18	1	348	18	size	s2z
zz	z	23	4	1	23	4	buzz	bVz

Annexe VI : Liste des 120 mots Anglais utilisés dans l'expérience 6, 144 sujets - 120 mots, du chapitre 8. Ce tableau contient également la moyenne des temps de réponse pour chaque des mots (TR), le pourcentage d'erreurs (% Err), l'erreur standard (ES), le nombre d'exclusions temporelles ("outliers", Excl. Temp.) et le logarithme de la fréquence d'occurrence (logF).

Item	TR	%Err	ES	ET	LogF	Item	TR	%Err	ES	ET	LogF
batch	2235	0	29.03	0	0.70	grass	2242	0.71	27.30	2.0	1.98
beard	2240	1.43	28.04	0	1.41	green	2183	0	26.0	1.0	2.21
blade	2198	0	26.30	3.0	1.36	groin	2262	4.29	30.57	2.0	0.60
blank	2163	2.86	24.63	1.0	1.26	grope	2229	3.57	26.18	0	1.04
blink	2187	0.71	26.12	2.0	1.15	gross	2221	4.29	27.29	0	1.36
bloom	2206	1.43	27.56	0	1.0	guest	2246	8.57	24.52	1.0	1.80
brave	2196	0.71	27.71	0	1.36	hatch	2259	6.43	27.53	2.0	1.04
brick	2171	1.43	23.80	1.0	1.64	house	2212	0	24.49	1.0	2.80
bride	2189	6.43	26.93	2.0	1.11	leave	2196	0	25.51	0	2.91
bring	2164	0	22.36	0	2.72	lines	2357	2.14	25.58	2.0	0.70
brown	2172	0	26.16	2.0	1.96	lurch	2295	2.86	26.92	3.0	1.0
bunch	2256	2.86	25.12	2.0	1.38	mirth	2278	2.86	25.05	0	0.30
carve	2260	0.71	26.66	0	1.32	mount	2255	2.14	25.35	0	1.77
cease	2317	1.43	28.98	3.0	1.59	ninth	2382	2.86	28.13	4.0	0.70
chant	2234	1.43	26.36	1.0	1.04	phone	2154	1.43	24.30	0	2.0
chase	2206	1.43	26.68	1.0	1.41	plait	2342	5.0	31.66	1.0	0.60
cheap	2182	1.43	25.84	0	1.82	point	2199	1.43	26.67	2.0	2.73
chest	2208	0.71	24.39	2.0	1.71	porch	2186	0	23.43	1.0	1.18
churn	2321	7.86	31.24	4.0	0.70	price	2175	4.29	25.72	0	2.21
claim	2271	4.29	27.43	0	2.21	proof	2222	5.0	26.72	2.0	1.56
clash	2203	0	26.95	1.0	1.20	prowl	2212	0.71	24.14	0	0.70
close	2188	0.71	23.29	2.0	2.10	pulse	2189	2.14	25.07	2.0	1.18
crack	2192	2.14	23.92	1.0	1.63	queer	2273	1.43	25.88	0	0.95
crane	2262	2.14	27.27	0	0.78	quell	2329	0.71	33.37	5.0	0.30
crate	2270	2.14	29.0	1.0	0.78	quint	2362	7.86	34.30	5.0	1.26
crave	2213	2.14	23.49	0	0.70	roost	2224	3.57	24.34	1.0	0.30
creep	2185	0.71	22.67	0	1.48	roots	2224	5.71	26.27	1.0	0.85
curse	2248	0.71	25.36	2.0	1.43	scope	2277	0.71	27.06	4.0	1.23
death	2165	0.71	24.55	0	2.40	scrap	2265	1.43	26.65	3.0	1.11
dodge	2199	1.43	24.39	0	0.70	shank	2273	2.86	29.15	1.0	0.48
drawn	2238	2.14	25.36	0	0.48	shawl	2246	0.71	25.83	3.0	0.85
dress	2231	2.86	25.16	0	2.25	shirt	2192	1.43	26.95	0	1.81
drool	2223	0.71	25.78	1.0	0.30	shore	2261	4.29	25.72	1.0	1.51
drown	2222	1.43	30.20	2.0	1.43	shrug	2288	2.14	26.79	1.0	1.48
flash	2210	0.71	27.09	1.0	1.72	skull	2207	0.71	27.34	1.0	1.34
flirt	2227	1.43	25.22	0	0.60	slang	2268	0	26.67	2.0	0.48
flock	2236	2.14	27.07	0	1.18	slave	2229	0.71	24.93	1.0	1.57
forth	2249	1.43	27.0	1.0	1.63	slosh	2292	5.0	27.56	1.0	0.30
freak	2224	0.71	24.53	1.0	0.90	smear	2218	0.71	25.42	0	1.04
frock	2264	1.43	27.76	2.0	0.90	smith	2232	2.14	27.76	0	0.48
ghost	2137	0	23.90	1.0	1.52	smock	2228	5.0	25.27	0	0.30
glade	2249	0.71	27.82	2.0	0.30	smoke	2172	0	21.59	0	1.98
glass	2229	2.86	23.92	0	2.18	snail	2300	3.57	30.71	3.0	0.70
grain	2252	0.71	28.54	1.0	1.56	sneak	2245	4.29	30.17	2.0	0.78

<b>Item</b>	<b>TR</b>	<b>%Err</b>	<b>ES</b>	<b>ET</b>	<b>LogF</b>
snort	2291	1.43	27.43	2.0	0.85
solve	2253	2.86	26.70	3.0	1.71
sound	2199	2.14	24.65	1.0	2.46
space	2159	1.43	23.58	1.0	2.15
spike	2182	0.71	26.83	1.0	0.90
spill	2172	2.14	24.12	3.0	1.28
spoil	2229	1.43	26.92	0	1.48
spree	2274	0.71	25.59	0	0.30
stain	2269	2.14	26.30	3.0	1.41
stalk	2201	2.86	28.10	1.0	1.28
stead	2277	1.43	27.04	2.0	0.48
steam	2259	4.29	25.85	1.0	1.46
still	2201	1.43	24.46	1.0	2.97
stray	2282	5.0	25.53	1.0	1.15
strut	2291	4.29	24.98	2.0	0.48
style	2237	2.14	26.04	2.0	2.05

<b>Item</b>	<b>TR</b>	<b>%Err</b>	<b>ES</b>	<b>ET</b>	<b>LogF</b>
swamp	2245	0	28.08	2.0	1.08
sweat	2253	2.86	25.84	2.0	1.65
swill	2283	4.29	30.97	1.0	0.30
teach	2221	0	28.55	0	2.12
teeth	2178	0.71	24.13	0	0.48
tempt	2237	1.43	25.97	1.0	1.28
theft	2224	1.43	28.86	1.0	0.90
thing	2155	1.43	23.19	0	2.95
three	2230	3.57	27.18	1.0	2.80
tight	2244	2.14	26.07	0	1.72
tithe	2395	10.71	33.88	8.0	0.30
treat	2242	4.29	26.20	2.0	2.03
twine	2282	3.57	28.59	0	0.30
verge	2257	2.14	28.37	1.0	1.0
waltz	2308	1.43	27.25	3.0	0.30
watch	2192	0.71	26.39	1.0	2.48

Annexe VII : Détail des erreurs produites par l'ensemble des 144 sujets.

Sujets	Stim.	Erreur	Sujets	Stim.	Erreur	Sujets	Stim.	Erreur
1	churn	church	16	carve	ddf	25	tithe	tilth
	solve	slove			tray		bride	bridge
2	phone	phoen			tain		mount	mouth
3	ghost	ghost'			rawl	26	tempt	tempe
4	hatch	batch			ring		flirt	flirth
	freak	fleak			rawn		frock	frook
	stain	tain			roof		strut	slurt
	style	tyle			oost			lave
5	shirt	shir	17	cease	tease			talk
	drawn	draw			lang			ines
	batch	atch			pill			hore
	slave	lave			tyle			irth
		ueer			tease			hrug
		weat	18	swaet	seat			team
		laim		teeth	theet			hing
		shankk			thefty	27	swill	stwill
		mith			claim\			inth
		till			ines			stary
		pill			flirty	28	twine	
		hant			frocki		smith	stitch
6	still	stil			deathg			empt
		ines			tight\			hirt
		hrug	19	quint	quaint			ight
7		gropr		stead	steak	29	shore	share
8	lurch	leach		bunch		30	shore	ore
	roost	roust		guest	quest		strut	strupt
		chea[		bloom	blown		claim	clain
		chant'			hirt	31	bunch	
		scrap\			eath		bride	bridge
9	theft	?			crame		shirt	irt
	guest	squeak	20			32		
	gross	grose	21	quint	guint	33	stead	streak
	grass	grease		bunch	brunch		churn	
	scrap	scray		stalk	staik		three	thre
		dreas		tithe	title		drawn	dream
		olve		blank	blawk		snort	snoot
10	slosh	sloth		quell	queel		plait	plaid
11	drown	drowse		scope	stope		slosh	slush
	price	pric		spill	spilt		groin	grain
12	smock	smuck		price	prince	34		
	grobe	grape			srtay	35	guest	quest
13	cheap	theap	22	shrug	shag		skull	scull
	stray	guage			till		roost	rost
	tithe	tilthe			moke	36	stray	trayK
	churn	church			team		tithe	thihte
		tain	23	steam	stream		roots	roote
		oint		slosh	shosh		treat	threat
		till	24	drown	drawn	37		
		altz		pulse	pulce	38	hatch	hack
		eave		bride	bridge		spoil	spoll
		moke		spree	sprece		beard	bear
14	claim	clain		gross	grose	39	quint	quiet
15	snort	short		churn	church		lurch	larch
		blink\		spike	splitz		shore	ore
		chrn					churn	church
						40		EXCLU

Sujets	Stim.	Erreur	Sujets	Stim.	Erreur	Sujets	Stim.	Erreur
41			64			86	tithe	tithl
42	bride	bridge	65	sneak	speak		scrap	scrape
	groin	grain		shore	simore		treat	treate
43	quint			gross	grass	87		
	slosh	sloth	66	EXCLU		88	hatch	atch
44	slave	starve	67	shank	shack		twine	twint
	pulse	prise	68	glass	glas		claim	chain
	lines	times	69	tight	ght	89	EXCLU	
	three	those		steam	stream	90	sneak	speak
	spill	sprill	70	sneak	speak		queer	queen
45	still	stil	71				grope	grove
46	hatch	batch	72	ninth	nint	91	bunch	hunch
	snail	sneil		bride	bridle	92	stray	strag
	tithe	tithle		gross	groos		bride	bridge
	gross	grose	73				mirth	rth
	three	threec	74	tithe			plait	plain
	smock	smack		dress	dream	93	churn	church
	treat	hreat		crate	eratic		price	prince
47	snail	brawl		shore	share		groin	grain
	dress	dense		shrug	rug	94	sweat	aweat
	proof	joint		swill	swull		brick	birch
	style	stule	75	quint	quiet		gross	groses
48	point	paint		tithe	lithe		churn	church
	spill	spoil		strut	straw		crane	crame
	smith	smithy		plait	plaid		bloom	broom
	treat	threat		steam	stream		proof	peoof
49	hatch	batch		slove	clove		plait	plain
	grope	grape	76	guest	quest		space	apwce
50	chase	chast		swill	stall	95	tithe	title
51	crave	grave	77	stray	strag		bride	brise
	grope	grape		guest	uest	96		
	slosh	slash		creep	crep	97	quint	quiet
	roost	roast		churn	church		twine	twing
52	stain	strain		shrug	strut		flock	rionk
53				slosh	slash		verge	vergs
54			78	bride	bridge		crave	trace
55				chant	chart		roots	rotts
56	glade		79	roost	roots	98	hatch	batch
	bride	bridge	80				plait	plaid
57	theft	theaf	81	hatch	harsh		curse	curst
	steam	stream		plait	plail	99	guest	quest
58			82	quint	quit	100	guest	quest
59	tithe	tilthe		twine	twaine		churn	church
	dress	dres		claim	clain		plait	plaint
	point	poin		roost	roosts	101	waltz	watzt
	shank	skank		flash	flesh	102		
	swill	swil	83	blank	bland	103		
60	flock	pluck	84			104	quint	quit
	three	these	85	ninth	aint		stalk	stalck
61	pulse	guise		brick	brich		crack	crank
	glass	glas		guest	quest	105	hatch	batch
	chest	thest		drool			smock	sock
62	claim	claime		crate			style	styla
	proof	prook		mount			thing	ing
63	tithe	title		swill			groin	grain
	stain	slain		crack	crach	106	tithe	style
	smock	crock				107		

Sujets	Stim.	Erreur
108		
109	EXCLU	
110		
111		
112		
113	quint	quist
	snail	shail
	churn	church
	proof	point
114	snail	small
	chant	rant
115	twine	twone
	crate	craine
	glass	glaze
	crane	crone
	three	tree
	smock	smack
	beard	browl
	cease	crease

Sujets	Stim.	Erreur
116	quint	quaint
	ninth	
	guest	quest
	lines	
	grain	drain
	blank	black
	crave	crase
	roots	roota
	swill	
117	space	spac
118		
119	hatch	batch
	guest	quest
120	point	paint
	verge	verger
	shank	shark
121	lurch	torch
	shank	shan
	smith	smit
	solve	snive
122	glass	glas
	roots	root
	solve	solv
123	spoil	spil
	roots	routs
	strut	stut
124		
125	roots	ts
	strut	strur
126	shawl	shaw
	hatch	snatch
	blink	bitch
	churn	chure
	mirth	mitch
	verge	verve
	tight	fight
	steam	stream
	style	styre
	groin	grain

Sujets	Stim.	Erreur
127	stray	strag
	sneak	suck
	tithe	lithe
	lurch	lunch
	flirt	first
	proof	goof
	smith	smilth
128	mirth	mirty
129	stray	strag
	claim	craine
	frock	track
	flock	flak
130	guest	quest
	dodge	doge
	death	
	price	prince
	roots	roostr
131	blank	bland
132	sound	soune
133		
134	grain	gralN
	price	pric
135	tithe	tirthe
	crack	creek
136	sneak	speak
137	ninth	bitch
	roots	roast
138	slosh	slog
	treat	threat
139	guest	quest
140	stain	stsin
141		
142	guest	quest
	treat	resat
	smear	swear
143	quint	quaint
144	stalk	sralk
	tithe	tith

Annexe VIII : Latences moyennes, pourcentage d'erreurs (%Err) et erreur standard (ES), pour chacun des 140 sujets

Sujet	Moyenne	% Err	ES	Sujet	Moyenne	% Err	ES
1	2427.08	1.67	20.75	49	2400.07	0.83	18.36
2	2286.20	0.83	18.67	50	2246.77	3.33	17.05
3	2531.68	0	17.85	51	2155.18	0.83	14.42
4	1770.92	1.67	12.19	52	1833.34	0	9.93
5	2269.13	1.67	20.86	53	2387.26	0	14.02
6	2202.58	0.83	14.46	54	2304.13	0	13.19
7	2206.98	0	16.98	55	2041.22	1.67	12.05
8	2205.89	2.50	15.53	56	2177.48	1.67	19.26
9	2025.96	5.00	14.86	57	2120.40	0	13.70
10	2187.11	0.83	12.48	58	2182.69	3.33	14.41
11	2057.07	1.67	15.98	59	1994.37	2.50	18.05
12	2231.70	1.67	13.54	60	2359.10	3.33	21.59
13	2423.02	3.33	18.15	61	2101.87	2.50	12.90
14	1876.86	0.83	13.88	62	1943.86	2.50	12.23
15	2295.96	0.83	15.26	63	2038.40	0	14.44
16	2018.59	0.83	13.34	64	1835.57	2.50	10.01
17	2127.09	0.83	14.80	65	2199.09	0.83	17.26
18	2336.75	1.67	15.25	66	2153.60	0.83	16.30
19	1981.60	5.00	11.11	67	1959.78	1.67	17.91
20	2177.42	0	15.07	68	2154.14	1.67	15.02
21	2080.66	7.50	9.39	69	2377.88	0	18.72
22	2119.74	0.83	18.38	70	2177.55	2.50	14.10
23	2010.28	1.67	14.16	71	2729.00	0	35.05
24	2215.19	5.83	14.48	72	1723.37	9.17	18.55
25	2032.76	2.50	13.90	73	1568.65	5.83	12.83
26	2344.33	3.33	23.07	74	1959.23	1.67	17.55
27	2193.54	1.67	13.17	75	1982.05	4.17	17.18
28	2002.22	1.67	9.95	76	1855.94	1.67	14.78
29	2277.36	0.83	13.75	77	1892.82	1.67	18.14
30	2489.77	2.50	29.81	78	2425.41	0	26.68
31	1930.61	2.50	13.26	79	1991.13	1.67	12.44
32	2014.64	0	16.84	80	1735.91	4.17	10.53
33	1775.11	6.67	14.89	81	2212.84	0.83	16.13
34	2272.88	0	19.56	82	1640.90	0.83	14.00
35	1995.53	2.50	22.69	83	1864.97	7.50	14.26
36	2355.66	2.50	18.95	84	2154.84	2.50	23.59
37	3008.82	0	39.53	85	2372.91	0	16.47
38	1984.22	3.33	11.66	86	2429.41	2.50	21.11
39	2067.86	3.33	12.99	87	2369.50	2.50	13.72
40	2058.81	0	13.92	88	2666.41	1.67	18.00
41	1971.57	1.67	10.34	89	2320.10	3.33	15.38
42	2452.13	1.67	21.65	90	2393.65	2.50	12.72
43	1983.34	4.17	12.07	91	2267.15	8.33	12.39
44	2070.76	0.83	12.08	92	2440.35	1.67	16.29
45	2525.45	5.83	15.21	93	2311.41	0.83	17.04
46	2029.75	3.33	13.67	94	2238.35	5.00	13.46
47	2007.21	2.50	14.92	95	2334.29	2.50	12.81
48	2071.65	1.67	10.95	96	2546.99	0.83	10.93

<b>Sujet</b>	<b>Moyenne</b>	<b>% Err</b>	<b>ES</b>
97	2600.08	2.50	13.85
98	2463.87	0.83	15.23
99	2420.05	0	13.65
100	2553.51	0	20.20
101	2238.56	3.33	15.82
102	2504.81	4.17	22.75
103	2275.77	0.83	12.66
104	3007.32	0	18.25
105	2451.65	0	14.48
106	2909.65	0	18.25
107	2712.31	0.83	15.59
108	2580.08	0	16.29
109	2297.53	5.00	13.49
110	2509.47	1.67	12.21
111	2601.23	7.50	19.93
112	2431.45	7.50	20.26
113	2527.04	0.83	13.25
114	2636.69	0.83	40.26
115	2294.49	5.83	19.36
116	2237.74	3.33	12.38
117	2528.79	4.17	14.90
118	2618.18	2.50	19.73

<b>Sujet</b>	<b>Moyenne</b>	<b>% Err</b>	<b>ES</b>
119	2239.29	3.33	12.90
120	2191.84	0	14.44
121	2117.91	1.67	14.27
122	2167.38	8.33	13.82
123	2037.43	5.83	14.02
124	2095.89	0.83	9.37
125	2112.88	4.17	12.76
126	2432.64	3.33	14.89
127	2439.37	0.83	14.77
128	2404.75	0.83	16.27
129	2281.66	0	14.70
130	2073.45	0.83	13.16
131	2383.24	1.67	18.67
132	2304.91	0.83	14.16
133	2143.05	1.67	14.02
134	2303.57	2.50	14.49
135	2065.36	0.83	12.52
136	2272.97	0.83	14.28
137	2531.16	1.67	23.22
138	2642.76	3.33	22.98
139	2271.64	0.83	12.37
140	2376.47	1.67	11.22

**Annexe IX** : Stimuli employés dans l'expérience 7 du chapitre 9 croisant la fréquence d'occurrence (haute, moyenne et basse) au nombre de syllabe (1 vs. 2). Le tableau donne pour chaque item le nombre de syllabes (S), la fréquence d'occurrence (F), la fréquence des bigrammes (BiF), le nombre de voisins orthographiques (N), le nombre de voisins orthographiques de plus haute fréquence (VHF), le temps de réponse moyen (TR) et le pourcentage d'erreurs (%Err).

Item	S	F	BiF	N	VHF	TR	% Err
<b>Monosyllabiques - Haute Fréquence</b>							
zeigt	1	159	4716	3	0	2040	0
sonst	1	188	2890	1	0	2032	0
Recht	1	168	20203	1	0	2145	0
sieht	1	218	14012	5	1	2121	0
Grund	1	238	1802	0	0	2111	0
sechs	1	193	11798	0	0	2077	0
Kraft	1	177	2362	1	0	2092	0
liegt	1	304	4978	7	0	2058	0
Blick	1	174	1552	1	0	2115	0
steht	1	388	12210	3	0	2153	6.67
kommt	1	403	2183	2	0	2080	0
durch	1	1189	7069	0	0	2024	0
jetzt	1	1243	7070	5	0	2016	0
schon	1	1446	6837	3	0	2106	0
nicht	1	7958	35480	7	0	2068	0
<b>Monosyllabiques - Moyenne Fréquence</b>							
Milch	1	43	2454	1	0	2180	0
wirkt	1	46	1041	5	0	2077	6.67
fragt	1	47	2799	0	0	2096	0
Blatt	1	45	1335	2	0	2139	0
Start	1	48	3014	4	2	2132	6.67
Druck	1	50	1147	1	0	2118	6.67
falls	1	50	1258	2	0	2139	0
sitzt	1	50	3827	3	1	2056	0
denkt	1	52	2593	7	0	2105	0
folgt	1	53	1769	0	0	2098	0
kennt	1	56	3004	4	1	2090	0
rasch	1	58	2229	1	0	2233	6.67
Sport	1	65	776	4	0	2279	0
knapp	1	65	287	0	0	2193	0
Geist	1	68	5066	6	0	2108	0
<b>Monosyllabiques - Basse Fréquence</b>							
Skalp	1	0	88	1	1	2175	0
Zwirn	1	0	208	0	0	2173	0
pellt	1	0	1327	4	2	2250	0
graut	1	0	1843	5	4	2187	0
lasch	1	0	2334	1	1	2125	0
Pfuhl	1	0	240	1	1	2236	6.67
sackt	1	0	2718	5	4	2092	6.67
Lachs	1	0	10828	4	1	2127	0
weiht	1	0	14311	6	6	2239	6.67
plump	1	1	162	1	0	2204	6.67
Drall	1	1	1406	2	1	2264	0
ziert	1	1	4024	4	2	2157	6.67
saugt	1	1	2889	2	1	1997	0
kippt	1	1	58	2	0	2184	0
Dolch	1	1	2589	2	1	2106	0
<b>Dissyllabiques - Haute Fréquence</b>							
Namen	2	202	17230	5	0	2249	6.67
Hilfe	2	211	1407	0	0	2090	0
seien	2	223	19998	1	1	2200	6.67
Augen	2	244	17500	4	0	2041	0
sogar	2	285	2035	0	0	2086	0
sehen	2	363	17514	8	0	2095	6.67
damit	2	407	4519	0	0	2127	0
Leben	2	453	20185	8	0	2091	0
dabei	2	512	10463	0	0	2209	0
Frage	2	623	4062	2	0	2137	0
etwas	2	720	2912	0	0	2113	0
unter	2	723	10370	2	0	2037	0
immer	2	1153	10021	1	0	2118	0
wurde	2	1675	10841	3	0	2214	0
haben	2	2497	25748	8	0	2117	0
<b>Dissyllabiques - Moyenne Fréquence</b>							
komme	2	40	1903	1	1	2172	0
Lehre	2	42	3580	5	0	2060	0
Werte	2	43	8218	7	2	2159	6.67
denke	2	43	2415	4	1	2198	0
bauen	2	44	15294	8	0	2113	0
bekam	2	50	718	0	0	2300	13.33
geme	2	55	5289	3	0	2169	0
herum	2	55	2653	1	0	2260	0
indem	2	57	3203	1	0	2113	6.67
Krise	2	60	4134	2	0	2120	0
Beruf	2	60	1719	0	0	2139	0
dahin	2	61	4169	1	1	2136	0
lesen	2	62	15225	6	1	2139	0
Menge	2	63	3682	0	0	2157	0
Motor	2	69	1152	1	0	2173	0
<b>Dissyllabiques - Basse Fréquence</b>							
Rappe	2	0	369	5	5	2330	13.33
adeln	2	0	739	1	0	2283	0
senil	2	0	3522	0	0	2252	0
Minne	2	0	5943	5	4	2243	13.33
laben	2	0	21513	8	8	2199	6.67
arges	2	0	4617	3	2	2317	0
Felge	2	1	1885	3	3	2233	0
ordne	2	1	2368	0	0	2385	0
waten	2	1	19885	8	5	2335	6.67
Kefir	2	1	71	0	0	2234	0
Pedal	2	1	1279	0	0	2231	6.67
hegte	2	1	9711	4	4	2171	13.33
herzu	2	1	1963	0	0	2319	6.67
Euter	2	1	9052	3	1	2105	6.67
intim	2	1	1121	0	0	2228	0

**Annexe X** : Stimuli employés dans l'expérience 8 du chapitre 9 croisant la fréquence d'occurrence (haute vs. basse) au nombre de lettres (3, 4, 5 et 6). Le tableau donne pour chaque item, la fréquence d'occurrence (F), la fréquence des bigrammes (BiF), le nombre de voisins orthographiques (N), le nombre de voisins orthographiques de plus haute fréquence (VHF), le temps de réponse moyen (TR) et le pourcentage d'erreurs (%Err).

Item	F	BiF	N	VHF	TR	% Err
<b>Mots 3 Lettres - Basse Fréquence</b>						
Gel	0	12	1	1	1838	0
Ahn	0	5899	2	1	1865	0
Fan	0	16314	4	2	1852	0
Lid	1	23	1	1	1855	0
pur	1	17323	4	4	1856	0
fad	2	976	2	2	1892	4.34
Weh	2	1744	4	4	1891	4.34
Wal	2	2679	4	4	1813	0
Huf	3	44805	4	4	1834	0
Jod	4	761	3	2	1843	0
Ohm	4	6485	3	2	1976	4.34
Dur	5	17327	3	2	1917	4.34
Hai	7	2141	5	3	1874	4.34
Jux	8	52	3	1	1812	0
Jet	10	20	2	0	1871	0
<b>Mots 4 Lettres - Basse Fréquence</b>						
Napf	0	1286	1	1	1862	0
Gral	0	7062	7	7	1897	0
Maat	0	7222	3	3	1921	4.34
Zimt	1	1539	2	0	1808	0
Dill	1	18249	1	1	1868	8.69
Mief	1	23406	4	4	1957	0
Laib	3	2127	2	2	1866	0
Torf	3	9995	4	2	1841	0
karg	3	17459	2	2	1879	0
Mohn	4	6335	4	3	1877	0
Dung	4	7374	2	2	1893	0
Milz	5	7149	3	0	1913	4.34
Samt	8	1576	4	3	1805	0
zahn	9	8652	3	2	1800	43.5
derb	10	12733	2	1	1933	8.69
<b>Mots 5 Lettres - Basse Fréquence</b>						
Kropf	0	7024	2	2	1872	8.69
Stunk	1	9594	3	1	1897	0
First	0	8272	4	4	1945	8.69
Spind	2	7618	2	1	1854	0
Pfahl	3	1394	1	0	1821	4.34
Streu	3	7367	2	2	1827	0
Lauch	3	19055	4	3	1867	0
Molch	3	18839	3	3	1892	0
drehn	4	7153	3	2	2058	8.69
plump	4	418	1	0	1919	4.34
Spatz	5	6743	2	1	1800	0
knien	6	5031	2	1	2022	17.39
Biest	6	11849	3	1	1870	4.34
Trott	8	5715	3	3	1882	0
Kelch	10	18289	1	1	1826	0
<b>Mots 3 Lettres - Haute Fréquence</b>						
Rad	151	1570	3	2	1841	0
Hut	168	4323	6	3	1793	4.34
Ost	179	44736	4	2	1866	0
Typ	245	490	1	0	1833	0
See	342	823	6	1	1792	0
Zug	357	737	2	0	1792	0
Hof	359	718	1	0	1844	0
Ort	480	2583	2	1	1895	0
Amt	484	968	6	1	1840	4.34
Ruf	529	45193	5	1	1840	0
Tod	712	2034	3	0	1840	0
neu	780	1591	2	0	1841	4.34
Bad	821	2553	5	0	1848	0
Tun	102	6784	4	3	1880	4.34
gut	3109	7261	5	0	1758	0
<b>Mots 4 Lettres - Haute Fréquence</b>						
Berg	212	8132	2	0	1791	0
froh	217	2749	3	1	1823	4.34
Blut	240	2765	3	0	1793	0
Haar	247	11362	3	1	1820	0
Plus	31	3423	2	1	1848	8.69
Gold	280	13227	4	1	1819	4.34
Glas	358	3028	1	0	1755	0
Kurs	361	2534	1	0	1836	0
Herz	471	14798	4	1	1794	0
Plan	589	3606	2	0	1891	0
Luft	625	2684	4	0	1810	4.34
frei	798	15965	3	1	1853	0
Rund	12	29747	12	6	1874	0
Kopf	1195	4017	2	0	1844	0
Frau	2955	11555	3	0	1842	0
<b>Mots 5 Lettres - Haute Fréquence</b>						
klein	210	4381	1	0	1967	13.04
Brust	246	10684	2	0	2052	4.34
Fahrt	338	5152	2	0	1882	4.34
Sport	390	4852	5	0	1855	0
Blatt	271	8765	3	0	1883	0
meist	470	15286	9	0	1964	4.34
Kunst	593	11457	2	0	1800	4.34
Druck	594	7976	2	0	1796	4.34
Angst	596	8480	1	0	1872	0
Punkt	653	5997	2	0	1820	4.34
Preis	716	7488	4	0	1911	8.69
stark	878	18584	3	0	1848	4.34
Stadt	1889	18759	3	0	1802	0
Platz	1265	8677	1	0	1855	4.34
Kampf	1565	6522	1	0	1823	0

Mots 6 Lettres - Basse Fréquence							Mots 6 Lettres - Haute Fréquence						
Schorf	0	9784	2	1	1945	4.34	Streit	234	3719	2	0	1910	0
morsch	0	9298	3	3	1918	0	Flucht	238	5371	3	0	1829	4.34
Punsch	0	11936	2	2	1989	4.34	Ramsch	213	9793	1	0	1969	0
Brunft	1	839	1	0	2028	13.6	Schuld	255	10748	2	0	1824	0
Schrot	2	9924	1	1	1959	4.34	Schlag	203	12120	1	0	1877	4.34
Gracht	3	4773	5	4	1990	0	Herbst	303	12466	4	0	1893	0
Matsch	3	9231	3	1	1824	0	Schiff	308	11485	1	0	1850	13.1
Schalk	3	10030	3	1	1896	0	Schutz	365	11002	4	0	1859	0
Klecks	4	3990	1	0	1824	0	Dienst	418	9320	1	0	1848	0
Schelm	4	10279	1	0	1806	0	Freund	482	3189	1	0	1835	0
Schuft	4	10832	3	2	1979	0	Wunsch	573	12480	1	0	1863	0
Bausch	5	9369	3	2	1933	8.69	rechts	412	15150	2	0	1865	0
Frosch	5	9749	1	0	1804	0	schwer	897	12377	3	0	1870	4.34
seicht	6	11498	5	4	1964	8.69	leicht	1046	8387	5	0	2132	0
dreist	6	11728	4	1	2005	0	nichts	3652	21434	4	0	1850	0

**Annexe XI** : Stimuli employés dans l'expérience 9 du chapitre 9 croisant le nombre de syllabes (1 vs. 2) au nombre de lettres (4, 5 et 6). Le tableau donne pour chaque item, le nombre de syllabes (S), la fréquence d'occurrence (F), la fréquence des bigrammes (BiF), le nombre de voisins orthographiques (N), le nombre de voisins orthographiques de plus haute fréquence (VHF), le temps de réponse moyen (TR) et le pourcentage d'erreurs (%Err).

Item	S	F	BiF	N	VHF	TR	%Err
<b>Monosyllabiques - 4 Lettres</b>							
Span	1	2	1363	3	2	1882	0
Latz	1	2	3529	1	1	1823	0
Firn	1	5	21265	2	1	2050	26.08
Beet	1	3	1587	2	2	2014	0
Laib	1	3	2127	2	2	2003	4.54
Kauz	1	6	5775	1	1	1857	4.34
Lump	1	4	932	1	0	1907	0
Huld	1	4	4934	2	2	1952	4.34
Dung	1	4	7374	2	2	1984	0
Keks	1	5	408	1	1	1887	0
Teig	1	5	42943	2	1	1917	0
Floh	1	6	1337	3	2	1917	0
Wurm	1	11	3115	2	2	1858	0
Garn	1	11	7561	3	0	1956	0
Magd	1	18	6936	1	1	1896	8.69
<b>Monosyllabiques - 5 Lettres</b>							
Tropf	1	2	4141	1	0	1944	0
Spind	1	2	7618	2	1	1947	0
Pfahl	1	3	1394	1	0	1899	0
Wulst	1	3	6699	1	1	1892	4.34
Lauch	1	3	19055	4	3	1832	0
Spreu	1	4	1563	1	0	1883	4.54
Trupp	1	4	3527	2	1	1938	13.63
Spatz	1	5	6743	2	1	1896	0
Frack	1	6	7742	3	1	1889	0
Biest	1	6	11849	3	1	1943	0
Quarz	1	7	1787	2	0	1865	13.04
Dolch	1	8	18854	2	1	1897	0
Kelch	1	10	18289	1	1	1875	0
Zwerg	1	11	1303	1	1	1876	0
Groll	1	13	4282	1	0	1908	4.54
<b>Monosyllabiques - 6 Lettres</b>							
Schrot	1	2	19476	1	1	1941	0
Dorsch	1	2	9300	2	1	1888	0
Schall	1	2	10030	2	2	1891	0
Knacks	1	2	979	1	0	1973	0
Schopf	1	3	9619	1	0	1901	9.09
Matsch	1	3	9231	3	1	1845	0
Klecks	1	4	3990	1	0	1933	0
Schuft	1	4	10832	3	2	1980	0
Frosch	1	5	9749	1	0	1913	0
Bausch	1	5	9369	3	2	2032	13.04
Schelm	1	4	10279	1	0	1962	0
Splitt	1	8	403	1	0	1977	13.04
Strang	1	12	4530	1	1	1894	4.34
Schwur	1	13	10512	3	1	2054	0
Kitsch	1	17	9226	1	0	1935	4.54
<b>Dissyllabiques - 4 Lettres</b>							
Nixe	2	2	41	2	0	1902	9.09
Amok	2	2	55	1	1	1908	9.09
Koma	2	2	496	3	0	1901	0
Toga	2	3	690	1	0	1956	4.34
Odem	2	3	13970	3	1	1899	0
Vene	2	3	41476	3	3	1932	0
Poet	2	4	66	1	1	1903	0
Oval	2	5	188	2	0	2025	21.73
Affe	2	6	189	1	0	1988	4.76
Lama	2	6	3498	2	2	1882	0
Soda	2	7	450	3	1	1891	4.54
Judo	2	8	3658	1	1	1933	0
Jura	2	9	3769	1	1	1932	0
Lava	2	13	1867	1	0	1917	0
Ebbe	2	17	6489	3	1	1991	21.73
<b>Dissyllabiques - 5 Lettres</b>							
Tumor	2	2	3021	3	2	1902	0
Juwel	2	2	4299	1	1	1921	0
Talar	2	2	6937	2	1	1959	4.34
Radau	2	3	2886	1	1	2010	4.54
Wespe	2	3	5270	2	1	1961	4.54
Belag	2	4	2398	1	1	1929	4.34
Droge	2	4	13651	1	0	1891	0
Truhe	2	5	5057	2	0	1915	0
Nelke	2	6	2618	2	0	1926	4.54
Ampel	2	7	4028	1	0	1911	0
Untat	2	8	11238	2	1	2015	0
Ochse	2	8	16771	3	1	1894	0
Modus	2	10	2722	1	0	1903	0
Saldo	2	12	4097	2	0	2046	0
Tadel	2	14	16846	3	2	1934	0
<b>Dissyllabiques - 6 Lettres</b>							
Nektar	2	2	5167	1	1	1985	4.34
Insekt	2	3	4406	1	0	1995	4.54
Pappel	2	3	10637	2	1	1952	4.54
Umhang	2	3	11694	2	2	1994	0
Blende	2	4	9032	2	1	1932	8.69
Relikt	2	4	10740	1	1	1981	8.69
Klippe	2	5	3693	2	2	1908	0
Rebell	2	5	12012	1	0	2025	0
Ausruf	2	6	7623	1	1	1918	9.09
Abhang	2	6	11082	2	2	2022	0
Glatze	2	7	6373	3	1	1949	0
Frisur	2	7	7203	1	0	1969	4.54
Krippe	2	9	6464	3	1	1987	4.34
Pfanne	2	11	3308	1	0	1860	0
Kuppel	2	14	8520	3	1	1875	0

# Appendice I

# MROM-P : An interactive activation, multiple read-out model of orthographic and phonological processes in visual word recognition

Arthur M. Jacobs

Philipps Universität, Marburg, Germany

Arnaud Rey

CNRC-CNRS, Marseille, France

Johannes C. Ziegler

CREPCO-CNRS, Marseille, France

Jonathan Grainger

CREPCO-CNRS, Marseille, France

## Abstract

This chapter introduces a localist connectionist model of orthographic and phonological processes in visual word recognition : the Multiple Read-Out Model including Phonological units, or the MROM-P. Unlike its predecessor, the MROM (Grainger & Jacobs, 1996), the present model includes sublexical and lexical phonological processes. This model is examined with respect to its ability to account for two major effects obtained in the visual lexical decision task : the pseudohomophone effect and the bidirectional consistency effect. Both of these effects demonstrate bidirectional influences of orthographic and phonological processes in the lexical decision task. None of these effects have been quantitatively accounted for by any other computational model. The MROM-P is able to simulate both effects with identical parameter sets, tuned on an independent set of data. The results of a criterion-guided evaluation of the model suggest that MROM-P is a promising prototype for a general model of visual word recognition.

---

Arthur M. Jacobs, Brain & Language Group, Center for Research in Cognitive Neuroscience, CNRS, Marseille, France, and Department of Psychology, Philipps-University of Marburg, Germany ; Arnaud Rey and Johannes C. Ziegler, Brain & Language Group, Center for Research in Cognitive Neuroscience, CNRS, Marseille, France ; Jonathan Grainger, CREPCO, CNRS and Université de Provence, Aix-en-Provence, France.

This research was supported by a grant from the "Deutsche Forschungsgemeinschaft" to A. Jacobs (Teilprojekt 7 der Forschergruppe "Dynamik kognitiver Repräsentationen"), a grant from the French Ministry of Education and Research (n°95124, programme Sciences Cognitives) to A. Rey, and a German Academic Exchange Service Grant (DAAD-Doktorandenstipendium aus Mitteln des zweiten Hochschulsonderprogramms) to J. Ziegler. Correspondence concerning this article should be addressed to A. Jacobs, Philipps-University of Marburg, Psychology Dept., Gutenbergstraße 18, D-35037 Marburg. Electronic mail may be sent to JACOBSA@MAILER.UNI-MARBURG.DE

## INTRODUCTION

*"The world is worded before it is sentenced" (variation on a theme by Humboldt).*

## READING, WORD RECOGNITION, AND THE LEXICAL DECISION TASK

*"The world of words is just as wondrous as the world of syntax, or even more so. For not only are people as infinitely creative with words as they are with phrases and sentences, but memorizing individual words demands its own special virtuosity" (Pinker, 1994, p. 127).*

The general subject area of this paper is reading. As perhaps the finest achievement of human civilization and one of the most complex activities of the human mind, explaining the whys and hows of reading skill represents an outstanding intellectual challenge for cognitive scientists. Since word recognition is the fundamental process underlying reading skill, it provides the favorable focus for experimental reading research. At the level of word representations, all lower- and higher-level processes involved in reading seem to meet: Word representations are the central building blocks of language learning and processing (cf. Miller, 1993). It is here that sensory, orthographic, phonological, morphological, semantic, and syntactic operations converge and diverge. The problem is to find out how these central representations are organized and how they interact with both lower- and higher-level processes that depend on task or language contexts. Solving this problem necessarily involves a multistep approach. Before tackling, for example, problems of word or sentence production that reflect the "infinite creativity with words", we try to solve the problems concerning the perceptual and mnemonic organization of lexical memory that are the basis of the "special virtuosity" mentioned in the above citation. Before tackling problems or morphosemantic and -syntactic processing of words, we try to answer simpler questions concerning orthographic and phonological processing<sup>2</sup>.

Word recognition and reading are studied using a variety of experimental techniques, that still require a fair amount of methodological and theoretical unification (Jacobs & Grainger, 1994; see also discussion section). The most widely used modern experimental method for investigating visual and auditory word recognition is the lexical decision task (LDT). Like any other experimental technique, it provides only indirect and incomplete information about the processes underlying word recognition, and therefore requires cognitive modeling as a complement to experimental analyses. This paper focuses on such a model of word recognition performance as assessed by the LDT.

## ORTHOGRAPHIC AND PHONOLOGICAL PROCESSING : A MODEL-GUIDED, MULTILINGUISTIC, MULTITASK PERSPECTIVE BASED ON THREE SKEPTICISMS

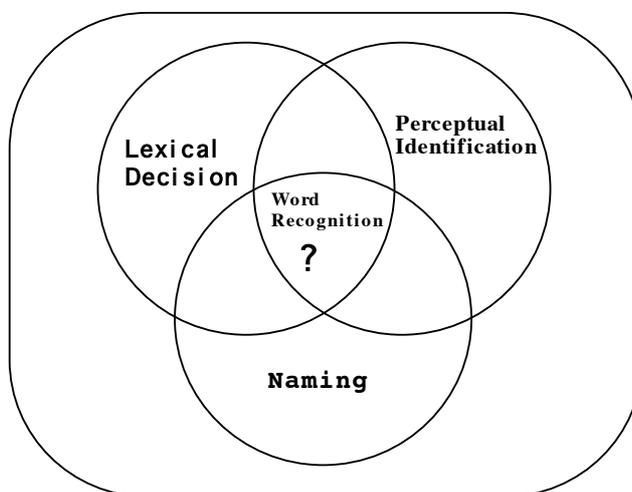
From an evolutionary perspective, writing and reading evolved because humans needed a convenient means of coding and decoding oral language -which, as a means of externalization of thoughts, presumably had already stood its test on the scale of survival values- for purposes of storage, transmission, and tradition. In alphabetic writing systems, the individual elements of the alphabet correspond to the elementary sounds of the spoken language. The degree of this correspondence (its consistency) is variable and object of much (psycho)-linguistic research. In some places many-to-many mappings evolved (e.g., English and French), whether "naturally", following invasions, or via spelling reforms, whereas in others something closer to one-to-one mappings between script and sound evolved (e.g. Serbo-Croatian or Spanish). This considerable variation across languages in the degree of correlation, or the consistency of the spelling-to-sound and the sound-to-spelling mappings ("deep" vs. "shallow" orthographies) provides a rich playground for crosslinguistic experimental studies of reading skills (Carello, Turvey, & Lukatela, 1992; Frost, Katz, & Bentin, 1987; Perfetti, Zhang, & Berent, 1992). Such studies have their costs, but for understanding the reading process they are more interesting than monolingual studies. Moreover, these considerable crosslinguistic variations in consistency also provide a big challenge for researchers who aim at building computational multilingual, multitask models of reading (Carreiras, Perea, & Grainger, in press; Dijkstra & Van Heuven, present volume; Jacobs, 1995; Ziegler, 1996).

Our research program, of which the present modeling efforts are an integral part, is multilingual, because we are skeptical about the view that the reading process can be understood by studying a single language. Instead, as many examples show, cross-linguistic research can avoid the dangers of premature or false conclusions drawn from the results of monolingual work (Carello et al., 1992; Hagege, 1986; MacWhinney, Bates, & Kliegl, 1984; Lass, 1995; Marcus, Brinkmann, Clahsen, Wiese, & Pinker, 1995; Perfetti et al., 1992; Van Orden & Goldinger, 1994). Currently, our research program directly includes three

<sup>2</sup> Orthographic processing refers to the use of orthographic information, i.e. knowledge of the spellings of words. In alphabetic languages such as English, French, or German, we assume that such knowledge is letter-based. In particular, knowledge of how to spell a word is thought to be stored as a set of abstract representations that code both the identity and position of a word's component letters. Phonological processing refers to the use of phonological information (i.e., knowledge of the sounds of one's language) in processing written and oral language. The question which functional units code that knowledge is more complex than for orthographic processing, as discussed in the text.

languages (French, German, and English), and indirectly encompasses Dutch, Spanish, and Italian via scientific collaborations.

Orthographic-phonological processing is well-suited to illustrate the benefits of both multilinguistic research (Frost et al., 1987) and model-guided multitask research (Grainger & Jacobs, 1996). Well-planned combinations of multilinguistic and multitask research could quickly advance our understanding of the constraints involved in reading (Jacobs, 1995 ; Ziegler, 1996). Under the optimality assumption<sup>3</sup>, would we expect that users of English orthography develop the same reading strategies (and the underlying representations and processes) as users of French or German? Consider some recent descriptive, statistical data on spelling-to-sound and sound-to-spelling consistency for English and French (Stone, Vanhoy, & Van Orden, 1997 ; Ziegler, Jacobs, & Stone, 1996 ; Ziegler, Stone, & Jacobs, in press a). These authors estimated that about 72% of all English monosyllabic words are feedback inconsistent (i.e., their phonologic bodies can be spelled in multiple ways) whereas about 31% are feedforward inconsistent (i.e., their spelling body has more than one pronunciation). In comparison, about 79% of all monosyllabic French words are feedback inconsistent whereas only 12% are feedforward inconsistent. Given this data, could we expect that users of English and French both have problems in tasks that require a solid spelling knowledge (e.g., proof reading or LDT), but that users of French have less problems in naming tasks than users of English. What about users of "shallow" orthographies, such as German ? Do users of German fare well regardless of task demands ? If so, they could serve as a control group for comparison with the performance of the two other populations, making the estimation of language-dependent effect sizes possible (Jacobs, 1995 ; Ziegler, 1996).



**Figure 1.** Venn diagram illustrating the concept of functional overlap (for details see Grainger & Jacobs, 1996 ; Jacobs, 1994 ; Jacobs & Grainger, 1994).

We are also skeptical about the view that the reading process can be understood by using a single experimental paradigm. Surely, different reading tasks (e.g., LDT, naming task, perceptual identification task) capture some identical and some different aspects of the reading process. However, there is no model-free way to determine which of those aspects are relevant to an understanding of the reading process, and which are purely task-specific. Pursuing our stratagem of modeling functional overlap illustrated in Figure 1 (Grainger & Jacobs, 1996 ; Jacobs, 1994 ; Jacobs & Grainger, 1994), in the present paper we attempt to gain a better understanding of phonological processes that may be common to silent reading and reading aloud, as assessed by the LDT, perceptual identification and naming task.

Finally, we are skeptical about the view that reading can be fully understood by viewing it as a one-way process, which exclusively proceeds from print to sound. In practice, this classical view has led to a separation of models, methods, factors (variables), and effects stressing either orthographic or phonological aspects. An example is the separation of experimental psychologists in an "orthographic" and a "phonological camp". For example, the orthographic camp prefers the LDT, orthographic variables (e.g., measures of orthographic neighborhood), and models that focus on the explanation of orthographic effects. In contrast, the phonological camp favors the naming task, phonological variables (e.g., consistency measures), and models that focus on the explanation of phonological effects (see recent special section of the *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 1994, on modeling visual word recognition). If the

<sup>3</sup> Regardless of the reasons for the variability in the spelling-to-sound and sound-to-spelling mappings, evolutionary perspectives of cognitive psychology (e.g. Anderson, 1990 ; Shepard, 1994) must start with the premise that users of variable linguistic environments optimally adapt(ed) to their corresponding orthography-to-phonology and phonology-to-orthography mappings. Such an optimality assumption facilitates formal analyses (Massaro & Friedman, 1990), which are applied here to the domain of orthographic and phonological processing in different tasks and languages.

reading system is interpreted as an interactive, dynamical system<sup>4</sup> (Grossberg & Stone, 1986 ; Korte, 1923 ; Rumelhart, 1977 ; Stone et al., 1997 ; Van Orden & Goldinger, 1994), models, methods, and measures must be developed that adequately reflect and help analyze the functioning of such a complex nonlinear system. According to our view (e.g., Ziegler, Van Orden, & Jacobs, in press b), reading is a two-way system : Phonological information and phonological skills influence orthographic processing, and orthographic information and orthographic skills also influence phonological processing (Jakimik, Cole, & Rudnicky, 1985 ; Dijkstra, Roelofs, & Fieuws, 1995 ; Wagner and Torgesen, 1987). From this perspective, single-task approaches to reading, measures of orthographic neighborhood (Coltheart, 1978), metrics of spelling-to-sound consistency (Rosson, 1985 ; Treiman, Mullennix, Bijeljac-Babic, & Richmond-Welty, 1995 ; Venezky & Massaro, 1987), or monotask models of performance must necessarily remain incomplete approximations. The study of bidirectional, two-way consistency effects (Stone et al., 1997 ; Ziegler et al., 1996, in press a ; Ziegler, Montant, & Jacobs, in press c) which we will discuss below, and our present attempt to model them represent a step beyond this one-way approach to reading.

## A PRINCIPLED APPROACH TO COGNITIVE MODELING

It is useful to note here that our approach to understanding the reading process by help of formal cognitive models follows a set of pragmatic stratagems and principles that are outlined in several recent papers (Grainger & Jacobs, 1996 ; Jacobs, 1994 ; Jacobs & Grainger, 1994) and further discussed in Grainger and Jacobs (present volume). The most relevant stratagem for the present paper is *nested modeling*, that is the idea that a new model should either include the old one as a special case by providing formal demonstrations of the inclusion, or dismiss with it, after falsification of the core assumptions of the old model. The development of our *Multiple Read-Out Model* (MROM) gives a detailed example of nested modeling in the domain of orthographic processing in lexical decision and perceptual identification tasks (Grainger & Jacobs, 1996). In the present paper, we further pursue our efforts concerning nested modeling of visual word recognition by including elementary phonological processes into the MROM that thus becomes the MROM-P.

## SUBJECT AREA

In this section two empirical phenomena that are considered as evidence for phonological and bidirectional influences on visual word recognition, *the pseudohomophone effect* and *the bidirectional consistency effect*, are used as empirical touchstones to test the MROM-P.

### THE PSEUDOHOMOPHONE EFFECT

The first phenomenon is the classical pseudohomophone effect. As regards the LDT, it refers to the observation that nonwords that sound like words when read aloud (e.g., BRANE) are more difficult to reject than nonpseudohomophonic control stimuli (e.g., FRANE ; Rubenstein, Lewis, & Rubenstein, 1971). Since the precursor of our present model, the MROM (which is briefly discussed in the next section) does not include any phonological processes, it should not be able to simulate the pseudohomophone effect in the LDT, if the effect is a genuine phonological one. Thus, the first critical test for the MROM-P is to evaluate its ability to capture the pseudohomophone effect. As a testing ground, we chose the classical set of data by Coltheart, Davelaar, Jonasson, and Besner (1977), and a set of data from a more recent replication study by Seidenberg, Petersen, MacDonald, and Plaut (1996).

### THE FEEDFORWARD AND FEEDBACK CONSISTENCY EFFECTS

The second phenomenon, only very recently discovered, provides perhaps the strongest experimental evidence for an interaction between orthographic and phonological processes in visual word recognition. It combines two effects : the traditional feedforward consistency effect and the newly discovered feedback consistency effect (Stone et al., 1997 ; Ziegler & Jacobs, 1995 ; Ziegler et al., in press c).

Effects of spelling-to-sound (*feedforward*) consistency have been studied extensively in the naming task, i.e., a task requiring overt pronunciation. The standard result is that naming latencies are longer and/or spelling errors more frequent for *inconsistent* words that have multiple spelling-to-sound mappings than for *consistent* words whose spelling bodies are always pronounced the same. Thus, an inconsistent word whose body has several possible pronunciations like *\_OUGH* in COUGH, DOUGH, THROUGH, BOUGH, TOUGH will be harder to pronounce than a consistent word like DUCK that has a unique spelling body (*\_UCK*). The known conditions favorable to obtaining this effect (see Ziegler et al., in press c) include alphabetic writing systems (e.g., absence of consistency effects in a logographic writing system such as Japanese Kanji ; Wydell, Butterworth, & Patterson, 1995), inconsistent words of low frequency (Andrews, 1982 ; but see Jared, 1995), and words with a consistency ratio smaller than .5 (i.e., the ratio given by the

<sup>4</sup> A view now shared by extant former representants of traditional modular, noncomputational, feedforward models of the reading process (e.g., Coltheart et al., 1993 ; Coltheart & Rastle, 1994 ; Norris, 1994 ; for a different view see Messner & Cohen, 1994).

summed frequency of *friends* -words with the same spelling pattern and the same pronunciation- and the summed frequency of *enemies* -words with the same spelling pattern but a different pronunciation-, Jared, McRae, & Seidenberg, 1990 ; Treiman et al., 1995).

In contrast, in the LDT, feedforward inconsistency effects are much less clear. To the extent that the LDT does not require an overt pronunciation, it is also less likely to be sensitive to feedforward consistency (Jared et al., 1990). Two more recent studies (Brown, 1987 ; Jared et al., 1990) that used more carefully controlled stimuli than older studies failed to find an effect. In contrast, Stone et al. (in press) provided one of the first experimental demonstrations of a feedforward consistency effect in the LDT using English-speaking participants (see Pugh, Rexer, & Katz, 1994, for an earlier demonstration).

Stone et al. (1997) found that mean LDT-latency to feedforward inconsistent words was 48 ms longer than for feedforward consistent words when all words were feedback consistent. For words that were feedback inconsistent (i.e., whose phonological body maps into more than one spelling, such as /\_ip/ in DEEP and HEAP), the effect decreased to 8 ms. This suggests that previous studies might have failed to detect the effect because they did not control for feedback consistency. Recently Ziegler et al. (in press c) replicated this effect in French. They obtained similar effects to Stone et al. : a 55 ms effect for feedback consistent words that decreased to 13 ms when feedback inconsistent words were used. To the extent that this effect can be successfully replicated, and given that the LDT requires no overt pronunciation, the feedforward consistency effect in the LDT provides stronger evidence for bidirectional influences of orthographic-phonological processes in visual word recognition than the results from the naming task reported above.

Effects of sound-to-spelling (*feedback*) consistency are a recent discovery in psycholinguistics. For English, feedback consistency effects have been reported both in the visual lexical decision task and in the letter search task (Hooper & Paap, in press ; Stone et al., in press, Ziegler & Jacobs, 1995 ; Ziegler et al., in press c). For the present chapter, we concentrate on the effect reported by Stone and collaborators. In two lexical decision experiments, Stone et al. found a reliable *feedback consistency effect*. Words with phonological bodies that could be spelled more than one way produced slower correct "yes" responses and more errors than words with phonological bodies that could be spelled only one way. In their Experiment 2, they used a factorial design that included four types of words : (1) bidirectionally consistent words such as DUCK, in which the spelling body (\_UCK) could be pronounced only one way, and the pronunciation body (/\_uk/) could be spelled only one way, (2) feedforward inconsistent words such as MOTH, in which the spelling body could be pronounced more than one way (e.g., BOTH), but the pronunciation body (/\_oth/) could be spelled only one way, (3) feedback inconsistent words such as HURL, in which the spelling body could be pronounced only one way, but the pronunciation body could be spelled more than one way (e.g., GIRL), and (4) bi-directionally inconsistent words such as WORM, in which the spelling body could be pronounced more than one way (e.g., DORM), and the pronunciation body could be spelled more than one way (e.g., FIRM). Stone et al. found that lexical decision performance was equally affected (longer RTs and more errors) for feedforward inconsistent words, feedback inconsistent words, and bi-directionally inconsistent words. Only words that were both feedforward and feedback consistent produced better performance. Bi-directionally inconsistent words did not affect performance over and above of what was obtained for words that were inconsistent only one way (feedforward only or feedback only).

Ziegler et al. (in press c) replicated Stone et al.'s results in English in more carefully controlled conditions in French. They excluded the possibility that the feedback consistency effect obtained in English resulted from a failure to match feedback consistent and inconsistent items on a number of orthographic neighborhood variables. This replication is of particular interest. Since statistical analyses showed that the structure of French and English with respect to feedback inconsistency is highly similar for these two languages (Ziegler et al., 1996 ; in press a), similar feedback consistency effects were predicted for English and French. This being the case, their results join those of Stone et al. to suggest that visual word perception is affected by both feedforward and feedback consistency.

An important aspect of this effect is that feedback inconsistency may explain small and/or unreliable consistency effects in previous studies. Ziegler et al. (1996) analyzed all French words that would traditionally have been classified as "consistent" on the basis of spelling to phonology correspondences (87.6% of all monosyllabic words). In traditional experiments on consistency effects, these "consistent" items serve as control items against which the processing cost of inconsistent items is tested. Ziegler et al. (in press a) calculated that 77.4% of these presumably "consistent" items were, however, feedback inconsistent. Thus, small and/or unreliable consistency effects in previous studies may have resulted from the possibility that the major part of the presumably consistent control items was feedback inconsistent. Another interesting aspect of feedback inconsistency is that it should be an important variable for crosslinguistic research on spelling. If multiple possibilities of mapping phonology into spelling affect spelling performance, it should be harder in a feedback inconsistent language (e.g., French) than in a relatively feedback consistent language (e.g., Spanish).

Considering these arguments, it seems clear that psycholinguistic experiments should be controlled for feedback consistency and further research is needed to specify its influence. In this respect, the present attempt to give a formal account of this effect will, if successful, provide us not only with a tool for making predictions, but also with a formal means for stimulus selection and control. For example, simulations by MROM-P could be used in the planning phase of an experiment -together with statistical analyses- to make sure that the stimuli are well matched on the feedback consistency variable.

To our knowledge, neither the pseudohomophone effect, nor the feedforward and feedback consistency effects in the LDT have been given any formal account by a computational model so far. Preformal (verbal or boxological) accounts of both effects exist in the literature, but we will not consider them here (for arguments concerning the strengths and weaknesses of, and the complementarity between, different model formats, see Jacobs & Grainger, 1994). Note however that any model that does not assume automatic activation of -and feedback from- phonological representations in the visual LDT does not lead us to expect any effect of feedforward or feedback consistency, while models of the resonance/interactive activation family (for a classification of models, see Jacobs & Grainger, 1994) suggest such an effect rather naturally, that is, without going through pains of adding auxiliary assumptions (Stone et al., 1997 ; Ziegler et al., in press b, c). The present simulation studies will tell us whether this intuition matches the computational evidence.

## MODEL PRESENTATION

### MODEL HISTORY

The scientific adventure of interactive activation models of cognitive processing has a rich history. The conceptual ingredients that characterize this family of models can be traced back to many authors in different fields such as biological cybernetics, artificial intelligence, and psychology (e.g. Arbib & Caplan, 1979 ; Erman & Lesser, 1975 ; Grossberg, 1976, 1980 ; Levin, 1976 ; Marslen-Wilson & Welsh, 1978 ; Morton, 1969 ; Rumelhart, 1977 ; for a detailed history see Rumelhart & McClelland, 1986). As far as word recognition is concerned, the adventure started for us with the publication of the two papers by McClelland and Rumelhart (1981) and Rumelhart and McClelland (1982), in which all the different conceptual ingredients were synthesized in an original and formal way, allowing direct applications to psycholinguistic studies.

Why did we choose this model format and type? Before the interactive activation model (*IAM*), basically two model formats were used in the word recognition literature : verbal or V-type models (any model that is expressed verbally or graphically without making use of closed-form or algorithmic formulations) and mathematical, or M-type models (models that use closed-form expressions to represent the modeled section of reality). The IAM introduced algorithmic, or A-type models (models that are implemented in form of a simulation program, including production systems and neural nets of the localist or distributed families) to the field.

Apart from well-known innovative aspects that distinguished the IAM from its precursors (Jacobs & Grainger, 1992), it offered three possibilities that neither V-type, nor M-type models could provide as a whole. First, it possessed dynamics, and thus offered two important possibilities : i) time-dependent predictions, and ii) interval-scaled modeling of RT as a dependent variable<sup>5</sup>. McClelland and Rumelhart (1981) and Rumelhart and McClelland (1982) had only exploited the first of these possibilities. We were also much interested in the second, given that RT is the major dependent variable in psycholinguistic research (mainly due to the popularity of the LDT and naming task). Second, the IAM possessed a (toy) lexicon which made item-specific (fine-grained) predictions possible. To us, this seemed a logical necessity in a field that has to evaluate its empirical effects with respect to subject- and item-specific data. In addition, if one believes in the virtues of strong scientific inference (see Grainger & Jacobs, present volume), fine-grained analyses are a necessity : Falsificationism and strong inference are not the only research strategies, but they seem to be the best ones whenever theorists are concerned with specific assumptions that can be tested at the level of fine-grained analyses (Jacobs & Grainger, 1994 ; Massaro & Cowan, 1993). Third, contrary to other models, the IAM rather than being definitive, possessed rich structural potential and appeared to include the promise of interesting further developments. For a reasonable application of the stratagems of nested and canonical modeling (Grainger & Jacobs, 1996), structural potential is a necessary (but not a sufficient) condition. The IAM, as the prototype of a canonical resonance model (Stone & Van Orden, 1994), allows the testing of system and design principles, to which one can attribute explanatory credit and blame independently of other aspects of the model (Grainger & Jacobs, present volume).

In sum, by its original combination of formal preciseness, structural-computational richness, and computational transparency (a feature that distinguishes it from most PDP models), the IAM intuitively seemed the right model at the right time to allow falsifiable quantitative predictions, and the discovery of new phenomena via simulations, the so-called *neighborhood frequency effect*, discussed below.

### PREDICTING A NEW PHENOMENON : THE DISCOVERY OF THE NEIGHBORHOOD FREQUENCY EFFECT

*"Only theories tell us what can be observed" (variation on a theme by Einstein)*

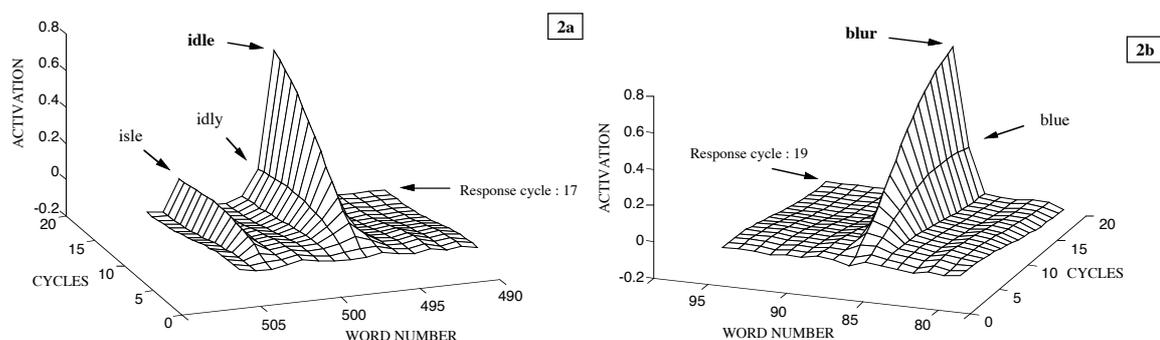
<sup>5</sup> For a critique of interval-scaled RT models, see Van Orden and Goldinger (1994), or Uttal (1990). For a replication, see Jacobs and Grainger (1994).

Clearly, the ability to predict a new phenomenon (and the conditions under which it must appear or must not appear) is one of the higher criteria for model evaluation (Gigerenzer, Hoffrage, & Kleinbölting, 1991 ; Jacobs & Grainger, 1994). One of the features of connectionist models in general, and the IAM in particular, is that they are rich enough to allow emergence of effects that have not yet been observed.

As an example for this, consider the neighborhood frequency effect in visual word recognition. Playing with a variant of the original IAM, one of the present authors discovered that such an effect is possible within the model system. Looking at the activation function for the word "blur", he observed an attenuation of the rise of this function during the early phase (a cross-over between the functions for "blur" and "blue"). This is because "blur", a low frequency word, shares all but one letter with "blue", a high frequency word.

The activation functions for "blur" type words reach a criterion level of activation (arbitrarily defined for response generation in the model) more slowly than low frequency words that have no high frequency orthographic neighbors (e.g., "idle" ; see Figure 2). What is more important, is that further simulations with the IAM showed that a selection of low frequency words with many high frequency neighbors (e.g., heal) did not differ from low frequency words with a single high frequency neighbor in terms of the number of cycles required to reach criterion activation levels. This particular simulation result was important with respect to our application of strong scientific inference in model testing. In contrast to the IAM, serial search / verification models of visual word recognition (Forster, 1976 ; Paap, Newsome, McDonald, & Schvaneveldt, 1982) predict a further decrement in performance to such stimuli. The pattern predicted by the IAM was observed by Grainger et al. (1989) and Grainger (1990). Although more recent research has complicated the neighborhood frequency story (e.g., Sears, Hino, & Lupker, 1995), the important point is that the IAM simulations, using the same stimuli as in the human experiments, accurately predicted the observed pattern for that particular stimulus set.

Thus the IAM, which, as all connectionist models, has structural and processing features that were built in specifically to create known empirical phenomena (e.g. the resting level parameter that creates the frequency effect ; cf. Dell, 1988), predicted an unknown effect that has now been observed under a variety of conditions (Grainger & Jacobs, 1996). Let us note as an aside that this provides an encouraging example for solving the recurring epistemological issue of a theory-centered approach as seemingly opposed to a result-centered approach (Greenberg, Solomon, Pyszczynski, & Steinberg, 1988 ; Greenwald & Pratkanis, 1988 ; Moser, Gadenne, & Schröder, 1988), by showing how a model can specify the conditions under which previously unobtainable results occur. This clearly is a theory-centered demonstration for one of the complementary two "result-centered" approaches (i.e., the design approach), advocated by Greenwald, Pratkanis, Leippe, and Baumgardner (1986) in their attack on theory-centered approaches to psychology.

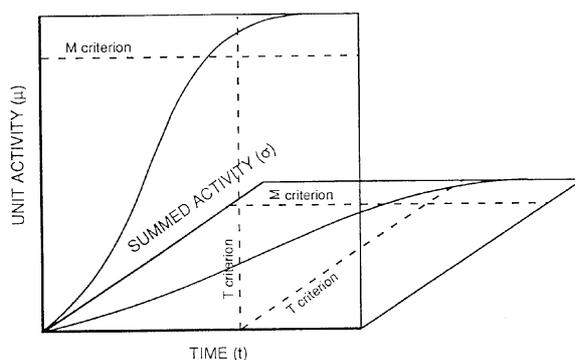


**Figure 2** : Activation functions in reduced parts of the English four letter lexical space. Panel 2a and 2b show two simulations obtained with the target words "IDLE" and "BLUR", respectively. Both these words have orthographic neighbors ("IDLY", "ISLE" and "BLUE", respectively) and have the same frequency (15 per million), but only "BLUR" has a higher frequency neighbor. Consequently, "IDLE" reaches the response threshold two cycles earlier than "BLUR" (i.e., 17 vs. 19 cycles).

## MODEL STRUCTURE

**THE MROM.** It is useful to give a short description of the MROM here (see Grainger & Jacobs, 1996, for more details). The MROM is an extension of the IAM incorporating the design principle of multiple read-out. The principle of multiple read-out states that a response in a given experimental task is generated (read-out) when at least one of the codes that is appropriate for responding in that task reaches a critical activation level. This principle is particularly relevant to our explanation of performance in the LDT. With respect to this particular task, we hypothesize that unique word identification is not the only process that can lead to a correct "yes" decision in the lexical decision task, and that an extra-lexical process controls the production of "no" responses. In the functional context of the lexical decision task, word-nonword discrimination requires that participants use a reliable source of information that allows them to make rapid and accurate judgments concerning the "word-likeness" of stimuli (e.g., their familiarity / meaningfulness, Balota &

Chumbley, 1984). In the MROM, we postulate three processes underlying a speeded binary lexical decision response. Two of the processes use intra-lexical information to generate a "yes" response, and the third uses extra-lexical information to generate a "no" response. The two intra-lexical sources of information are : i) the overall (global) activity in the orthographic lexicon, operationalized in the simulation model as the sum of the activation levels of all word units, hereafter referred to as  $s$ , and ii) the (local) activity of functional units within the lexicon, operationalized as the activation level of individual word units, or  $\mu$ . The extra-lexical source of information is time ( $t$ ) from stimulus onset. In the MROM, a criterion value set on each of the three information dimensions determines the type (yes/no) and speed of a response. The criterion on the (local)  $\mu$  dimension is referred to as  $M$ , the criterion on the (global)  $s$  dimension as  $\Sigma$  and the temporal deadline as  $T$ . Figure 3 illustrates how these three response criteria combine to determine the type and the speed of a response in the LDT.



**Figure 3.** Application of the multiple read-out model to the lexical decision task. Three response criteria  $M$ ,  $\Sigma$ , and  $T$  are set on three information dimensions : i) unit activity in the mental lexicon ( $\mu$ ), ii) summed lexical activity ( $s$ ), and iii) time ( $t$ ). Increases in  $\mu$  and  $s$  over time follow the sigmoid function of an interactive activation network (McClelland & Rumelhart, 1981). In general, word recognition is said to occur when the  $M$  criterion is reached, whereas a positive lexical decision response can be triggered when either the  $M$  or the  $\Sigma$  criterion is reached before the  $T$  criterion. A negative lexical decision response is given in the converse situation.

If either the local  $M$  or the global  $\Sigma$  response criteria are reached before the  $T$  criterion then a positive response is given, otherwise a negative response is given. Errors to word stimuli (false negatives) therefore arise when the  $T$  criterion is set too low and/or both the  $M$  and  $\Sigma$  response criteria are set too high. Errors to nonword stimuli (false positives) arise in exactly the opposite circumstances (high  $T$  criterion and/or low  $M$  criterion or low  $\Sigma$  criterion). In the example given in Figure 3, both the  $M$  and the  $\Sigma$  response criteria are reached before the  $T$  criterion giving rise to a positive lexical decision response. The speed of this response is determined by the earliest moment in time that either the  $M$  criterion is reached (i.e., a specific word has been identified), or the  $\Sigma$  criterion is reached (i.e., a fast guess has occurred). Response time for a negative response is simply given by the value of the  $T$  criterion.

**THE MROM-P.** The starting point for the coding scheme of the MROM-P is the V-type (boxological) model of orthographic-phonological processing by Grainger and Ferrand (1994 ; see also Ferrand & Grainger, 1996). This model (see Figure 4) was empirically motivated by results from a series of masked priming studies (Ferrand & Grainger, 1992 ; 1993 ; 1994), and represents the simplest possible (global) phonological coding scheme within an IA-type architecture, that includes sublexical phonological structure. However, as is typically the case with V-type models, Grainger and Ferrand did not specify the nature of the phonological processing units.

According to the principles of canonical and nested modeling (Grainger & Jacobs, present volume), we started the construction of the MROM-P with the original structure, processing assumptions, and parameters of the MROM. These elements had already been kept constant in our previous "English" and "French" extensions of the IAM, the semistochastic interactive activation model, or SIAM (Jacobs & Grainger, 1992), the letter-frequency model (Grainger & Jacobs, 1993), the dual read-out model, or DROM (Grainger & Jacobs, 1994), the semistochastic interactive activation model for the fragmentation task, the SIAM-FRAG (Ziegler, Rey, & Jacobs, in press d), and the MROM (Grainger & Jacobs, 1996).

**MULTILENGTH LEXICON AND THE CODING OF LETTER-IN-WORD POSITION.** In our previous IA models, we used the simplification of a length-specific lexicon representing a single word length (either four or five letters). Given the absence of an isomorphism between the size of orthographic and phonological representations (i.e., grapheme and phoneme units), the present "English" MROM-P is equipped with a much richer lexicon (albeit still a very simplified one) including all 3-5 letter, monosyllabic<sup>6</sup> English words extracted from the CELEX database (Baayen, Piipenbrock & van Rijn, 1993). This led

<sup>6</sup> Focusing on monosyllabic words is a simplification that has been adopted by the majority of experimental and modeling studies in the field. In future work, it will have to be revised.

to an orthographic lexicon of 2494 words (for a detailed description of the cleaning procedure applied on this database in order to extract the selected lexicon, see the appendix).

This multilength lexicon raises the issue of how to code letter-in-word position and the relation between word units of different lengths. Some recent empirical studies suggest that the cognitive system uses relative rather than absolute position coding (Grainger & Jacobs, 1993 ; Peressotti & Grainger, 1995 ; see also Grainger & Jacobs, present volume). Thus, letters in a word are not supposed to be represented in terms of their absolute position in the word (i.e., U at the third position in BLUE), but in terms of their relative position, which is calculated from the word boundaries (e.g., U is one position before the final letter and L is one position after the initial letter in BLUE, i.e.  $U = \text{final} - 1$  and  $L = \text{initial} + 1$ , respectively). This coding scheme allows us to establish more plausible similarity relations between words of different lengths than the original position coding scheme of the IAM<sup>7</sup>. As an example, the stimulus WORD is encoded as : W in initial position, O in initial +1, D in final position, and R in final -1. This coding scheme was applied to the orthographic lexicon and for coding the input stimuli presented to the model. Table 1 gives a general description of our coding scheme for 3 to 5 letter words.

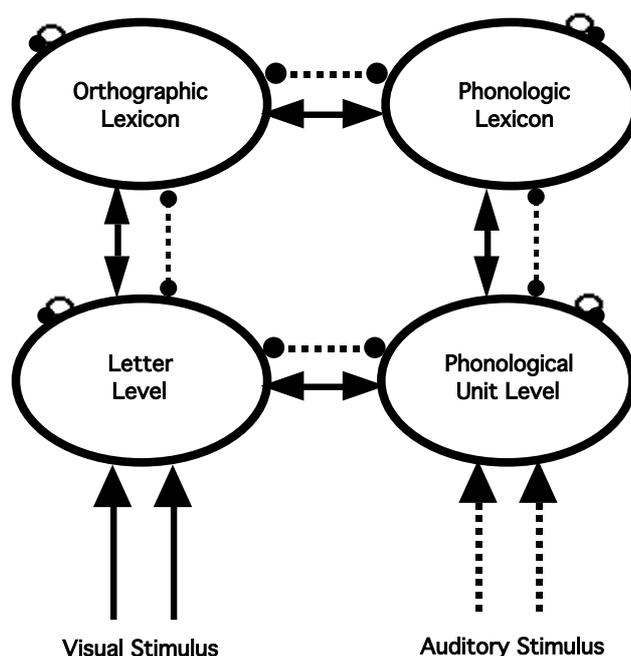


Figure 4 : Grainger and Ferrand's model (1994)

**WHOLE WORD PHONOLOGICAL LEXICON.** In MROM-P we assume that each orthographic representation of a word has a corresponding whole-word phonological representation. The phonological lexicon containing these representations is smaller than the orthographic one because of homophones that have distinct orthographic entries but share the same phonological code. This led to 2323 whole word phonological representations in contrast to the 2494 orthographic word units. Connections were established between each whole-word orthographic unit and its corresponding whole-word phonologic unit, and specific values of resting level activation (i.e., coding frequency of occurrence) were given to each unit using the CELEX frequency count (see appendix for a description of the procedure).

Table 1 : Relative position coding scheme for 3 to 5 letter words

Word length	initial	init.+1	init.+2	final-1	final
5	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>
4	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	*	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
3	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	*	*	L <sub>3</sub>

**PHONOLOGICAL UNITS.** We assume that i) the cognitive system of a reader possesses some elementary phonological representations or coding units ; ii) these basic phonological units, or phonemes, are grouped

<sup>7</sup> The evaluation of the plausibility of this coding scheme requires further investigation and, probably, further refinements. The use of a more structured coding scheme, introducing a grapheme level composed of functional pronunciation units as proposed by Berndt, D'Autrechy and Reggia (1994 ; Berndt, Reggia & Mitchum, 1987 ; Reggia, Marsland & Berndt, 1988) is a possible candidate for such refinements. However, more constraining results are needed to specify the nature and the boundaries of such units.

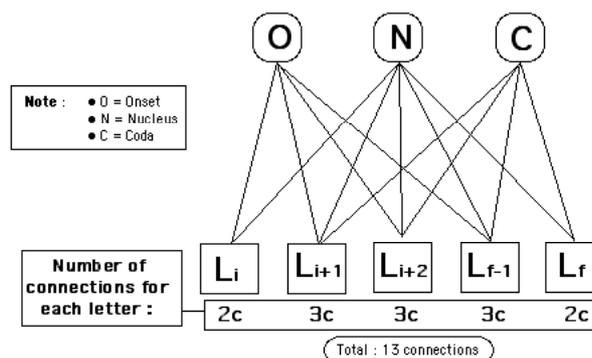
according to a consonant, vowel, consonant (CVC) or, more precisely, an onset, nucleus, coda (ONC) scheme. This scheme is both motivated by current linguistic theory (e.g., Wiese, 1996), and by empirical data (Dell, 1988). We chose this subsyllabic organization as a pragmatic, parsimonious compromise. Higher infralexical phonological structures, like onset-rime units, for example, are less flexible and less general. Lower structures, like ungrouped phoneme strings, for example, complicate the connectivity between letter and phoneme units.

The phonemic representation level thus contains onset, nucleus and coda positions. These units can code single phonemes or phoneme clusters. Furthermore, a "silent phoneme" is added at the onset and coda positions in order to represent monosyllabic words that have no pronounced consonant at their beginning or end. As an example, consider the stimulus GOOD. This is phonologically coded as /gUd/ and decomposed as : Onset = /g/ ; Nucleus = /U/ ; Coda = /d/. Similarly, BLUE (/blu/) is decomposed as : Onset = /bl/ ; Nucleus = /u/ ; Coda = /\*/ (the star representing the silent phoneme in the coda position). Table 2 shows the three sets of phonological units of the MROM-P : They include all possible phonemes or combinations of phonemes contained in the phonological lexicon of the model at each position.

**Table 2** : Description of the three sets of phonological units

ONSET 51 units	*, b, bl, br, d, D, dr, dw, f, fl, fr, g, gl, gr, h, J, k, kl, kr, kw, l, m, n, p,pl, pr, r, s, S, sk, skr,skw, sl, sm, sn, sp, spl, spr, Sr, st, str, sw, t, T, Tr, tr, tw, v, w, z, _
NUCLEUS 34 units	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, #, \$, @, E, i, I, j#, j\$, j1, j3, j5, j7, j8, j9, jE, ji, jQ, ju, jV, j{, Q, u, U, V, {
CODA 78 units	*, b, d, D, dst, dT, Dz, dz, f, fT, ft, g, gz, h, J, k, ks, ksT, kst, m, md, mf, mp, mps, mt, mz, kt, l, lb, ld, lf, lk, lm, ln, lp, lS, ls, lt, lT, lv, lz, l_n, N, nd, ndz, nJ, Nk, Nks, nS, ns, nt, nT, nts, nz, nZ, Nz, n_, p, ps, pt, pT, R, s, S, sk, s

CONNECTIONS BETWEEN LETTERS AND PHONOLOGICAL UNITS. Figure 5 illustrates our connection scheme for linking orthographic and phonological units, a tentative solution to the problem of discovering an optimal grapheme-to-phoneme correspondence (GPC) scheme for IA-type models. In order to be consistent with the spreading activation (system) principle of IA models, we carried out an exhaustive analysis of the present lexicon, recording all existing links between each letter/grapheme -at each relative position- and each phonological unit -at the ONC positions. The results were stored in large matrices that code the GPCs, such as the fact that B in initial position (like in BLUE) is connected to the phonological unit /bl/ at the onset position. Similarly, for the same word, L at the initial +1 position is connected to /bl/ in onset, U at the final-1 is connected to /u/ in nucleus, and so on. Thus, respecting the spreading activation mechanism of the model, when a letter like B is activated in initial position, it will send excitation to all corresponding phoneme units in onset position, i.e., /b/, /bl/ and /bR/.

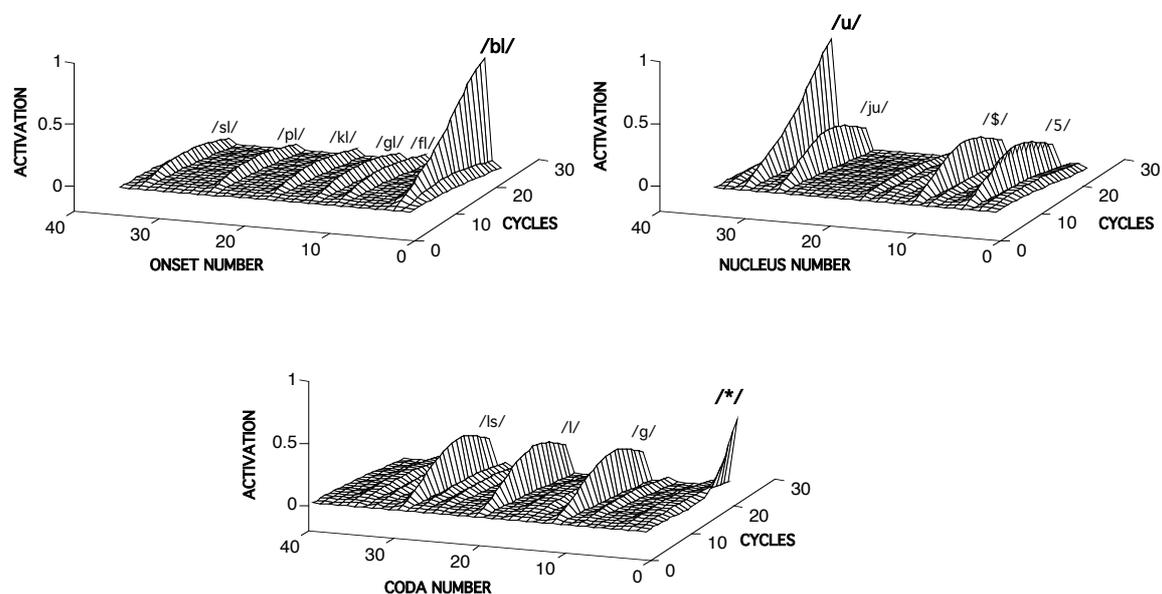


**Figure 5** : Connectivity between the letter and phonological unit levels

Figure 6 gives an illustration of what one might call the "phonemic" space in the MROM-P. It shows activation functions of the phonological units at the onset, nucleus and codas positions obtained for the target word "BLUE".

**PARAMETER TUNING.** In our parameter tuning approach, we also followed the stratagem of nested modeling. Since this demands that MROM is an integral part of MROM-P, we faced the problem of having to find new parameters for the phonological substructures of the model, while keeping the original parameters of MROM as constant as possible. However, because adding new interactive substructures to the original IAM leads to a new global dynamical system, the original parameter set had to be adjusted (the old one lead to catastrophic model behavior). Table 3 gives the parameter set fixed for the present simulation studies on the basis of the parameter tuning studies discussed below. We acknowledge that more work has to be done in order to precisely determine the role of each parameter for the model dynamics. Furthermore, although connectionist modelers in general seem to ignore the issue, we acknowledge that a central aim for future work in the field must be to solve the nontrivial problem of the identifiability of complex A-type models in general, and models of the IA family, in particular.

**SIMULATION METHOD.** In the following studies, we simulate effects obtained in the LDT. Because the task-specific mechanisms of the LDT have well been specified in the MROM (Grainger & Jacobs, 1996), the same design principles (i.e., principles that determine the behavior of a class of models and the observed dependent variables) were adopted here. However, given that the present version of MROM-P is still prototypical -implying that the present study provides no criteria-oriented falsification test of the MROM-P, but rather a test of its appropriateness as a "working model" of phonological coding- (see discussion section), we did not carry out full-blown simulations. This would have necessitated, for example, use of stochastic response thresholds and of a large number of simulated subjects equal to the number of subjects in the real experiments (Grainger & Jacobs, 1996). Consequently, rather than response (time) distributions, we simply obtained activation functions for each item used in the simulated experiments. For each experimental condition, the mean of these activation functions was calculated across the different items. The resulting activation functions (and derived mean RT bar charts) are presented as illustrations of how the model can quantitatively account for the experimental data.



**Figure 6** : Activation functions of phonological units at the onset, nucleus and coda positions obtained for the target word "BLUE".

Concerning the task-specific read-out procedure, the MROM-P follows the design principle of the MROM in that "No" responses are produced by monitoring the global orthographic activity generated by the stimuli, and "Yes" responses are generated by looking at the orthographic unit activity (for simplicity, we did not consider the possible role of global orthographic activity on "Yes" trials here ; cf. Figure 3 above). The rationale for this is given in Ferrand and Grainger (1996) who discuss the qualitative predictions of MROM-P for a masked priming LDT. In accord with the assumptions of Grainger and Jacobs (1996), the results of Ferrand and Grainger suggest that in an LDT using pseudohomophones, participants use read-out from the orthographic lexicon, because read-out from the phonologic lexicon would lead to too many false positive errors.

**Table 3** : Parameter set used in our simulation studies. "Alpha" refers to the weight of excitatory connections and "gamma" refers to the weight of inhibitory connections. FL = Feature Level ; LL = Letter Level ; PUL = Phonological Unit Level ; OL = Orthographic Lexicon ; PL = Phonological Lexicon.

CONNECTIONS	Alpha	Gam
Feature - Letter	.005	.15
Letter - Feature	0	0
Feature - Feature	0	0
Letter - Letter	0	0
Letter - Lexical Orth.	.035	.02
Lexical Orth. - Letter	0	0
Lexical Orth. - Lexical Orth.	0	.2
Letter - Sublex. Phono.	.1	.004
Sublex. Phon. - Letter	0	0
Sublex. Phon. - Sublex. Phon.	0	.05
Sublex. Phon. - Lexical Phon.	.1	.02
Lexical Phon. - Sublex. Phon.	.3	.2
Lexical Phon. - Lexical Phon.	0	.2
Lexical Orth. - Lexical Phon.	.1	0
Lexical Phon. - Lexical Orth.	.2	0

## MODEL PREDICTIONS AND TESTS

**TESTING STRATEGY.** The literature provides no generally accepted testing policy for complex A-type models. The situation can even be assimilated to something like anarchy. As an example, consider *PDP* (parallel distributed processing) or *ANN* (artificial neural network) "learning" models. Whereas classical mathematical learning theory provided a wealth of testing principles for M-type modelers (Tack, 1976 ; Myung & Pitt, present volume), ANN or A-type modelers today seem little concerned with this issue (Simon & Kaplan, 1989 ; Prechelt, 1996). Surely, the "fit-or-die" strategy of classical learning theory has both statistical, inferential pitfalls (Collyer, 1985 ; 1986), and epistemological drawbacks (Greenwald, Pratkanis, Leippe, & Baumgardner, 1986 ; Lakatos, 1970). On the other hand the question arises whether the currently visible anarchical, or laissez-faire testing strategy for computational, A-type models will eventually give the positive results anticipated by laissez-faire anarcho-epistemologists like Feyerabend (1975).

Without any claims that the testing strategy adopted here is the right or optimal one, we nevertheless prefer a critical-rational, (mildly) Popperian approach. At least, such an explicit approach can be constructively criticized and thus potentially advances our enterprise. Basically, our testing approach comprises the following 5 steps, inspired by testing procedures in psychometrics and mathematical psychology.

Step 1. Parameter tuning studies. During the initial phase of model construction, these tests check the global appropriateness of the architectural and parametric model assumptions in a simple way to see whether the model is not fundamentally flawed (e.g., does not include parameter configurations that produce catastrophic model behavior). The meaning of "in a simple way" depends very much on each model builder's implicit assumptions and preferences. We see no such thing as a systematic, explicit approach for parameter tuning in complex A-type models in the literature (cf. McClelland & Rumelhart, 1988). We can only provide motivated examples for how we proceeded.

Step 2. Estimator set studies. In analogy with classical procedures of cross-validation in psychometrics, an estimator study provides the data set from which model parameters are estimated (cf. Collyer, 1986). For the present purposes the difficult questions of how parameters of M-type and A-type models are best estimated and how such model's identifiability can best be determined must be put aside (see Grainger & Jacobs, present volume). Once a new model has stood the test of step 1, it is economical to run it against some already available data from the literature in step 2, before carrying out time-intensive new experiments. This is the method we adopt here.

Step 3. Criterion set studies. In analogy with the procedures of psychometrics, a criterion set study provides data with which the model predictions are compared once the parameters have been fixed after the estimator set study. Using a criterion of descriptive or behavioral accuracy (for a discussion of this criterion see Jacobs & Grainger, 1994), the criterion set study provides the first serious cross-validation test of the model. In the present paper we provide two such tests. The first uses data concerning the same effect as the one used in the

estimator set study, but from a different empirical study. The second test uses data concerning a different effect and coming from a different study.

Step 4. Strong inference studies. In our introductory paper to the present volume we discuss the stratagem of strong scientific inference in detail. Suffice it to say here that this relatively costly but worthwhile testing phase involves formal, criterion-guided comparisons of alternative models against the same data sets. For reasons given below, we cannot provide such testing in the present paper (for a typical approach, see Marsaro & Friedman, 1990).

Step 5. Model refinement or replacement. As theoretically firm believers, but practically mild (non-dogmatic, non-naive) users of a theory building approach adhering to Popper's (1934/94) and Platt's (1964) principles (see Grainger & Jacobs, present volume), we acknowledge that we would continue with a process of model refinement (after which one reiterates back to Step 1) as long as the model is only mildly discredited and no better alternative is available. Given the current state of the art in modeling visual word recognition (Jacobs & Grainger, 1994), within a pluralistic perspective of canonical modeling (Stone & Van Orden, 1993 ; 1994 ; see also Grainger & Jacobs, present volume), such an adoption of a hybrid between "falsificationism" and "refinementism" seems in order. We are nevertheless aware of the dangers of confirmation bias (Greenwald et al., 1986) and believe that eventually IA-type models -including the present one- will no longer be refined but replaced by better models. However, at present, we have reasons to believe that IA-type models have still a lot to offer (Jacobs & Grainger, 1994). The present volume is perhaps the nicest expression of and justification for this belief.

**THE MROM AS NULL-MODEL.** In the following model tests, we use the MROM as a "null-model" of phonological effects. That is, since the MROM has no explicit phonological processing units, it should not predict any difference between stimuli having phonological properties, such as pseudohomophones, and supposedly control stimuli that lack these properties. Note that the MROM can very well produce "pseudophonological" effects when the pseudohomophones differ on other dimensions than phonological ones from the controls, e.g., when they were badly matched for orthographic neighborhood properties. To the extent that the MROM provides a successful model of orthographic neighborhood effects in word recognition (Grainger & Jacobs, 1996), it can also be used as a tool for precisely selecting one's stimuli, e.g., for avoiding pseudophonological effects.

In contrast, if we included adequate phonological processing units into the MROM-P, it should predict clear differences between control stimuli and pseudohomophones, for example. In the present MROM simulations, the parameters governing the phonological parts of MROM-P were simply set to zero.

**STEP 1. PARAMETER TUNING STUDIES : THE PSEUDOHOMOPHONE TEST.** Once the initial parameter tuning procedure gave satisfactory results, a first simple test of the ability of MROM-P to account for phonological effects consists in presenting the model with "watertight" pseudohomophone stimuli, i.e. stimuli whose correct pronunciation is empirically confirmed (Van Orden, Johnston, & Hale, 1988). As an example, we presented both MROM and MROM-P with stimulus triples, such as FEEL (base word), FEAL (pseudohomophone), and FEED (control). Figure 7 shows activation functions for both MROM and MROM-P at the level of orthographic word units, which we take to be the critical level for assessing interactive phonological effects in the LDT (cf. Ferrand & Grainger, 1996). The simulation results are clear-cut. Whereas stimuli like FEEL generate sufficient lexical activity in both MROM and MROM-P to be correctly recognized, FEAL and FEED generate the same lexical activity in MROM, but not in MROM-P. Here, pseudohomophones like FEAL generate activity that is intermediate between real words, like FEEL, and control pseudowords like FEED. Thus, in stochastic simulations under data-limited conditions (i.e., brief, backward-masked stimulus exposure), MROM-P will occasionally (i.e., depending on the noise level) identify FEAL as FEEL (Ziegler & Jacobs, 1995 ; Ziegler et al., in press c). We took this result as suggesting that MROM-P's architectural-parametric assumptions are adequate, and fixed the parameters to the values yielding this result (see Table 3 above).

**STEP 2. ESTIMATOR SET STUDY : COLTHEART ET AL. (1977) TEST.** While the previous study hinted at the appropriateness of MROM-P's structural-parametric assumptions, it was no serious estimator set study. For this, we chose the stimuli and data of the classical study of Coltheart et al. (1977, Experiment 1, Table 1, and appendix A), which provided one of the first falsifications of serial search models of word recognition (Forster, 1976). This study had already given good service in this respect during the construction phase of SIAM (Jacobs & Grainger, 1992).

The crucial result of Coltheart et al. for the present purposes concerns the longer mean latencies for correct "No" responses to pseudohomophones than to control pseudowords in the LDT. Coltheart et al. observed a 62 ms difference in the subject analysis, and a 35 ms difference in the item analysis. Instead of using Coltheart's data for a full-blown parameter-fitting study, as one could have done with an M-type model, here we simply checked whether the MROM-P, as structurally-parametrically defined during the previous test phase, could simulate the data from Coltheart et al. If not, we would have gone through another phase of parameter tuning or model restructuring.

Figure 8a gives the mean overall lexical (orthographic) activity over time, which according to MROM is the critical information dimension determining No-responses (Grainger & Jacobs, 1996), generated by the 30 base words, 30 pseudohomophones, and 30 control pseudowords of the Coltheart et al. study which are contained in our lexicon (18 of the stimuli had to be excluded because their base word was bi-syllabic or absent in our model lexicon). In MROM, both pseudohomophones and control pseudowords generate the same activity, which yields identical mean No-RTs. In contrast, in MROM-P, overall lexical activity nicely reflects the differences between pseudohomophones and controls. Since pseudohomophones generate more activity than controls, No-responses to them will take longer to reject. This is shown in the bar charts of Figure 8b that capture the pattern of results obtained by Coltheart and collaborators.

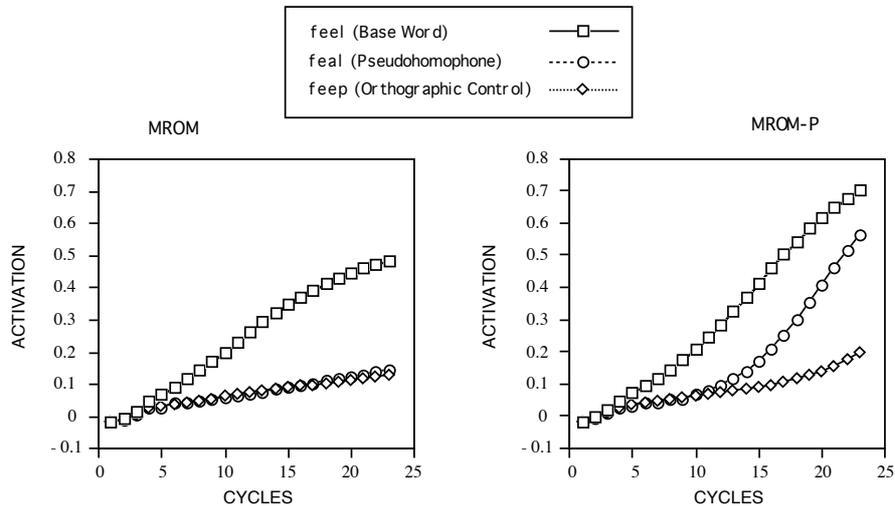


Figure 7 : Activation functions for the most activated word unit (local activity) with the MROM and the MROM-P for a pseudohomophone (feal), an orthographic control (feep) and their base word (feel).

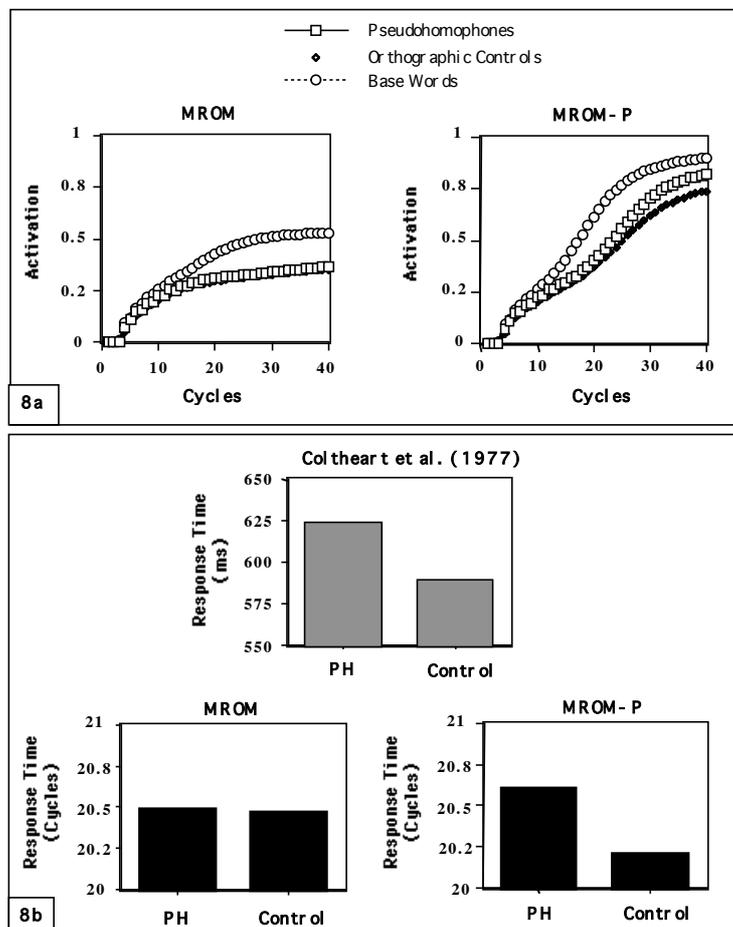
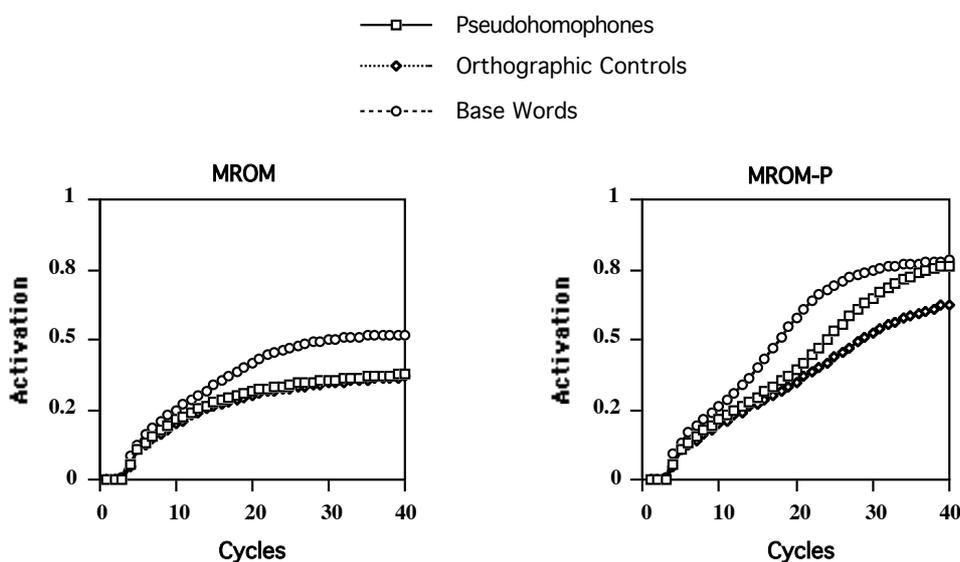


Figure 8 : Simulations run with Coltheart et al.'s (1977) stimuli. Figure 8a shows the mean overall orthographic activity over time for pseudohomophones, orthographic controls and base words, obtained with the MROM and MROM-P. Figure 8b gives obtained and predicted effects on response times to pseudohomophones and orthographic controls.

**STEP 3. CRITERION SET STUDIES : STUDY 1 - SEIDENBERG ET AL. (1996) TEST.** As a first criterion set test of MROM-P's ability to capture the pseudohomophone effect in the LDT, we ran simulations using the stimuli of a more recent study comparing pseudohomophone effects in the LDT and the naming task (Seidenberg et al., 1996). These authors observed a 31 ms inhibitory pseudohomophone effect on mean "No" RTs in the LDT. Note that this criterion set study uses the parameter set fixed during the previous two steps and provides a cross-validation test of MROM-P for the same experimental effect, as used in the estimator set study, but obtained in an independent study.

Figure 9 summarizes our simulations results. The activation curves show the same trends as those for the Coltheart et al. study. In MROM, both pseudohomophones and control pseudowords generate the same activity, whereas in MROM-P, overall lexical activity reflects the experimentally observed differences between pseudohomophones and controls. Thus, contrary to the MROM, MROM-P captures the well-replicated pseudohomophone effect in the LDT using the parameters from the estimator set study. This is first encouraging evidence for the descriptive accuracy, (cross)-validity, and generality of the model. However, a stronger test involves confronting the model not only with different data than in the estimator set study, such as in the previous test, but also with a different effect, that is, data due to the manipulation of different experimental factors than in the estimator set study. Thus, in the second criterion set study the model is not tested with respect to the pseudohomophone effect, i.e. a difference in LDT-latencies to non-word stimuli, but with respect to two effects concerning LDT-latencies to words, i.e. the feedforward and feedback consistency effects described above.



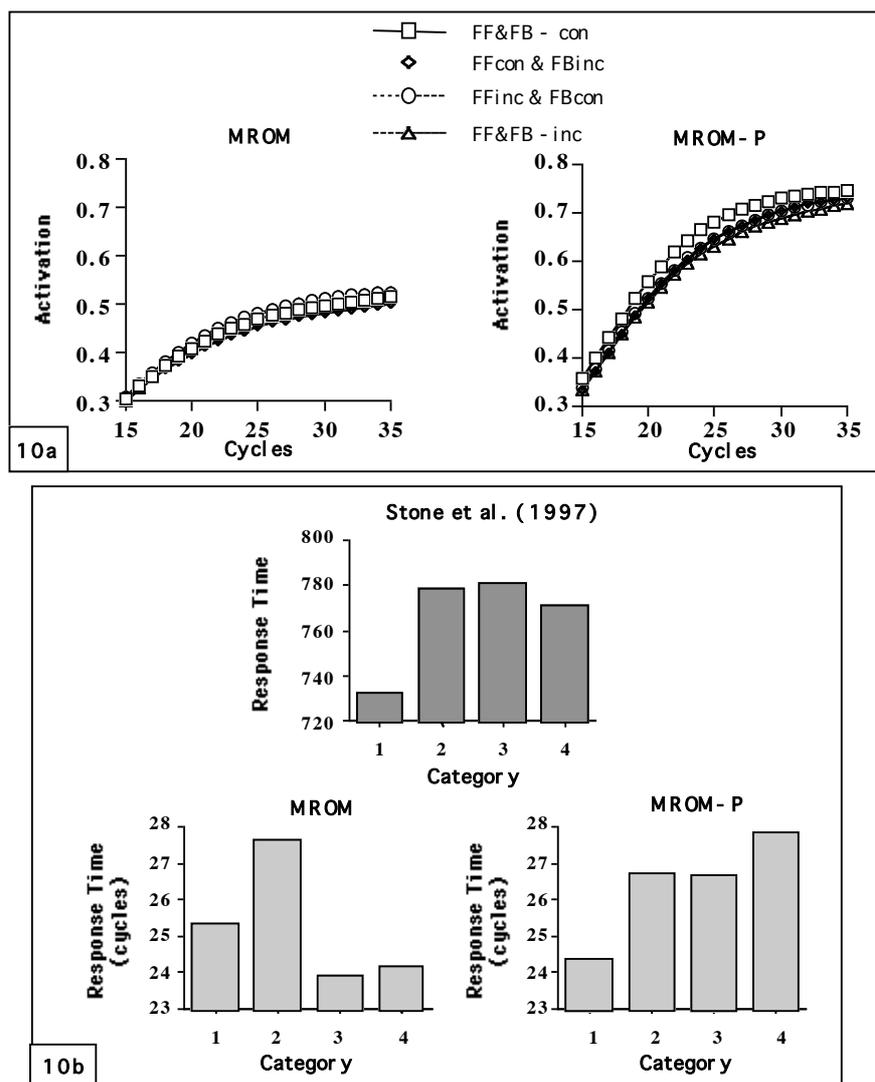
**Figure 9** : Mean overall orthographic activation functions with Seidenberg et al. (1996) stimuli obtained with the MROM and MROM-P for pseudohomophones, orthographic controls and base words.

**CRITERION SET STUDY 2 - STONE ET AL. (1997) TEST.** The critical feature of this second criterion set study is that it tests the model with data exhibiting a different effect coming from an independent study. If the MROM-P successfully simulates the feedforward and feedback consistency effects for word stimuli found by Stone and collaborators with the parameter set that simulated the pseudohomophone effect for nonword stimuli, we can hypothesize that both effects are different manifestations of the same underlying interactive mechanisms.

Figure 10 summarizes the results of our simulations using the word stimuli of Stone et al. (1997). The figure gives mean individual lexical (orthographic) activity over time for the four groups of word stimuli used in this study. The correct mean RTs and rounded error rates obtained by Stone et al. are indicated in the following : feedforward and feedback consistent (e.g., COIN, STAB : 732 ms, 2%), feedforward consistent and feedback inconsistent (HEAP, MOAN : 778 ms, 9%), feedback consistent and feedforward inconsistent (PINT, COUCH : 780 ms, 9%), and doubly inconsistent (NEAT, SWARM : 770 ms, 15 %). The data of Stone et al.'s Experiment 2 indicate an overall 20 ms feedforward consistency effect (775 - 755 ms), and an 18 ms feedback consistency effect (774 - 756 ms).

Figure 10 shows that the MROM fails to capture these bidirectional consistency effects : It makes the wrong prediction that doubly inconsistent words (and feedforward inconsistent-feedback consistent words) are processed faster than fully consistent words. According to MROM, feedforward consistent and feedback inconsistent words yield the slowest processing. In contrast, MROM-P captures Stone et al.'s data pattern much better, although not perfectly. In MROM-P, fully consistent words are processed fastest, doubly in-

consistent words are slowest, with the two monodirectionally inconsistent words being intermediate. Thus, while in Stone et al.'s data, the difference between the three inconsistent word groups are not important, MROM-P predicts a difference between monodirectionally and bidirectionally inconsistent words. Thus the model predicts a pattern that is actually closer to the one observed by Ziegler et al. (in press c) in French : In contrast to the finding of Stone et al., these authors observed that doubly inconsistent words produced slightly longer RTs than one-way inconsistent words. Given this incompatibility in the empirical results, and given that Ziegler et al.'s study used more carefully controlled stimulus materials than Stone et al., as indicated above, it would be premature to conclude that the MROM-P failed this second criterion set test. Tests using the French stimuli of Ziegler et al. (in press c) will have to wait until a French version of the MROM-P is available.

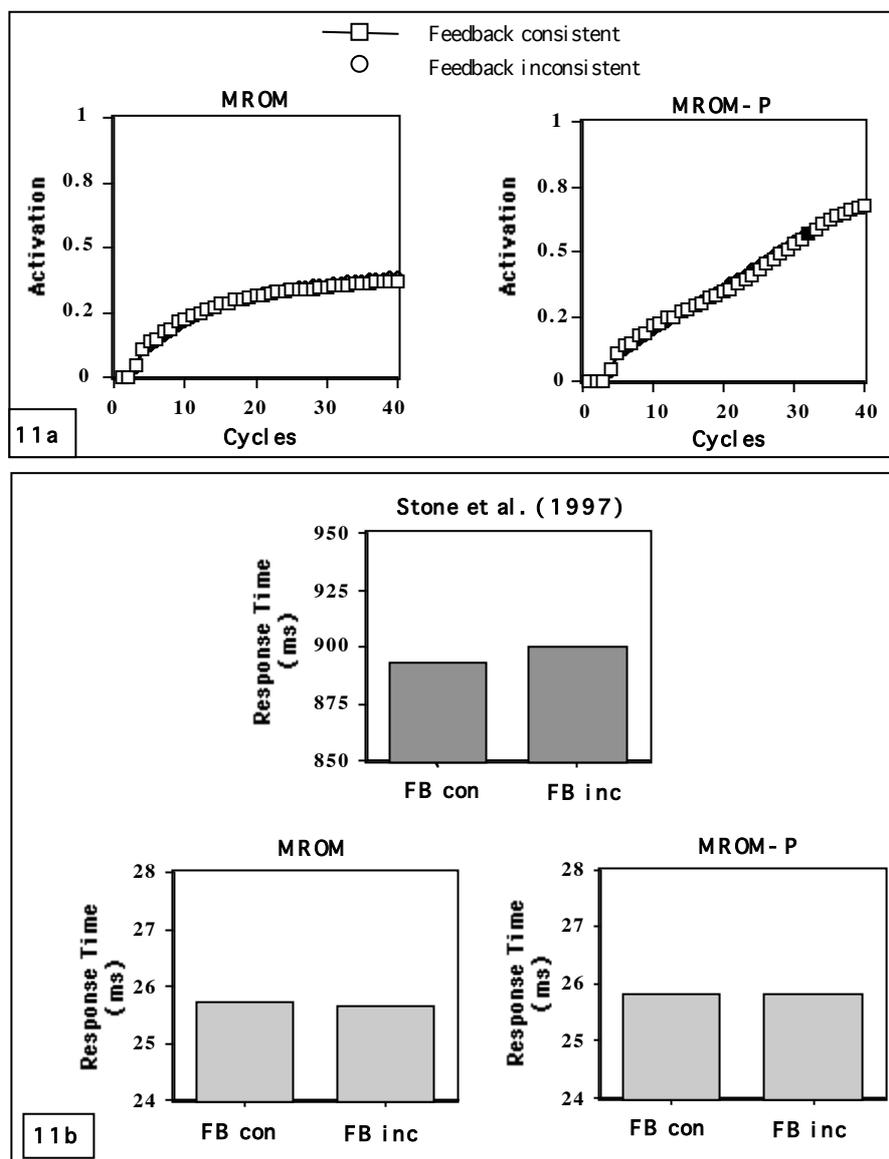


**Figure 10** : Simulations with Stone et al.'s (1997) stimuli. Panel a shows mean orthographic unit activity over time for the four categories of words, for both the MROM and MROM-P. Panel b gives obtained and predicted effects on response times to the four word groups : 1 = Feedforward and Feedback consistent ; 2 = Feedforward consistent and Feedback inconsistent ; 3 = Feedforward inconsistent and Feedback consistent ; 4 = Feedforward and Feedback inconsistent.

However, as an additional guard against a possible confirmation bias, we ran an additional test of the model using the nonword stimuli of Stone et al. (1997). The interesting result concerning RTs to nonwords was the absence of a significant difference between feedback consistent and feedback inconsistent nonwords. If MROM-P captures this null-effect, we can be more confident that its failure to simulate the null difference concerning RTs to doubly inconsistent vs. one-way inconsistent words does not present a fundamental problem with the model. The data in Figure 11 show that this is the case.

Thus, MROM-P successfully stood the second criterion set test. This allows us to hypothesize that the pseudohomophone and bidirectional consistency effects are different stimulus-specific manifestations of in-

teractive processes operating between orthographic and phonological representations, and that the present MROM-P provides a viable "model-system" within which such effects can be understood at sufficient levels of clarity/transparency and formality/precision.



**Figure 11** : Simulation of Stone et al.'s nonword data.

## MODEL EVALUATION

In this section, we follow the tentative criteria for model comparison and evaluation proposed in Jacobs and Grainger (1994), in particular : i) potential and actual descriptive accuracy, ii) horizontal and vertical generality, and iii) simplicity and falsifiability.

**POTENTIAL AND ACTUAL DESCRIPTIVE ACCURACY.** The first aspect of this accuracy criterion is potential descriptive accuracy. The question here is : Does the model allow predictions at the level of scale at which the dependent variables of interest are actually measured. For example, if the dependent variable that reflects the effect is interval-scaled (e.g., a frequency effect measured in ms), then a model has potential descriptive accuracy if it allows predictions on the scale of ms. Any current psychological A-type model can only achieve this in an indirect way, for example, by transforming cycle times into RTs via regression analyses.

Despite complex considerations concerning measurement problems, we think that A-type modelers should take this issue seriously and provide a means by which model users can formally compare the values of the dependent variable(s) they want to study with those of the model's output. This is necessary to develop standards for evaluating the relative goodness-of-fit for competing models. Why should "eye balling" or "hand waving" be accepted as alternatives to model-to-data fitting when using complex A-type models, while they are not accepted for any other formal model format? Massaro and Friedman (1990) provide an encouraging example for evaluating the descriptive accuracy of a set of comparable M- and A-type models.

when percentage correct is the dependent variable. As concerns the more complex issue of predicting RT means and distributions with A-type models, first steps towards progress in this direction have been made in some recent studies (Grainger & Jacobs, 1996 ; Jacobs & Grainger, 1992).

Like its precursor, the MROM, the present MROM-P has potential descriptive accuracy for a variety of dependent variables, including RT means and distributions for both correct and incorrect responses, as well as hit or false alarm rate for the LDT, and percent correct for perceptual identification tasks (see Grainger & Jacobs, 1996).

As concerns the actual descriptive accuracy of the MROM-P, the above tests are encouraging but not conclusive. To be conclusive, we would need to test the model in both a deeper and broader fashion, similarly to our extensive tests concerning the MROM. Deeper tests would imply providing graphs showing linear regression between predicted and observed mean RTs for item- and/or participant analyses, as well as distributional and error analyses (Grainger & Jacobs, 1996). Broader tests imply running simulations of other tasks than the LDT (e.g., perceptual identification tasks).

Additionally, in accord with step 4 of the testing strategy proposed above, the MROM-P should be tested in competition with comparable, alternative models on the same broad range of tasks and dependent variables, before any interesting conclusions with regard to its actual descriptive accuracy can be made. At present, the time is not yet ripe for this, but we hope that easily comparable, broadly testable variants of the MROM-P and, for example, the dual-route cascaded model (Coltheart & Rastle, 1994) are soon available.

It is useful to note, however, that even if quantitative, strong inference comparisons between models of phonological processing in visual word recognition become possible in the near future, a problem remains. The problem is that finding that one model fits the data better than competing models does not establish the best-fitting model as the probable source of the data (Collyer, 1985 ; 1986). Developing methods to overcome Collyer's almost totally neglected problem represents one of the interesting challenges for A-type (and M-type) model builders in the future.

**HORIZONTAL AND VERTICAL GENERALITY.** In Jacobs and Grainger (1994), we distinguished between horizontal and vertical generality. Horizontal generality refers to a model's ability to generalize across different stimulus sets and/or configurations (stimulus generality), different tasks (task generality), or response types / measures (response generality). Vertical generality refers to a model's ability to generalize across different scales of the modeled process, e. g. (macrostructural) static-asymptotic behavior vs. microstructural dynamics, or different types or sizes of a processing structure, such as the number of entries in the lexicon of a simulation model. Vertical generality has received little attention in comparison with horizontal generality but it might become an important issue in a field that provides more and more complex algorithmic models, some of which may have severe limitations for scaling-up, e. g. distributed connectionist models (Feldman-Stewart & Mewhort, 1994 ; Jacobs & Grainger, 1994).

We have discussed the vertical generality of the SIAM elsewhere (Jacobs & Grainger, 1994). Suffice it to say that by virtue of nested modeling (i.e., SIAM is an integral part of MROM, which is an integral part of MROM-P), and given the fact that MROM-P includes a richer lexicon than MROM, MROM-P has higher vertical generality. Concerning horizontal generality, again thanks to our application of the nested modeling stratagem, we can say the following : Since MROM has stood an extensive series of tests in different tasks and languages (and thus has reasonable horizontal generality), and to the extent that we can show that the MROM-P behaves at least qualitatively like the MROM (e.g., as for the simulations of the nonword data in Figure 11), the MROM-P has a higher degree of horizontal generality than the MROM. This is because we have shown that it allows adequate simulation of the processing of stimuli that the MROM cannot account for, i.e. pseudohomophones and inconsistent words. Apart from this verified higher stimulus-generality, it remains to be seen to what extent the MROM-P also includes the promise of higher task-generality, i.e. the capacity to simulate data from other tasks than the LDT or the perceptual identification task, e.g. the naming task.

**SIMPLICITY AND FALSIFIABILITY.** This is one of the trickiest criteria of model evaluation (Jacobs and Grainger, 1994). However, given the current state of affairs, and our adoption of a moderate "Popperianism", things are relatively easy : It is simply premature to make any sensible statement regarding the simplicity and falsifiability of the MROM-P. Popper (1934/94) linked the criterion for simplicity to that of falsifiability (i.e., a model's ability to generate predictions that can be falsified), in proposing that, given two models in the same domain with equal success, we should prefer the simpler. He defined simplicity as a property that places the greatest restrictions on the world, that is, on how the empirical data can turn out to be<sup>8</sup>. Thus, we should prefer the model that is more easily falsified (cf. Estes, 1975 ; Massaro & Cowan, 1993). However, that implies that we already have two viable models (or model variants), for which equal success has been established in the same domain. Clearly, as concerns the present subject area, this is not the case, and we can only postpone evaluation with respect to this criterion.

<sup>8</sup> For Popper's simplicity/falsifiability criterion to work, certain rules have to be respected in this game of non-naive, undogmatic falsificationism and strong inference (e.g., constraints on the use of auxiliary assumptions ; see Popper, 1934/94 ; 1966 ; 1972). Otherwise, the strength of Popper's approach can easily be turned into weakness (cf. Everhard, 1975 ; Lakatos, 1976).

Notwithstanding, a nontrivial question regarding falsifiability can be answered here : Is the MROM-P falsifiable, at all? Given the repeatedly appearing critique of connectionist models as being too powerful, and therefore not falsifiable in any easy way, this is not an idle question. Following other theoreticians, we therefore have proposed that any A-type model should come with a clear answer to the following question : What cannot be or happen, if the model is correct? In other words, which effects or phenomena does the model exclude? An example is given in Grainger and Jacobs (1996). They show that if the MROM is correct, a facilitatory effect of orthographic neighborhood density (as measured by Coltheart's N) is possible in both the yes/no and go/no-go variants of the LDT, but not in the perceptual identification task. Thus, replicable experimental demonstrations of a facilitatory N effect in the perceptual identification tasks would falsify the MROM.

Another example is given above (see Figure 8). According to the MROM, as included in the present MROM-P, a phonological pseudohomophone effect in the LDT is not possible, because it possesses no phonological processing units whatsoever. Thus, although the MROM was explicitly designed to deal with orthographic processing in the LDT and other reading tasks that do not include pseudohomophonic stimuli, the simulation data in Figure 8, for example, present a falsification of the (non-phonological) MROM. Evidently, simply falsifying a model by using conditions that are outside of its explicitly stated validity space (domain of application) is not necessarily useful. As we have demonstrated in this chapter, using the MROM as a null-model against which to test models of phonological coding is a more useful variant of "falsification studies".

At any rate, in a field that lacks universal laws, we cannot expect models to have universal validity (cf. Newell, 1990). On the other hand, we can hardly want to continue with models that can accurately account only for a single effect, as measured by a single variable in a single task, but whose validity stops there (cf. Jacobs & Grainger, 1994 ; Newell, 1990 ; Roberts & Sternberg, 1993).

The MROM-P is also falsifiable in several nontrivial respects. Like the MROM, it allows to make qualitative predictions that can be tested in a straightforward way. An example is discussed in Ferrand and Grainger (1996). They used a pre-quantitative version of MROM-P -they called it a bimodal extension of the MROM- to make qualitative predictions concerning the existence and direction of priming effects in a masked priming LDT manipulating prime type (homophones, pseudohomophones, or unrelated controls) and list composition (pseudohomophones, legal pseudowords, or illegal nonwords). The strongest qualitative prediction of MROM-P, i.e., the one most easily falsifiable, was that it predicts a null effect with homophone primes in the presence of illegal nonwords<sup>9</sup>. The rationale for this is that i) the presence of illegal nonwords encourages participants to use the  $\Sigma$  criterion, since such nonwords can easily be discriminated from words on the basis of summed lexical-orthographic activity. ii) homophone primes generate high levels of orthographic inhibition when read-out is from the orthographic M criterion. The facilitatory effects due to increased use of the  $\Sigma$  criterion (i.e., the fast-guess mechanism producing decreases in RT) will be canceled by the inhibitory effects due to homophone primes. A null-effect is the predicted result. In Ferrand and Grainger's (1996) experiment, this was the case.

## DISCUSSION AND OUTLOOK

To summarize : While a complete, criteria-oriented evaluation of the MROM-P is not possible at present, the results of our partial evaluation stand the general test criterion that we had fixed as our objective, that is, whether the present MROM-P is an appropriate "prototype" for developing a general model of phonological coding in visual word recognition. The model presented here is definitely a prototype, not in the sense of representing an ideal, but in the sense of being a "working model". If one accepts the principles of model development we adhere to, it has some virtues. Within the constraint of nested modeling, it represents what we think to be the simplest possible localist connectionist network that allows an account of two?? critical empirical effects indicating the influence of phonological processes in what is still the most widely used reading task in experimental psychology and psycholinguistics, i.e. the LDT.

Moreover, the MROM-P, as our other work involving A-type modeling, is essentially a heuristic device in the sense discussed in Grainger and Jacobs (present volume) : It provides a heuristic, algorithmic description of phonological coding, but -needless to say- it falls short of presenting a computational theory in the sense of Marr (1982). It is not difficult to admit this : Few theoreticians in the field of cognitive science have achieved (or come close to) a computational theory (Marr, 1982 ; see also Jacobs, 1994 ; Pylyshyn,

<sup>9</sup> A word on null-effects and their significance for theory building is in order, because many psychologists are firm believers in the virtues of null-hypothesis testing (but see Gigerenzer & Murray, 1987 ; Rouanet, 1996 ; Van Orden, Aitchison, & Podgornik, 1996). Whenever one possesses models permitting quantitative predictions with reasonable precision, the prediction of a null-effect is actually a strong prediction to make. Perhaps the most famous example is the prediction of the null-effect concerning the speed of light in Michelson and Morley's experiments by Einstein's special theory of relativity (Spielberg & Anderson, 1985). This is not to say that any known psychological A-type model can be compared with Einstein's theory. We simply want to make clear that the existence of theoretical tools allowing quantitative predictions concerning empirical effects frees us from the use of null-hypothesis testing as exclusive inferential method. Thus, contrary to standard practice, accepting the null-hypothesis can become a valid inference whenever one has sufficient faith in the validity and precision of a formal model or theory.

1989), and it can be argued that the fields of memory or reading research are still not fully prepared for such an enterprise (Humphreys, Wiles, & Dennis, 1994 ; Jacobs, 1994). This is not to say, however, that they are not set up for some fair amount of theoretical unification, as argued below.

Neither the recent special section of the JEP :HPP (1994) on modeling visual word recognition, nor any other literature we have come to know since provides a computational model that can formally account for the pseudohomophone and bi-directional consistency effects in the LDT we have simulated here. However, there is, at least, one other model that has the potential to provide such an account, the dual route cascaded or *DRC* model (Coltheart & Rastle, 1994). Given the fact that both the present model and the *DRC* belong to the family of localist connectionist models (and therefore are more easily comparable), but differ with respect to one crucial structural feature -the presence of a GPC rule mechanism in the *DRC*- we may have the promise of some exciting strong inference studies ahead. However, for such studies to be efficient, certain methodological issues have to be solved, as argued below.

Future work concerning the MROM-P will involve adding phonological representations to multilingual models such as the bilingual interactive activation model presented by Dijkstra and Van Heuven in the present volume. This raises the interesting question of how multilingual speaker-readers deal with the different sets of spelling-to-sound correspondences in each language. If one postulates, as in the present work, that the phonological coding component of the MROM-P is automatic and strategically non-modifiable, how do bilingual readers deal with the potential interference caused by automatically generating all correspondences in both languages? The notion of *language node* introduced by Grainger and Dijkstra (1992, see also Dijkstra & Van Heuven, present volume) provides one solution to this problem. Top-down inhibition from the unattended language node to the corresponding word units (i.e., all words in the unattended language) would block resonance between irrelevant phoneme units and word units in the unattended language. Clearly much exciting theoretical and empirical work is yet to be done in the multilingual domain.

#### GOING BEYOND MROM-P : A GENERAL CHALLENGE FOR COGNITIVE MODELERS IN "WORD-NERD" WORLD

*"Science, even more profoundly than politics, is the art of the possible. It does only what can be done next" (Newell, 1990, p. 26).*

The 1994 special section of the JEP :HPP entitled "Modeling visual word recognition" gives an impression of the empirical and theoretical richness of this classical field of experimental, cognitive psychology. The question we want to raise here is whether it is about time for some serious effort of theoretical unification? Who thinks that this is an idle question is invited to take a look at Table 1 in our editorial of that special section (Jacobs & Grainger, 1994), which gives a selective overview of 15 models of visual word recognition starting with Morton's (1969) logogen model. Originally, this piece of taxonomic work started with the ambition to give a synopsis -as complete as possible- of models of word recognition to be used for the tasks of theoretical unification and development of standards for model comparison and evaluation. That was clearly too ambitious! Even the published version is far too complex to have a fair chance of being used in the way we wanted it to (previous versions of the table, including more than 40 different models of the past 30 years were worse!).

Notwithstanding, we continue to think that the answer to the above question is a clear "yes". Perhaps pressure for theoretical unification in the word recognition literature is not as high as in the general field of cognitive science. As Newell (1990, p. 25) states : "In my view, it is time to get going on producing unified theories of cognition-before the data base doubles again and the number of visible clashes (i.e., between theory and data) increases by the square or cube". On the other hand, if Newell (1990) can convincingly present four harbingers of unified theories of cognition, why should we not be able to agree on a limited number of harbinger models that have the potential to become unified models of word recognition? After all, we are only dealing with a small part of the cake of cognition (although perhaps with one of the most complex parts). Clearly, we tend to think that models of the steadily growing IA family (see present volume) are among the harbinger candidates, and since we have given our arguments for this in Jacobs and Grainger (1994), we will not reiterate them here (see Grainger a Jacobs, present volume). Suffice it to say that the present results showing the generalizability of the original IAM to conditions involving phonological processing are clearly in favor of our view.

However, to facilitate theoretical integration in the "word-nerd" field, the following challenge has to be met : "Agree on a minimal set of standards for model comparison and evaluation". This challenge has two facets. First, it involves agreement on a minimal set of standard effects and tasks, any model of word recognition that competes for "harbinger status" should be able to predict in a way that can enter into strong inference competition. In Jacobs and Grainger (1994 ; Table 1) we made a minimalistic proposal of four such effects. Whether they were the right ones, or whether they have to be augmented by other effects is a question that can only be solved by ongoing published scientific debate.

The second, and more problematic facet of this challenge is to agree on a minimal set of criteria for model evaluation, and on a standard way of applying them. Among other things, this implies the tricky problem that complex A-type models have to be made comparable, at least on a number of critical features or dimensions (e.g., the "currency" problem discussed by Massaro & Friedman, 1990). This is a nontrivial issue (cf. Estes, 1975), as model builders who have problems of keeping different variants of their own model comparable over the years of development will admit (for some examples, see Jacobs & Grainger,

1994). Our stratagem of nested modeling may appear like something leading us close to what Newell (1990) called the "Popperian damnation", i.e. the risk to "kill" theories via falsificationism before one even has the time to know their true potential. But apart from the fact that Newell's interpretation of Popper's ideas is simply naive and uninformed, we think that nested modeling is a valuable method to tackle this basic problem: By facilitating unification of a single model or family of models, it should also facilitate unification of competing models. Even Newell (1990) -not to be suspected to be a "Popperian"- urges cognitive theoreticians to start by unifying their own theory before attacking a grand unified theory of cognition, which according to our view, can only result from strong inference competition in a pluralistic, pragmatic but principle-oriented modeling perspective. Nested modeling can considerably contribute to that unification.

In sum, our bet is that the establishment of a set of standard criteria for model comparison and evaluation serves this aim of theoretical integration. Since it does not at all exclude parallel anarcho-creative modeling enterprises à la Feyerabend (1975), why should we not give it a try<sup>10</sup>? If we do not solve this problem, the second facet of this first challenge simply risks to remain a challenge forever!

## REFERENCES

- Anderson, J.R. (1990). The adaptive character of thought. Hillsdale, NJ : Erlbaum
- Andrews, S. (1982). Phonological recoding : Is the regularity effect consistent? Memory and Cognition, 10, 565-575.
- Arbib, M.A., & Kaplan, D. (1979). Neurolinguistics must be computational. Behavioral and Brain Sciences, 2, 449-483.
- Baayen, R. H., Piepenbrock, R., & van Rijn, H. (1993). The CELEX Lexical Database (CD-ROM). Linguistic Data Consortium, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.
- Balota, D. A., & Chumbley, J. I. (1984). Are lexical decisions a good measure of lexical access? The role of word frequency in the neglected decision stage. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 10, 340-357.
- Berndt, R. S., D'Autrechy, C. L., & Reggia, J. S. (1994). Functional Pronunciation units in English words. Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition, 20, 977-991.
- Berndt, R. S., Reggia, J. S., & Mitchum, C. C. (1987). Empirically derived probabilities for grapheme-to-phoneme correspondences in English. Behavior Research Methods, Instruments, and Computers, 19, 1-9.
- Brown, G. D. A. (1987). Resolving inconsistency : A computational model of word naming. Journal of Memory and Language, 26, 1-23.
- Carello, C., Turvey, M. T., & Lukatela, G. (1992). Can theories of word recognition remain stubbornly nonphonological? In R. Frost and L. Katz (Eds.), Orthography, Phonology, Morphology, and Meaning (pp. 211 - 266). Amsterdam : North-Holland.
- Carreiras, M., Perea, M. & Grainger, J. (in press). Orthographic neighborhood effects on visual word recognition in Spanish : Cross-task comparisons. Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition.
- Collyer, C. E. (1985). Comparing strong and weak models by fitting them to computer-generated data. Perception & Psychophysics, 38, 476-481.
- Collyer, C. E. (1986). Goodness-of-fit patterns in a computer cross-validation procedure comparing a linear and a threshold model. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 18, 618-622.
- Coltheart, M. (1978). Lexical access in simple reading tasks. In G. Underwood (ed.), Strategies of information processing (pp. 151-216). London : Academic Press.
- Coltheart, M., Davelaar, E., Jonasson, J. T., & Besner, D. (1977). Access to the internal lexicon. In S. Dornic (ed.), Attention and Performance VI (pp. 535-555). London : Academic Press.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of reading aloud : dual-route approaches and parallel-distributed-processing approaches. Psychological Review, 100, 589-608.
- Coltheart, M., & Rastle, K. (1994). Serial processing in reading aloud : Evidence for dual-route models of reading. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20, 1197-1211.
- Dell, G. (1988). The retrieval of phonological forms in production : Tests of predictions from a connectionist model. Journal of Memory and Language, 27, 124-142.
- Dijkstra & Van Heuven, present volume.
- Dijkstra, T., Roelofs, A., & Fieuws, S. (1995). Orthographic effects on phoneme monitoring. Canadian Journal of Experimental Psychology, 49, 264-271.
- Erman, L.D., & Lesser, U.R. (1980). The Hearsay-II speech understanding system : A tutorial. In W.A. Lea (Ed.), Trends in speech recognition (pp. 361-381). Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- Estes, W. K. (1975). Some targets for mathematical psychology. Journal of Mathematical Psychology, 12, 263-282.
- Feldman-Stewart, D., & Mewhort, D. J. K. (1994). Learning in small connectionist networks does not generalize to large networks. Psychological Research, 56, 99-103.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1992). Phonology and orthography in visual word recognition : evidence from masked nonword priming. Quarterly Journal of Experimental Psychology, 33A, 325-350.

<sup>10</sup> It is indeed a nontrivial problem to lay out an epistemological position which tries to benefit from the creative tension between the charming, anarchic, and droll island occupied by Feyerabend and the rigorous, critical-rational, but also liberal-Socratic, castle constructed by Popper.

- Ferrand, L., & Grainger, J. (1993). The time-course of orthographic and phonological code activation in the early phases of visual word recognition. Bulletin of the Psychonomic Society, 31, 119-122.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1994). Effects of orthography are independent of phonology in masked form priming. Quarterly Journal of Experimental Psychology, 47A, 365-382.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1996). List context effects on masked phonological priming in the lexical decision task. Psychonomic Bulletin & Review.
- Feyerabend, P. (1975). Against method. London : Verso.
- Forster, K. I. (1976). Accessing the mental lexicon. In R.J. Wales & E.W. Walker (Eds.), New approaches to language mechanisms (pp. 257-287). Amsterdam : North-Holland.
- Frost, R., Katz, L., & Bentin, S. (1987). Strategies for visual word recognition and orthographical depth : A multilingual comparison. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 13, 104-115.
- Gigerenzer, G., Hoffrage, U., & Kleinbölting, H. (1991). Probabilistic Mental Models : A Brunswikian Theory of Confidence. Psychological Review, 4, 506-528.
- Grainger, J. (1990). Word frequency and neighborhood frequency effects in lexical decision and naming. Journal of Memory & Language, 29, 228-244.
- Grainger, J. & Dijkstra, T. (1992). On the representation and use of language information in bilinguals. In D. Harris (Ed.) Cognitive processing in bilinguals. Amsterdam : North Holland.
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1993). Masked partial-word priming in visual word recognition : Effects of positional letter frequency. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 19, 951-964.
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1994). A dual read-out model of word context effects in letter perception : Further investigations of the word superiority effect. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20, 1158-1176.
- Grainger, J., O'Regan, J. K., Jacobs, A. M. & Segui, J. (1989). On the role of competing word units in visual word recognition : The neighborhood frequency effect. Perception & Psychophysics, 45, 189-195.
- Grainger, J., O'Regan, J. K., Jacobs, A. M., & Segui, J. (1992). Neighborhood frequency effects and letter visibility in visual word recognition. Perception & Psychophysics, 51, 49-56.
- Grainger, J. & Segui, J. (1990). Neighborhood frequency effects in visual word recognition : A comparison of lexical decision and masked identification latencies. Perception & Psychophysics, 47, 191-198
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1996). Orthographic processing in visual word recognition : A multiple read-out model. Psychological Review, 103, 518-565.
- Greenberg, J., Solomon, S., Pyszczynski, T., & Steinberg, L. (1988). A reaction to Greenwald, Pratkanis, Leippe, and Baumgardner (19896) : Under what conditions does research obstruct theory progress? Psychological Review, 95, 566-571.
- Greenwald, A.G., & Pratkanis, A.R. (1988). On the use of "theory" and the usefulness of theory. Psychological Review, 95, 575-579.
- Greenwald, A.G., Pratkanis, A.R., Leippe, M.R., & Baumgardner, M.H. (1986). Under what conditions does theory obstruct research progress. Psychological Review, 93, 216-229.
- Grossberg, S. (1976). Adaptive pattern classification and universal recoding. II : Feedback expectation, olfaction, and illusions. Biological Cybernetics, 23, 187-202.
- Grossberg, S. (1980). How does a brain build a cognitive code. Psychological Review, 87, 1-51.
- Grossberg, S., & Stone, G. O. (1986). Neural dynamics of word recognition and recall : attentional priming, learning, and resonance. Psychological Review, 93, 46-74.
- Hagège, C. (1986). L'homme de paroles. Paris : Arthème-Fayard.
- Hooper, D. A., & Paap, K. R. (1996). The use of assembled phonology during performance of a letter search task and its dependence on the presence and proportion of word stimuli. Journal of Memory and Language.
- Humphreys, M. S., Wiles, J., & Dennis, S. (1994). Toward a theory of human memory : Data structures and access processes. Behavioral and Brain Sciences, in press.
- Jacobs, A. M. (1994). On computational theories and multilevel, multitask models of cognition : The case of word recognition. Behavioral and Brain Sciences, 17, 670-672.
- Jacobs, A.M. (1995). Zur Rolle phonologischer Prozesse beim Lesen. Antrag zum DFG Projekt #7 der Forschergruppe "Dynamik kognitiver Repräsentationen", Philipps-Universität Marburg.
- Jacobs, A.M. & Grainger, J. (1992). Testing a semistochastic variant of the interactive activation model in different word recognition experiments. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 18, 1174-1188.
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1994). Models of visual word recognition : Sampling the state of the art. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20, 1311-1334.
- Jakimik, J., Cole, R. A., & Rudnicky, A. I. (1985). Sound and spelling in spoken word recognition. Journal of Memory and Language, 24, 165-178.
- Jared, D. (1995, November). Spelling-sound consistency affects the naming of high-frequency words. Paper presented at the annual meeting of the Psychonomic Society, Los Angeles, CA.
- Jared, D., McRae, K., & Seidenberg, M. S. (1990). The basis of consistency effects in word naming. Journal of Memory and Language, 29, 687-715.
- Korte, W. (1923). Ueber die Gestaltauffassung im indirekten Sehen. Zeitschrift fuer Psychologie, 93, 17-82.
- Lakatos, I., & Musgrave, A. (Eds.) (1970). Criticism and the growth of knowledge. New York : Cambridge University Press.

- Lass, U. (1995). Einfluß von Sprache auf Verarbeitungsprozesse im Kurzzeitgedächtnis. Unveröffentlichte Habilitationsschrift, Universität Göttingen.
- Levin, J.A. (1976). Proteus : An activation framework for cognitive process models (Tech. rep. No. ISI/WP 2). Marina del Rey : University of Southern California, Information Sciences Institute.
- MacWhinney, B., Bates, E., & Kliegl, R. (1984). Cue validity and sentence interpretation in English, German, and Italian. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 23, 127-150.
- Marcus, G.F., Brinkmann, U., Clahsen, H., Wiese, R., & Pinker, S. (1995). German inflection : The exception that proves the rule. Cognitive Psychology, 29, 189-256.
- Marslen-Wilson, W.D. & Welsh, A. (1978). Processing interactions and lexical access during word recognition in continuous speech. Cognitive Psychology, 10, 29-63.
- Massaro, D. W., & Cohen, M. M. (1994). Visual, orthographic, phonological, and lexical influences in reading. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20, 1107-1128.
- Massaro, D. W., & Cowan, N. (1993). Information processing models : Microscopes of the mind. Annual Review of Psychology, 44, 383-425.
- Massaro, D. W., & Friedman, D. (1990). Models of integration given multiple sources of information. Psychological Review, 97, 225-252.
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception : Part I. An account of basic findings. Psychological Review, 88, 375-407.
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1988). Parallel distributed processing : Explorations in the microstructure of cognition (Vol. 3). Cambridge, MA : Bradford Books.
- Miller, G. A. (1993). Wörter : Streifzüge durch die Psycholinguistik. Frankfurt : Zweitausendeins.
- Morton, J. (1969). Interaction of information in word recognition. Psychological Review, 76, 165-178.
- Moser, K., Gadenne, V., & Schröder, J. (1988). Under what conditions does confirmation seeking obstruct scientific progress? Psychological Review, 95, 572-574.
- Newell, A. (1990). Unified theories of cognition. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Norris, D.G. (1994). A quantitative model of reading aloud. Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance, 20, 1212-1232.
- Paap, K., Newsome, S. L., McDonald, J. E., & Schvaneveldt, R. W. (1982). An activation-verification model for letter and word recognition : The word superiority effect. Psychological Review, 89, 573-594.
- Peressotti, F. & Grainger, J. (1995). Letter-Position coding in random consonant arrays. Perception & Psychophysics, 57, 875-890.
- Perfetti, C. A., Zhang, S., & Berent, I. (1992). Reading in English and Chinese : Evidence for a "Universal" phonological principle. In R. Frost and L. Katz (Eds.), Orthography, Phonology, Morphology, and Meaning (pp. 227 - 248). Amsterdam : North-Holland.
- Pinker, S. (1994). The language instinct. Harmondsworth : Allen Lane.
- Popper, K.R. (1935). Logik der Forschung. Vienna : Springer.
- Popper, K.R. (1972). Objective knowledge. Oxford : The Clarendon Press.
- Popper, K.R. (1963). Conjectures and refutations. New York : Harper & Row.
- Popper, K.R. (1984). Auf der Suche nach einer besseren Welt. München : Piper.
- Prechelt, L. (1996). A quantitative study of experimental evaluations of neural network learning algorithms : Current research practice. Neural Networks, 9, 457-462.
- Pugh, K. R., Rexer, K., & Katz, L. (1994). Evidence for flexible coding in visual word recognition. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20, 807-825.
- Pylyshyn, Z. W. (1989). Computing in cognitive science. In M. I. Posner (Ed.), Foundations of cognitive science (pp. 49-91). Cambridge, Mass. : MIT Press.
- Roberts, S., & Sternberg, S. (1993). The meaning of additive reaction-time effects : Tests of three alternatives. In : D. E. Meyer & S. Kornblum (Eds.), Attention & Performance XIV : Synergies in Experimental Psychology, Artificial Intelligence, and Cognitive Neuroscience (pp. 611-653). Cambridge, MA : MIT Press.
- Rosson, M. B. (1985). The interaction of pronunciation rules and lexical representations in reading aloud. Memory & Cognition, 13, 90-99.
- Rubenstein, H., Lewis, S.S., & Rubenstein, M.A. (1971). Evidence for phonemic recoding in visual word recognition. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 10, 647-657.
- Rumelhart, D. E. (1977). Toward an interactive model of reading. In S. Dornic (Ed.), Attention & Performance VI (pp. 573-603). Hillsdale : Erlbaum.
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1982). An interactive activation model of context effects in letter perception : Part II. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. Psychological Review, 89, 60-94.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. Psychological Bulletin, 119, 149-158.
- Sears, C.R., Hino, Y. & Lupker, S.J. (1995). Neighborhood size and neighborhood frequency effects in word recognition. Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance, 21, 876-900.
- Seidenberg, M. S., Petersen, A. S., McDonald, K., & Plaut, D. C. (1996). Pseudohomophone effects and models of word recognition. Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition, 22, 48-62.
- Shepard, R.N. (1994). Perceptual-cognitive universals as reflections of the world. Psychonomic Bulletin & Review, 1, 2-28.
- Simon, H.A., & Kaplan, C.A. (1989). Foundations of cognitive science. In M. I. Posner (Ed.), Foundations of Cognitive Science (pp. 1-47). Cambridge, MA : MIT Press.
- Spielberg, N., & Anderson, B. D. (1985). Seven ideas that shook the universe. New York : Wiley.

- Stone, G. O., & Van Orden, G. C. (1993). Strategic control of processing in word recognition. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 19, 744-774.
- Stone, G. O., & Van Orden, G. C. (1994). Building a resonance framework for word recognition using design and system principles. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20, 1248-1268.
- Stone, G. O., Vanhoy, M., & Van Orden, G. C. (in press). Perception is a two-way street : Feedforward and feedback phonology in visual word recognition. Journal of Memory and Language, in press.
- Tack, W. H. (1976). Stochastische Lernmodelle. Berlin : Kohlhammer.
- Treiman, R., Mullennix, J., Bijeljac-Babic, R., & Richmond-Welty, E. D. (1995). The special role of rimes in the description, use, and acquisition of English orthography, Journal of Experimental Psychology : General, 124, 107-136.
- Uttal, W. R. (1990). On some two-way barriers between models and mechanisms. Perception & Psychophysics, 48, 188-203.
- Van Orden, G. C., & Goldinger, S. D. (1994). Interdependence of form and function in cognitive systems explains perception of printed words. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20, 1269-1291.
- Van Orden, G. C., Johnston, J. C., & Hale, B. L. (1988). Word identification in reading proceeds from spelling to sound to meaning. Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition, 14, 371-385.
- Van Orden, G. C., Aitchison, C. S., & Podgornik, M. N. (1996). When a ROWS is not a ROSE : Null effects in the absence of cognitive structures. Manuscript submitted for publication.
- Venezky, R. L., & Massaro, D. W., (1987). Orthographic structure and spelling-sound regularity in reading English words. In Allport, A., MacKay, D., Prinz, W., Scheerer, E. (Eds.), Language perception and production : Shared mechanism in listening, speaking, reading and writing. (pp. 158-179), Academic Press.
- Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skill. Psychological Bulletin, 101, 192-212.
- Wiese, R. (1996). The phonology of German. New York : Oxford University Press
- Wydell, T. N., Butterworth, B., & Patterson, K. (1995). The inconsistency of consistency effects in reading : The case of Japanese Kanji. Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition, 21, 1155-1168.
- Ziegler, J. C. (1996). La lecture en tant que système de résonance : une approche expérimentale et computationnelle de l'activation et de la rétroaction phonologique. Unpublished doctoral dissertation, Université de Provence, Marseille, France.
- Ziegler, J. C. & Jacobs, A. M. (1995). Phonological information provides early sources of constraint in the processing of letter strings. Journal of Memory and Language, 34, 567-593.
- Ziegler, J. C., Jacobs, A. M., & Stone, G. O. (1996). Statistical analysis of the bi-directional inconsistency of spelling and sound in French. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 28, 504-515.
- Ziegler, J. C., Montant, M., & Jacobs, A. M. (in press c). The feedback consistency effect in French. Submitted for publication.
- Ziegler, J. C., Rey, A., & Jacobs, A. M., (in press d). Quantitative predictions of identification thresholds and serial error functions : New constraints for models of word recognition. Submitted for publication.
- Ziegler, J. C., Stone, G. O., & Jacobs, A. M. (in press a). What's the pronunciation for \_OUGH and the spelling for /u/? A database for computing feedforward and feedback inconsistency in English. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers.
- Ziegler, J. C., Van Orden, G. C., & Jacobs, A. M. (in press b). Phonology can help or hurt the perception of print. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance.

## APPENDIX

### A1. Cleaning Procedure for all 3-,4-, and 5-letter English words taken from the Celex database (Baayen, Piepenbrock & van Rijn, 1993).

- 1) All 3-,4-, and 5-letter English words were extracted from the Celex database
- 2) All words which had a written (Fwrit) and a spoken frequency (Fspok) smaller than or equal to 1 per million were excluded
- 3) Abbreviations, proper names, etc. were excluded
- 4) Homograph entries were reduced according to the following procedure :
  - homophonic homographs (e.g., verb/noun : to beat- the beat) were reduced to one single entry in the orthographic and phonologic lexicons. Fwrit and Fspok were summed across the multiple homograph entries.
  - non-homophonic homographs (e.g., lead - lead) were kept as two separate entries in the phonological lexicon and one entry in the orthographic lexicon. Their written frequencies (Fwrit) were summed ; their spoken frequencies (Fspok) were kept separate (not summed).
  - non-homophonic homograph alternatives with identical frequencies but slight variations in their phonology depending on regional or contextual constraints were reduced to one standard entry in both lexicons according to HARRAP's DICTIONARY. Note : Those multiple entries are alternative pronunciations ; they must be separated from real non-homophonic homographs because they have identical frequencies.
- 5) For all homophones (e.g., sea - see ; n=444, the spoken frequencies (Fspok) were summed.
- 6) All words with two or more syllables were excluded.
- 7) All words with a grapheme decomposition of 2 were excluded (e.g. mayor, with /m8R/ as phonological code, with "may-or" as graphemic decomposition).

This cleaning procedure resulted in an orthographic lexicon consisting of 2494 entries (409 three-letter words, 1151 four-letter words and 933 five-letter words).

### A2. Read out procedure used in the simulations.

The read out procedure used in these simulation studies follows the design principles described in Grainger and Jacobs (1996). For the Coltheart et al. (1977) and Seidenberg et al. (1996) tests, as well as the second Stone et al. (in press) test, the critical dependent variable was correct response time to nonwords. In the MROM, a "No" response is generated when neither the activation of a lexical unit ( $\mu$  value) nor the global lexical activity ( $s$  value) have reached the response criterions ( $M$  and  $\Sigma$ , respectively) before the temporal deadline ( $T$  criterion). Thus response time for a "No" response is simply given by the value of the  $T$  criterion. This value is a function of the global lexical activity ( $s$ ) generated by the target stimulus. A high global lexical activity is interpreted as a high probability that the target stimulus is a word. Practically, we assume that during the early phases of stimulus processing, the computed  $s$  value indexes the likelihood that the stimulus is a word. A high  $s$  value will encourage participants to set a longer deadline, that is, a higher  $T$  criterion (Coltheart et al., 1977 ; Jacobs & Grainger, 1992). For the present simulations, we monitored the  $s$  value at processing cycle 15 for each stimulus. In the MROM-P simulations, if  $s(15) > 0.33$ , then  $T = 27$  cycles, else  $T = 25$  cycles. For the MROM simulations, if  $s(15) > 0.3$ , then  $T = 27$  cycles, else  $T = 25$  cycles.

For the first Stone et al. (1996) test, the critical dependent variable was correct response time words. In the MROM, a "Yes" response is generated when either the activation of a lexical unit ( $\mu$  value) or the global lexical activity ( $s$  value) have reached the response criterions ( $M$  and  $\Sigma$ , respectively) before the temporal deadline ( $T$  criterion). For simplicity, we did not consider in the present simulations the possible role of global orthographic activity on "Yes" responses. Thus the response time was computed by determining when the activation of lexical units reached the  $\Sigma$  criterion. This criterion was 0.67 for the MROM-P and 0.47 for the MROM. These values correspond to 90% of the asymptotic activation values for lexical units in each model (Jacobs & Grainger, 1992).

## Appendice II

## A phoneme effect in visual word recognition

Arnaud Rey  
CRNC - CNRS, Marseille, France

Arthur M. Jacobs  
Philipps-University, Marburg, Germany

Florian Schmidt-Weigand  
Philipps-University, Marburg, Germany

Johannes C. Ziegler  
CREPCO - CNRS, Aix-en-Provence, France

In alphabetic writing systems like English or French, many words are composed of more letters than phonemes (e.g., BEACH is composed of five letters and three phonemes, i.e., /biJ/). This is due to the presence of higher order graphemes, that is, groups of letters that map into a single phoneme (e.g., EA and CH in BEACH map into the single phonemes /i/ and /J/, respectively). The present study investigated the potential role of these subsyllabic components for the visual recognition of words in a perceptual identification task. In Experiment 1, we manipulated the number of phonemes in monosyllabic, low frequency, five-letter, English words, and found that identification times were longer for words with a small number of phonemes than for words with a large number of phonemes. In Experiment 2, this "phoneme effect" was replicated in French for low frequency, but not for high frequency, monosyllabic words. These results suggest that subsyllabic components, also referred to as functional orthographic units, play a crucial role as elementary building blocks of visual word recognition.

A critical characteristic of alphabetic writing systems like English or French is the non-isomorphic relation between orthography and phonology. That is, considering the letter as the basic element of the word's orthographic representation and the phoneme as the basic distinctive element of the word's phonological representation (Jakobson, Fant & Halle, 1952), one can often find a mismatch between the number of letters and the number of phonemes. For example, the English word BEACH (-> /biJ/) has five letters but only three phonemes while the English word CRISP (-> /krɪsp/) has five letters and five phonemes. CRISP and BEACH have thus the same number of letters but a different number of phonemes.

In an attempt to reduce the mismatch between the number of letters and the number of phonemes, linguistic and psycholinguistic theories introduced the notion of grapheme (e.g., Coltheart, 1978 ; Venezky, 1970). A grapheme is defined as the written representation of a phoneme (see Berndt, Lynne D'Autrechy, and Reggia, 1994 ; Berndt, Reggia, and Mitchum, 1987 ; Henderson, 1985). One of the properties of graphemes is that they can be composed of either a single letter or a group of letters. This property allows one to distinguish between different orders of graphemes. For example, the letter A in GLASS can be defined as a first-order grapheme, and the letter pair EA in BEACH as a second-order grapheme. Another property of graphemes is that higher-order graphemes are composed of lower-order graphemes. In our example, the second-order grapheme EA is composed of two first-order graphemes, i.e., E and A. These properties of graphemes imply that during the orthography-to-phonology computation, the reading system has to group some letters into chunks (i.e., higher-order graphemes) in order to activate the correct sequence of phonemes, and accordingly, to avoid letter-by-letter processing. The necessity to group letters into higher-order-graphemes and the potential conflict between a letter-level and a higher-order-grapheme-level of processing is a crucial aspect of reading and learning-to-read that has been almost entirely ignored by psycholinguistic research and computational modeling.

The purpose of the present study was to investigate whether the presence of higher-order graphemes affected word processing times. More precisely, three questions were addressed. (1) Does it take more time to recognize words that have more letters than phonemes? In Experiment 1, we manipulated the number of phonemes for three classes of low-frequency, 5-letter English monosyllabic words. We found that word identifica-

---

This research was supported by a grant from the French Ministry of Education and Research (#95124, programme Sciences Cognitives) to A. Rey and a grant from the German Research Office (DFG ; Mittel der Forschergruppe "Dynamik kognitiver Repräsentationen", Teilprojekt 7 an der Philipps-Universität Marburg) to A. Jacobs.

We are grateful to Sébastien Gonzalez, Jonathan Grainger, Jay Holden, Anne-Françoise Roller and Guy Van Orden for their precious help in the realization of this study. Many thanks also to Ram Frost, Françoise Joubaud, Sylvan Kornblum, and Tatjana Nazir for their helpful support.

Correspondence should be addressed to A. Rey, Centre de Recherche en Neurosciences Cognitives, CNRS, 31, Chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France (e-mail : frog@lnf.cnrs-mrs.fr).

tion latencies were longer for words having a smaller number of phonemes. (2) Can this « phoneme effect » be extended to a different alphabetic system? In Experiment 2, we manipulated the number of phonemes for two classes of low-frequency, 5-letter French monosyllabic words. The phoneme effect was replicated in French. (3) Can the phoneme effect be obtained for high-frequency words? The frequency manipulation in Experiment 2 showed that the phoneme effect was only robust for low-frequency words.

Both of these experiments were run using a perceptual identification task because perceptual identification does not necessarily imply an orthography-to-phonology computation and thus provides a more conservative test of the existence of phonological effects in visual word recognition. The present research used a variant of the ascending method of limits (e.g., Feustel, Shiffrin, & Salasoo, 1983 ; Grainger & Segui, 1990 ; Vokey, Baker, Hayman, & Jacoby, 1986 ; Snodgrass & Poster, 1992 ; Ziegler, Rey, Jacobs, in press) in which visual information is progressively displayed by steadily increasing the luminance of a target word located in the middle of the screen, so that the word slowly emerges from the background (Rey, Jacobs, Chesnet, Bijeljac-Babic & Grainger, submitted). In this task, participants are asked to interrupt the luminance increasing process as soon as they have identified the target word. Then, they enter their response on the keyboard. Dependent variables are response time and participant's report.

### EXPERIMENT 1

**Participants.** Twenty-seven Arizona State University introductory psychology students participated in the experiment. All were native English speakers and had normal or corrected to normal vision.

**Stimuli and Apparatus.** Three groups of 25 monosyllabic five-letter words were selected. The three groups contained words that were composed of either three, four, or five phonemes (e.g., TEETH -> /tiT/ in the 3-phoneme condition ; BLEAT -> /blit/ in the 4-phoneme condition ; BLAST -> /bl#st/ in the 5-phoneme condition). Frequency was estimated using the CELEX frequency count (Baayen, Piepenbrock, & van Rijn, 1993). The mean frequency of the three, four, and five phoneme groups was 11.4, 11.3, and 11.3 occurrences per million, respectively. The three lists were matched as closely as possible for the number of orthographic neighbors (2.5, 2.5 and 2.6 for the three-, four-, and five-phoneme groups, respectively), the number of higher frequency neighbors (1.7, 1.6, and 1.7), and the summed bigram frequency (6807, 5941, and 6640 respectively).

The experiment was controlled by an IBM PC 486 DX2 computer. The stimulus words were typed in lowercase. The experiment was run in a dark room that was lit with a lamp placed behind the participants. The contrast of the screen was set at its maximum, i.e., the background was as dark as possible. Stimulus luminance, on the other hand, was set to be as high as possible.

**Procedure.** Each trial began with a 1-second presentation of a fixation mark (« + ») in the center of the screen. The fixation mark was replaced by the target word that was written in black (i.e., completely invisible, the background also being black). The luminance of the target word was then progressively increased by modifying the color of the target word. This was done by incrementing every 100ms the values of the RGB (Red, Green, Blue) counters of one unit. Thus, every counter was set at 0 at the beginning. After 100 ms, the Red counter was set at 1 (the Green and Blue counters still being at 0). After 200 ms, the RGB counters were at 1-1-0, respectively. And so forth : after 300 ms -> RGB = 1-1-1 ; after 400 ms -> RGB = 2-1-1 ; etc. As soon as the participants could identify the target word, they interrupted the luminance increasing process by pressing the space bar. Then, the item was replaced by a pattern mask and participants had to enter what they had seen using the keyboard. After this, they pressed the « return » key and the screen remained black for 500 ms until the next trial. For each trial, response time was recorded (that is, the time interval between the onset of the luminance increasing procedure and the space bar pressing). Participants were instructed to stress accuracy rather than speed.

**Results.** Mean correct response times and error rates for the three experimental conditions are reported in Table 1. The trimming procedure excluded scores greater than 3 SDs above and below the participant's overall response time. Analyses of variance (ANOVAs) were conducted using both participants ( $F_1$ ) and items ( $F_2$ ) as random factors, treating the number of phonemes as a within-participant factor.

**Table 1**

*Mean Correct Response Times (RT in milliseconds), Percentage of Errors (Err%), and the corresponding standard errors (SE) for the three lists of words in Experiment 1.*

	Number of phonemes		
	3	4	5
RT (ms)	2235	2219	2207
SE	58	58	57
Err (%)	3.7	1.1	2.2
SE	.9	.5	.5

As shown in Table 1, response times gradually increase as the number of phonemes composing the word decreases,  $F_1(2, 26) = 5.45$ ,  $p < .01$ ;  $F_2(2, 72) = 3.66$ ,  $p < .05$ . A significant 28 ms difference was observed between the 3- and 5-phoneme conditions,  $F_1(1, 26) = 10.81$ ,  $p < .01$ ;  $F_2(1, 48) = 7.23$ ,  $p < .01$ . The difference between the 3- and 4-phoneme conditions was not significant,  $F_1(1, 26) = 3.62$ ,  $.05 < p < .1$ ;  $F_2(1, 48) = 2.62$ ,  $p > .1$ , nor was the difference the 4- and 5-phoneme conditions,  $F_1(1, 26) = 1.92$ ,  $p > .1$ ;  $F_2(1, 48) = 1.14$ ,  $p > .1$ . The error data did not show a clear phoneme effect,  $F_1(2, 26) = 4.29$ ,  $p < .05$ ;  $F_2(2, 72) = 1.95$ ,  $p > .1$ .

## EXPERIMENT 2

**Participants.** Twenty-two participants from the Center for Research in Cognitive Neuroscience participated in the experiment. All were native French speakers and had normal or corrected to normal vision.

**Stimuli, Apparatus, and procedure.** Four lists of 20 monosyllabic 5-letter words were created, of which two contained low-frequency words (LF words,  $F < 10$  occurrences per million), and two were composed of high frequency words (HF words,  $F > 50$  occurrences per million). One list in each frequency condition contained words that were composed of 2 or 3 phonemes (2/3P words); the other list contained words composed of 4 phonemes (4P words). For example, CRAIE  $\rightarrow$  /kR\$/ belonged to the low frequency 2-3 phonemes condition (LF-2/3P); TRIPE  $\rightarrow$  /tRip/ to the low frequency 4 phonemes condition (LF-4P); VINGT  $\rightarrow$  /vê/ to the high frequency 2-3 phonemes condition (HF-2/3P); GLACE  $\rightarrow$  /glas/ to the high frequency 4 phonemes condition (HF-4P). Frequency was estimated using the BRULEX frequency count (Content, Mousty, & Radeau, 1990). The mean frequency of the LF-2/3P, LF-4P, HF-2/3P and HF-4P conditions was respectively : 5.1, 5.2, 150.8, and 149.3. The mean number of phonemes for these four lists was respectively 2.9, 4, 2.9 and 4. The four lists were also matched as closely as possible for the number of orthographic neighbors (2.3, 2.1, 2.2, and 2.2, respectively), the number of higher frequency neighbors (1.7, 1.5, 0.3, and 0.3, respectively), and the summed bigram frequency (8300, 9645, 9396, and 9700, respectively). The experiment was controlled by a Compaq Pentium Prolinea 575e microcomputer. The experimental set up and procedure were identical to the one used in Experiment 1

**Results.** Mean correct response times and error rates for the four experimental conditions are reported in Table 2. Because of an error in stimulus selection, one low frequency word composed of three phonemes (RHUME) was repeated during the experiment and this item was thus removed from the analysis. The trimming procedure excluded scores greater than 3 SDs above and below the participant's overall response time. Analyses of variance (ANOVAs) were conducted using both participants ( $F_1$ ) and items ( $F_2$ ) as random factors, treating the number of phonemes as a within-participant factor.

**Table 2**

*Mean Correct Response Times (RT in milliseconds), Percentage of Errors (Err%), and the corresponding standard errors (SE) for the four lists of words in Experiment 2.*

	RT (ms)		Err (%)	
	2-3 Phon.	4 Phon.	2-3 Phon..	4 Phon.
Low F.	2259	2220	2.29	1.38
SE	55	51	.87	.59
High F.	2192	2180	.70	.69
SE	48	46	.38	.38

As shown in Table 2, response times were affected by both frequency and number of phonemes. High frequency words were identified faster than low frequency words,  $F_1(1, 21) = 28.53$ ,  $p < .0001$ ;  $F_2(1, 76) = 27.97$ ,  $p < .0001$ . Similarly, words with 4 phonemes were identified faster than words with 2-3 phonemes,  $F_1(1, 21) = 14.87$ ,  $p < .001$ ;  $F_2(1, 76) = 7.58$ ,  $p < .01$ . Planned comparisons investigated the effect of the number of phonemes in the two frequency conditions. In the low frequency condition, 4-phonemes words were responded faster than 2-3 phonemes words,  $F_1(1, 21) = 13.39$ ,  $p < .005$ ;  $F_2(1, 36) = 8.78$ ,  $p < .005$ . In the high frequency condition, no significant difference was observed between the 4- and 2-3-phonemes conditions,  $F_1(1, 21) = 1.1$ ,  $p > .1$ ;  $F_2(1, 38) = .82$ ,  $p > .1$ . The error data replicated the pattern of performance obtained with response times. However, most of the differences did not reach significance.

## DISCUSSION

The results of this study can be summarized as follows : in a perceptual identification task, we obtained longer identification times for words having a smaller number of phonemes. This phoneme effect was observed in English and French for low-frequency 5-letter monosyllabic words, but was not obtained in French for high-frequency 5-letter monosyllabic words.

The present research indicates that grouping letters into graphemes for an efficient orthography-to-phonology computation requires additional processing time. However, as suggested by current computational models of visual word recognition in which word identification results from two parallel and interdependent processes, whole word orthographic processing and sublexical orthography-to-phonology processing (Coltheart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993 ; Jacobs, Rey, Ziegler, & Grainger, 1998), there is a dissociation between the processing of high and low frequency words. Indeed, high frequency words seem less affected by the conflicts arising during the sublexical orthography-to-phonology computation (i.e., the conflict between a letter-level and a grapheme-level of processing), indicating that their identification is mainly and rapidly performed on the basis of whole word orthographic processing. Alternatively, low frequency words have a less stable orthographic representation and are thus more affected by the potential problems arising in the letter-to-phoneme translation. A similar result is observed when manipulating the consistency/regularity of the mapping between sublexical orthography and sublexical phonology (e.g., Content, 1991 ; Treiman, Mullennix, Bijeljac-Babic, & Richmond-Welty, 1995 ; Waters & Seidenberg, 1985).

There may be, however, an alternative interpretation of the present phoneme effect. As a matter of fact, by manipulating the number of phonemes in a word, we also unavoidably changed their syllabic structure : 5-phoneme words had a CCVCC structure, 4-phonemes words had either a CVCC or a CCVC structure, and 3-phoneme words had mostly a CVC structure. Thus, one could argue that processing of 3-phoneme words was not inhibited due to competition between single- and multi-letter graphemes but rather that the processing of the 5-phoneme words was facilitated due to more constraining syllabic structures. Indeed, CCVCC words may be easier to recognize than CVC words because they are better specified in terms of their phonology and reside in a less dense phonological neighborhood. CCVCC words may then activate less competitors in the phonological lexicon compared to CVC words (which are more common structures in English and French). Therefore, the critical factor in the present experiment could be the number of phonological neighbors or, in other terms, the number of graphemes shared by the target word with other lexical entries.

Note, however, that there seems to be no independent empirical support for the existence of a phonological neighborhood effect in visual word recognition. The few studies that have investigated the effects of phonological neighbors on visual word recognition have reported null effects (Brown & Watson, 1994 ; Peereman & Content, 1997). In contrast, in a study on phonological dyslexia, Derouesne and Beauvois (1979) reported that some of their patients exhibited far greater problems when reading nonwords with multi-letter graphemes than when reading nonwords with single-letter graphemes. In addition, in a manipulation comparable to ours, Rastle and Coltheart (in press) recently reported a similar phoneme effect in nonword naming. This effect was present in both the human data and the simulations of their dual route cascaded model. An analysis of the locus of the effect within their simulation model showed that it was due to competition between multi-letter and single-letter graphemes for priority within the nonlexical route.

Thus, our data join those of Rastle and Coltheart and others to suggest that the reading process is influenced by the fine grained phonographic structure of words. It indicates that word identification processes are sensitive to the syllabic structure of words and to subsyllabic components such as graphemes. More precisely, the number and the position of graphemes in a word, together with the number of shared graphemes among different lexical entries, are factors that seem to critically influence the reading process. It thus supports the view according to which « (...) the proper unit of the reading system is neither the single letter nor the whole word but a higher-order invariant derived from grapheme-phoneme correspondences » (Gibson, Pick, Osser & Hammond, 1962, p. 570).

The idea according to which the reading system develops intermediate processing units during reading acquisition has been discussed at length in previous studies. However, there was considerable disagreement on the size of these units, that is, if these units should be syllables, morphemes, consonant and vowel clusters, onset and rimes, etc. (for a review of these different suggestions, see Rapp, 1992). We will not argue here for the predominance of a single reading unit. Instead, we favor a « hierarchical » point of view in which different sizes of reading units co-exist. These different units would emerge during reading acquisition, with some units having a primary and more fundamental role, and other units - generally of a larger size - being established later (the functional role of these latter units being to increase the automaticity and rapidity of skilled reading).

In such a framework, graphemes could be considered as the minimal and primary reading units. Larger and secondary units may be developed during the maturation of reading, allowing the reader to detect and recognize written words more rapidly. For example, onset and rimes may be possible larger units of the reading system, in English in particular (see Bowey, 1990, 1993 ; Treiman, 1989 ; Treiman & Chafetz, 1987 ; Treiman, Goswami, & Bruck, 1990 ; Treiman et al., 1995 ; Treiman & Zukowski, 1988 ; Wise, Olson, & Treiman, 1990). Syllables may also be considered as higher order units, and may even be more adequate units in French (see Ferrand, Segui, & Grainger, 1996 ; Ferrand, Segui, & Humphreys, 1996 ; Prinzmetal, Treiman & Rho, 1986 ; Rapp, 1992 ; Spoehr & Smith, 1975 ; Taft, 1979). Together, these different levels of reading units would co-exist in the reading system as stable patterns of letter representations. The stability of these patterns

may depend on their frequency of occurrence, that is, on the number of times that they have been experienced and associated with their phonological counterpart. Following Laberge and Samuel (1974), we conclude that the development of higher-order reading units during reading acquisition is a critical feature of skilled visual word recognition.

## REFERENCES

- Baayen, R. H., Piepenbrock, R., & van Rijn, H., 1993. The CELEX Lexical Database (CD-ROM). Linguistic Data Consortium, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.
- Berndt, R. S., Lynne D'Autrechy, C., & Reggia, J. A., 1994. Functional pronunciation units in English words. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition* 20, 977-991.
- Berndt, R. S., Reggia, J. A., & Mitchum, C. C., 1987. Empirically derived probabilities for grapheme-to-phoneme correspondences in English. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 19, 1-9.
- Bowey, J. A., 1990. Orthographic onsets and rimes as functional units of reading. *Memory and Cognition* 18, 419-427.
- Bowey, J. A., 1993. Orthographic rime priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 46A, 247-271.
- Brown, G. D. A., & Watson, F. L., 1994. Spelling-to-sound effect in single word reading. *British Journal of Psychology* 85, 181-202.
- Coltheart, M., 1978. Lexical access in simple reading tasks. In : Underwood, G. (Ed.), *Strategies of Information Processing*. London : Academic Press.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, H., 1993. Models of reading aloud : Dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review* 100, 589-608.
- Content, A., 1991. The effect of spelling-to-sound regularity on naming in French. *Psychological Research* 53, 3-12.
- Content, A., Mousty, P., & Radeau, M., 1990. BRULEX : Une base de données lexicales informatisée pour le Français écrit et parlé. *L'Année Psychologique* 90, 551-566.
- Derouesne, J., & Beauvois, M. F., 1979. Phonological processing in reading : data from alexia. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry* 42, 1125-1132.
- Ferrand, L., Segui, J., & Grainger, J., 1996. Masked priming of words and picture naming : The role of syllabic units. *Journal of Memory and Language* 35, 708-723.
- Ferrand, L., Segui, J., & Humphreys, G. W., 1996. The syllable's role in word naming. *Memory and Cognition* 25, 458-470.
- Feustel, T. L., Shiffrin, R. M., & Salasoo, A., 1983. Episodic and lexical contributions to the repetition effect in word identification. *Journal of Experimental Psychology : General* 112, 309-346.
- Gibson, E. J., Pick, A. D., Osser, H., & Hammond, M., 1962. The role of grapheme-phoneme correspondence in the perception of words. *American Journal of Psychology* 75, 554-570.
- Grainger, J., & Segui, J., 1990. Neighborhood frequency effects in visual word recognition : A comparison of lexical decision and masked identification latencies. *Perception & Psychophysics* 47, 191-198.
- Henderson, L., 1985. On the use of the term 'grapheme'. *Language and Cognitive Processes* 2, 135-148.
- Jacobs, A. M., Rey, A., Ziegler, J. C., & Grainger, J., 1998. MROM-P : An interactive activation, multiple read-out model of orthographic and phonological processes in visual word recognition. In : J. Grainger & A. M. Jacobs (Eds.). *Localist connectionist approaches to human cognition*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, pp. 147-188.
- Jakobson, R., Fant, M. & Halle, M., 1952. *Le concept de trait distinctif. Preliminaries to speech analysis*. Cambridge (Mass.) : The M.I.T. Press.
- Laberge, D., & Samuel, S. J., 1974. Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology* 6, 293-323.
- Peereman, R., & Content, A., 1997. Orthographic and phonological neighborhood in naming : Not all neighbors are equally influential in orthographic space. *Journal of Memory and Language* 37, 382-410.
- Prinzmetal, W., Treiman, R., & Rho, S., 1986. How to see a reading unit. *Journal of Memory and Language* 25, 461-475.
- Rapp, B. C., 1992. The nature of sublexical orthographic organization : The bigram trough hypothesis examined. *Journal of Memory and Language* 31, 33-53.
- Rastle, K. & Coltheart, M. (1998). Whammy and double whammy : Length effects in nonword naming. *Psychonomic Bulletin and Review*, 5, 277-282.
- Rey, A., Jacobs, A. M., Chesnet, D., Bijeljac-Babic, R., & Grainger, J., submitted. LIP : A Luminance Increasing Procedure.
- Snodgrass, J. G., & Poster, M., 1992. Visual-word recognition thresholds for screen-fragmented names of the Snodgrass and Vanderwart pictures. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 24, 1-15.
- Spoehr, K. T., & Smith, E. E., 1973. The role of syllables in perceptual processing. *Cognitive Psychology* 5, 71-89.
- Taft, M., 1979. Lexical access via an orthographic code : The basic orthographic syllabic structure (BOSS). *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 18, 21-39.
- Treiman, R., 1989. The internal structure of the syllable. In : G. Carlson & M. Tanenhaus (Eds.), *Linguistic structure in language processing*. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer.
- Treiman, R., & Chafetz, J., 1987. Are there onset- and rime- like units in written words ? In : M. Coltheart (Ed.), *Attention & Performance XII*. London : Erlbaum.
- Treiman, R., Goswami, U., & Bruck, M., 1990. Not all words are alike : Implications for reading development and theory. *Memory and Cognition* 18, 559-567.
- Treiman, R., Mullennix, J., Bijeljac-Babic, R., & Richmond-Welty, E. D., 1995. The special role of rimes in the description, use, and acquisition of English orthography. *Journal of Experimental Psychology* 124, 107-136.

- Treiman, R., & Zukowski, A., 1988. Units in reading and spelling. *Journal of Memory and Language* 27, 466-477.
- Venezky, R. L., 1970. *The structure of English orthography*. The Hague : Mouton.
- Voker, J. R., Baker, J. G., Hayman, G., & Jacoby, L. L., 1986. Perceptual identification of visually degraded stimuli. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 18, 1-9.
- Warrington, E. K., & Weiskrantz, L., 1968. New method of testing long-term retention with special reference to amnesic patients. *Nature* 217, 972-974.
- Waters, G. S., & Seidenberg, M. S., 1985. Spelling-sound effects in reading : Time course and decision criteria. *Memory and Cognition* 13, 557-572.
- Wise, B. W., Olson, R. K., & Treiman, R., 1990. Subsyllabic units in computerized reading instruction : Onset-rime vs. postvowel segmentation. *Journal of Experimental Child Psychology* 49, 1-19.
- Ziegler, J., Rey, A., & Jacobs, A. M., 1998. Simulating individual word identification thresholds and errors in the fragmentation task. *Memory & Cognition* 26, 490-501.

## Appendice III

# Graphemes are perceptual reading units

Arnaud Rey  
CRNC-CNRS, Marseille, France

Johannes C. Ziegler

CREPCO-CNRS, Aix-en-Provence, France

Arthur M. Jacobs  
Philipps-University, Marburg, Germany

Graphemes are currently defined as the written representation of phonemes. For example, the word "BEACH" is composed of three phonemes (i.e., /b/, /i/, and /ʃ/) and consequently, three graphemes (i.e., "B", "EA", and "CH"). Graphemes can thus be considered as the minimal functional bridges between orthography and phonology. In the present study, we investigated the hypothesis that graphemes are processed by the reading system as perceptual units. We assumed that if the reading system processes graphemes as units, then detecting a letter in a word should be harder when this letter is embedded in a multi-letter grapheme than when it corresponds to a single-letter grapheme. In Experiment 1, done in English, participants were longer to detect a letter in a target word, when the letter was embedded in multi-letter grapheme (i.e., "A" in the grapheme "EA" like in "BEACH") than when it corresponded to a single-letter grapheme (i.e., "A" in "GRASS"). In experiment 2, this effect was replicated in French. Together, these results support the view according to which graphemes are minimal functional reading units in alphabetic written systems like English or French.

## INTRODUCTION

In alphabetic writing systems like English or French, letters are considered as the basic distinctive elements of the word's orthographic representation and phonemes as the basic distinctive elements of the word's phonological representation (Jakobson, Fant, & Halle, 1952). Each word is thus characterized along the orthographic and phonological dimensions by a particular sequence of letters and phonemes. Accordingly, reading suppose to retrieve the word's sequence of phonemes from the word's sequence of letters.

An examination of the relation between the number of letters and the number of phonemes in a corpus of English or French words shows that, in a majority of cases, words are composed of more letters than phonemes. As an example, the word BEACH is composed of five letters but only three phonemes (/Biʃ/). One way to surmount the letter/phoneme mismatch is to introduce the notion of *grapheme* (Coltheart, 1978 ; Venezky, 1970). A grapheme is defined as the written representation of a phoneme (Berndt, Lynne D'Autrechy, and Reggia, 1994 ; Berndt, Reggia, and Mitchum, 1987 ; for a discussion, see Henderson, 1985). Following this definition, there is a one-to-one relation between graphemes and phonemes (i.e., the number of graphemes in a word equals the number of phonemes) and consequently, graphemes can correspond either to a single-letter or a group of letters. In our example, the word BEACH is composed of one single-letter grapheme, B -> /b/, and two multi-letter graphemes, EA -> /i/ and CH -> /ʃ/. Therefore, graphemes, instead of letters, appear as the minimal functional bridges between orthographic and phonological codes.

Graphemes are incorporated at different levels in recent computational models of visual word recognition. First, the dual-route model, proposed by Coltheart, Curtis, Atkins, and Haller (1993), suggests that a letter string is processed by two parallel routes : a lexical and a non-lexical route. In the lexical route, the letter sequence activates in parallel lexical entries through a whole-word matching procedure. In the non-lexical route, the letter sequence is serially segmented into graphemes in order to perform a sub-lexical orthography-to-phonology computation. Second, the parallel and distributed processing model, proposed by Plaut, McClelland, Seidenberg, and Patterson (1996), suggests that graphemes are used as orthographic units at the orthographic level, in order to perform the orthography-to-phonology mapping. In both models, graphemes appear as crucial elements of the reading system.

---

This research was supported by a grant from the French Ministry of Education and Research (#95124, programme Sciences Cognitives) to A. Rey and by a grant from the German Research Foundation (DFG : Deutsche Forschungsgemeinschaft) to Arthur Jacobs. Correspondence should be addressed to A. Rey, Centre de Recherche en Neurosciences Cognitives, CNRS, 31, Chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France (e-mail : rey@lcf.cnrs-marse.fr)

However, an unsolved question remains with respect of both models : how does the reading system parse the letter sequence into graphemes ? The dual-route model suggests that a set of rule correspondances is used for the graphemic segmentation. The remaining question here is : which representational format or cognitive code does the reading system use to implement this set of rules given that rules belong mainly to high-level cognitive processes and seem less plausible for fast and automatic perception processes ? Similarly, Plaut et al. (1996) did not specify how does the reading system perform the graphemic segmentation. In their model, input letter strings are parsed into onset-nucleus-coda graphemes by turning on the corresponding grapheme nodes. Thus, it appears that these authors implicitly assume that graphemes are basic units of the reading system which leads paradoxically to the conclusion that graphemes are considered in their model as local representations (Grainger & Jacobs, 1998a).

A solution to the graphemic segmentation problem can be found in a boxological model proposed by Lamerge and Samuel (1974). These authors suggested that during the acquisition of reading, intermediate reading units (units situated between the letter and word levels) are developed within the reading system. The functional role of these units would be to increase the automaticity and rapidity of skilled reading and to allow progressively the processing of letter strings as wholes. The establishment of these intermediate units would likewise be a manner to push the reading system in the direction of an increased parallel processing of written words. The idea that graphemes could be such intermediate units was already suggested by Gibson, Pick, Osher, & Hammond (1962). Another argument in favour of this assumption comes from the fact that graphemes have a functional role with respect to phonological units. Graphemes could thus be viewed in such context as phonographic reading units (Peerman & Content, 1997).

How does the « reading unit » hypothesis solve the graphemic segmentation problem? If one assumes that the reading system develops representations of intermediate reading units, then the functional segmentation of a letter sequence could be done by activating a set of matching intermediate reading units. This solution is implicitly used in the Plaut et al. model (1996) despite that these authors do not explicitly assume that graphemes are reading units or localist representations of the reading system. Also, this « reading unit » solution could be a more functionally plausible alternative in order to perform the grapheme-to-phoneme conversion in the Coltheart et al. model (1993).

The purpose of the present study is to test experimentally the assumption that graphemes are processed as perceptual units by the reading system. Indeed, the psychological validity of graphemes has been assumed by many models of word recognition despite only few empirical data are available to support such assumption. As a window to explore unitization processes, a large number of studies used the letter detection procedure (for a review, see Healy, 1994). The preliminary idea in these manipulations is that the reading system process particular groups of letters as wholes or reading units. Therefore, searching for a letter embedded in a reading unit appears costly since subjects have to split the unit into its constituent letters in order to perform the task. Letter detection studies reported, for example, missing detections for letters embedded in high frequency short words such as THE (the target letter being E). Since these words are probably processed as wholes by the reading system, they consequently seem to mask the identification of their constituent letters (e.g., Corcoran, 1966 ; Drewnowski & Healy, 1977).

We followed the same logic in the present study. Indeed, if graphemes are processed as units by the reading system, then detecting a letter embedded in a multi-letter grapheme should be harder than detecting a letter being a single-letter grapheme itself. As an illustration, searching for the letter A in the word BEACH (A being embedded in the multi-letter grapheme EA -> /i/) should be harder than searching for A in the word GRASS (A being here a single-letter grapheme).

We tested this hypothesis in two experiments done in English (Experiment 1) and French (Experiment 2). In both experiments, we used the same experimental design. Subjects were presented a target letter followed by a word and had to decide whether or not the letter was in the word. In present trials, letters were either embedded in a multi-letter grapheme (e.g., A in BEACH) or were equivalent to a single-letter grapheme (e.g., A in GRASS). In addition, we performed a frequency manipulation of the words. In half of the grapheme conditions, words were of high frequency and for the other half, words were of low frequency. This manipulation was intended to test whether unitization is pre-lexical as suggested by the reading unit assumption. The prediction in this case is that if there is any evidence of a pre-lexical unitization procedure, then letter detection latencies should be independant of the lexical status of the target word.

## EXPERIMENT 1

### Participants

Participants were 21 psychology students from Macquarie University. All were native Australian-English speakers and had normal or corrected to normal vision.

### Stimuli and Apparatus

The stimulus set was composed of 60 target-present trials and 60 target-absent trials. The 60 target-present trials were divided into four lists of 15 monosyllabic, 5-letter English words (see Appendix A). Each list was matched between items for the target letter and for its position in the word. Two lists were composed of low-frequency words ( $F < 10$  occurrences per million) and two lists of high frequency words ( $F > 50$  occurrences per million). Each frequency list was matched between items for word frequency. Frequency was estimated using the CELEX frequency count (Baayen, Piepenbrock, & van Rijn, 1993). For one list of words in each fre-

quency condition, the target letter was embedded into a multi-letter grapheme. For the other list of words, the target letter had the status of a single-letter grapheme. That is, as an example, let A be the target letter. The four words in each experimental condition were : 1. HOARD in the low frequency - multi-letter grapheme condition ; 2. BRASH in the low frequency - single-letter grapheme condition ; 3. BOARD in the high frequency - multi-letter grapheme condition ; 4. STAFF in the high frequency - single-letter grapheme condition. The mean frequency values of each word list was respectively : 5.1, 5.1, 138.7 and 139.8 (occurrences per million). The experiment was controlled by a Macintosh SE computer. The stimuli were typed with font Courier size 24.

#### Procedure

Participants were seated at 50 cm in front of the computer screen and were given written instructions. They started with a training session composed of 10 trial (5 target-present and 5 target-absent trials). After a break during which any questions concerning the task were answered, the experiment started with the 120 experimental trials (60 target-present and 60 target-absent) presented in a randomized order for each participant.

Each trial began with a 700 ms presentation of the target letter in the middle of the screen. Then a fixation mark (« : ») was presented for 1000 ms. The fixation mark was replaced by the stimulus word, which remained on the screen for 33 ms. The stimulus word was followed by a blank that was presented for 70 ms. Then a mask consisting of superimposed X's and O's, appeared on the screen until participant's response. Afterward, the mask was replaced by a blank for 1000 ms that was followed by the next trial. The target letter was presented in uppercase and the stimulus word in lowercase. The entire procedure took about 15 minutes to complete.

## RESULTS

Mean correct response times and error rates for the four experimental conditions are reported in Table 1 (upper panel). The trimming procedure excluded scores smaller than 200 ms and greater than 3 SDs above the participant's overall response time. Analyses of variance (ANOVAs) were conducted using both participants ( $F_1$ ) and items ( $F_2$ ) as random factors, treating frequency and grapheme category as within-participant factors.

Response times were affected by the grapheme manipulation but not by word frequency. Letter detection times were longer for letters embedded in a multi-letter grapheme compared to letters having the status of single-letter graphemes,  $F_1(1,20) = 7.38$ ,  $p < .05$  ;  $F_2(1,56) = 4.21$ ,  $p < .05$ . No difference was observed between the high and low frequency conditions, all  $F_s < 1$ . The error data did not show any effect of grapheme category or word frequency, all  $F_s < 1$ .

## EXPERIMENT 2

#### Participants

Participants were 19 students from the Center for Cognitive Neuroscience. All were native French speakers and had normal or corrected to normal vision.

#### Stimuli and Apparatus

The stimulus set was elaborated in the same way as in Experiment 1 except that word stimuli were monosyllabic, 5-letter French words. Frequency was estimated using the BRULEX frequency count (Content, Mousty, & Radeau, 1990). Low-frequency words had less than 10 occurrences per million and high-frequency words had more than 50 occurrences per million. As an example, let A be the target letter. The four words in each experimental condition were : 1. TAUPE in the low frequency - multi-letter grapheme condition ; 2. BAGNE in the low frequency - single-letter grapheme condition ; 3. CAUSE in the high frequency - multi-letter grapheme condition ; 4. SALLE in the high frequency - single-letter grapheme condition. The mean frequency values of each word list was respectively : 4, 4, 95.5 and 88.5 (occurrences per million). The experiment was controlled by a Macintosh Quadra computer.

#### Procedure

The experimental procedure was the same as in Experiment 1.

## RESULTS

Mean correct response times and error rates for the four experimental conditions are reported in Table 1 (lower panel). The trimming procedure excluded scores smaller than 200 ms and greater than 3 SDs above the participant's overall response time. Analyses of variance (ANOVAs) were conducted using both participants ( $F_1$ ) and items ( $F_2$ ) as random factors, treating frequency and grapheme category as within-participant factors.

As in Experiment 1, response times were affected by the grapheme manipulation but not by word frequency. Letter detection times were longer for letters embedded in a multi-letter grapheme compared to letters having the status of single-letter graphemes,  $F_1(1,18) = 27.75$ ,  $p < .0001$  ;  $F_2(1,56) = 4.53$ ,  $p < .05$ . No difference was observed between the high and low frequency conditions, all  $F_s < 1$ . The error data showed a marginal effect of grapheme category, that is, subjects did more errors in detecting a letter into a multi-letter

grapheme compared to letters having the status of single-letter graphemes. However, this effect was marginal for subjects,  $F(1,18) = 3.34$ ,  $.05 < p < .1$ , and did not reach significance for items,  $F(1,56) = 2.27$ ,  $p > .1$ . Finally, error scores were not affected by word frequency, all  $F_s < 1$ .

## DISCUSSION

The results of the present studies can be summarized as follows. First, in two letter search experiments, we obtained longer response times when the target letter was embedded in a multi-letter grapheme (A in BEACH) compared to when it was itself a single-letter grapheme (A in GRASS). This effect appeared both in the English and French data. Second, letter detection latencies were not affected by the frequency of the target word neither in the English nor in the French data.

The present results support the view that graphemes are automatically processed by the reading system as perceptual units. Therefore, accessing the letter A in BEACH appears more costly than accessing A in GRASS. Indeed, in BEACH, A is embedded in the multi-letter grapheme EA that seems to be processed as a whole by the reading system. That is, the identification of A is masked by the automatic processing of the higher-order unit EA. Following this interpretation, the locus of the present effect can be considered as pre-lexical. That is, it results from a competition between a graphemic and a letter level of representation. A further argument in favor of such interpretation comes from the absence of any word-frequency effect. Indeed, lexical factors appear to not influence letter detection latencies.

However, one may propose an alternative description of these results in terms of phonemic mismatch. Indeed, one may argue that the sound of letter A is closer to the sound of A in GRASS than to the sound of A in BEACH. Thus, the difference in letter detection latencies would be due to phonemic distance (for a review on the role of phonetic factors in letter detection, see Healy, 1994). Therefore, the locus of the present effect would not be perceptual but rather, post-lexical. That is, subjects would compare the name of the target letter to the phonemic representation of the word, and because of the phonemic distance of the letter's name and the letter's sound in the word, they would need more time to generate a present-response for letters embedded in a multi-letter grapheme. However, this post-lexical phonemic interpretation is not congruent with the absence of a word frequency effect. Indeed, if the phonemic representation of a word is crucial for letter detection, then there should be an advantage of high frequency over low frequency words in the multi-letter grapheme condition, since the phonemic representation of high frequency words should be accessed more rapidly. Consequently, given the absence of a word-frequency effect on letter detection latencies, the present data do not support the post-lexical phonemic interpretation.

Another empirical evidence underlying the critical role of graphemes during reading comes from a study done by Pring (1981). This author used the pseudohomophone effect for her demonstration (Rubenstein, Lewis, & Rubenstein, 1971). The pseudohomophone effect is the fact that, in a lexical decision task, when nonwords are constructed to be pronounced like words (e.g., CHERCH), participants are slower to reject these items (i.e., pseudohomophones) compared to spelling controls (e.g., CHIRCH). Pring showed that this effect disappeared when the graphemes in the stimulus were disrupted through case alternation (i.e., the pseudohomophone effect disappeared for CheRcH where the graphemes are disrupted, whereas the effect remains for CHerCH, where case alternation does not split graphemes).

### Grouping letters into graphemes

Following the assumption that graphemes are perceptual units leads to the conclusion that some letters are automatically grouped into multi-letter graphemes during word processing. This grouping process is, in fact, highly functional to perform an efficient orthography-to-phonology computation since it allows to retrieve the correct sequence of phonemes (which would not be the case if the unit of the reading system was the letter). However, recent studies showed that the presence of multi-letter graphemes in a word seem to slow down its processing. In a non-word reading experiment, Rastle and Coltheart (1998) reported faster naming latencies for non-words composed of 5 graphemes and 5 letters compared to non-words composed of 3 graphemes and 5 letters. Given that the number of letters was constant, 3 graphemes non-words were thus composed of multi-letter graphemes which was correlated with longer naming latencies. In a similar manipulation, Rey, Jacobs, Schmidt-Weigand and Ziegler (1998) obtained longer identification times for words having a smaller number of graphemes (the number of letters being constant). This effect was observed in English and French for low-frequency 5-letter monosyllabic words, but was not obtained in French for high-frequency 5-letter monosyllabic words. Together, these results indicate that grouping letters into graphemes, despite being automatic and functional, requires to avoid or inhibit a non-functional letter-by-letter processing.

### Reading units

The present data support the view according to which graphemes can be considered as minimal functional reading units. This reading unit assumption is congruent with a model proposed by Lamerge and Samuel (1974) in which word processing is mediated from letters to words through different levels of spelling units. However, Lamerge and Samuel did not specify the nature of these units. Also, the present data suggest that graphemes may be represented in this framework at an early level of representation. Furthermore, a large set of empirical data recorded in different languages (English, Spanish or French) indicates that larger functional spelling units may also be represented in the reading system such as onset, rimes or syllables (for onset/rime

evidences in English, see Bowey, 1990, 1993 ; Treiman, 1989 ; Treiman & Chafetz, 1987 ; Treiman, Goswami, & Bruck, 1990 ; Treiman et al., 1995 ; Treiman & Zukowski, 1988 ; Wise, Olson, & Treiman, 1990 ; for syllable evidences in English, Spanish and French, see Carreiras, Alvarez, & de Vega, 1993 ; Ferrand, Segui, & Grainger, 1996 ; Ferrand, Segui, & Humphreys, 1996 ; Perea, & Carreiras, 1998 ; Prinzmetal, Treiman & Rho, 1986 ; Rapp, 1992). Together, these different levels of functional spelling units could emerge during reading acquisition, increasing the ability of skilled readers to process letter strings in parallel.

The concept of unit that we use here has to be understood as a descriptive concept. We use it as a theoretical tool that allows simplified functional descriptions of the reading system complexity (Grainger & Jacobs, 1998b). Also, by « reading unit », we mean stable and functional patterns of representations that emerge during the maturation of reading. These patterns can be considered as « units » because they are recurrently associated with other informations. Thus, graphemes, onset, rimes or syllables can be considered as functional spelling units in the sense that these patterns of letter strings are repeatedly associated to specific phonemes or strings of phonemes. These repeated associations lead to a unique coupling of two distinct codes and consequently, to the development of what we call « a functional unit » inside each code.

#### REFERENCES

- Baayen, R. H., Piepenbrock, R., & van Rijn, H. (1993). The CELEX Lexical Database (CD-ROM). Linguistic Data Consortium, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.
- Berndt, R. S., Lynne D'Autrechy, C., & Reggia, J. A. (1994). Functional pronunciation units in English words. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition* 20, 977-991.
- Berndt, R. S., Reggia, J. A., & Mitchum, C. C. (1987). Empirically derived probabilities for grapheme-to-phoneme correspondences in English. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 19, 1-9.
- Bowey, J. A. (1990). Orthographic onsets and rimes as functional units of reading. *Memory and Cognition* 18, 419-427.
- Bowey, J. A. (1993). Orthographic rime priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 46A, 247-271.
- Carreiras, M., Alvarez, C., J., & de Vega, M. (1993). Syllable frequency and visual word recognition in Spanish. *Journal of Memory and Language*, 32, 766-780.
- Corcoran, D. W. J. (1966). An acoustic factor in letter cancellation. *Nature*, 210, 658.
- Coltheart, M. (1978). Lexical access in simple reading tasks. In : Underwood, G. (Ed.), *Strategies of Information Processing*. London : Academic Press.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, H. (1993). Models of reading aloud : Dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review* 100, 589-608.
- Content, A., Mousty, P., & Radeau, M. (1990). BRULEX : Une base de données lexicales informatisée pour le Français écrit et parlé. *L'Année Psychologique* 90, 551-566.
- Drewnowski, A., & Healy, A. F. (1977). Detection errors on *the* and *and* : Evidence for reading units larger than the word. *Memory and Cognition*, 5, 154-168.
- Ferrand, L., Segui, J., & Grainger, J. (1996). Masked priming of words and picture naming : The role of syllabic units. *Journal of Memory and Language* 35, 708-723.
- Ferrand, L., Segui, J., & Humphreys, G. W. (1996). The syllable's role in word naming. *Memory and Cognition* 25, 458-470.
- Gibson, E. J., Pick, A. D., Osser, H., & Hammond, M. (1962). The role of grapheme-phoneme correspondence in the perception of words. *American Journal of Psychology* 75, 554-570.
- Grainger, J., & Jacobs, A., M. (1998a). *Localist connectionist approaches to human cognition*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Grainger, J., & Jacobs, A., M. (1998b). On localist connectionism and psychological science. In J. Grainger & A. M. Jacobs (Eds.), *Localist connectionist approaches to human cognition* (pp. 1-38). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Healy, A.F. (1994). Letter detection : A window to unitization and other cognitive processes. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1, 333-344.
- Henderson, L. (1985). On the use of the term 'grapheme'. *Language and Cognitive Processes* 2, 135-148.
- Jakobson, R., Fant, M. & Halle, M. (1952). *Le concept de trait distinctif. Preliminaries to speech analysis*. Cambridge (Mass.) : The M.I.T. Press.
- Laberge, D., & Samuel, S. J. (1974). Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology* 6, 293-323.
- Peereman, R., & Content, A. (1997). Orthographic and phonological neighborhood in naming : Not all neighbors are equally influential in orthographic space. *Journal of Memory and Language* 37, 382-410.
- Perea, M., & Carreiras, M. (1998). Effects of syllable frequency and syllable neighborhood frequency in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 134-144.
- Pring, L. (1981). Phonological codes and functional spelling units : Reality and implications. *Perception and Psychophysics*, 30, 573-578.
- Prinzmetal, W., Treiman, R., & Rho, S. (1986). How to see a reading unit. *Journal of Memory and Language* 25, 461-475.
- Rapp, B. C. (1992). The nature of sublexical orthographic organization : The bigram trough hypothesis examined. *Journal of Memory and Language* 31, 33-53.
- Rastle, K., & Coltheart, M., in press. Whammy and double whammy : Length effects in nonword naming. *Psychonomic Bulletin and Review*.

- Read, J. D. (1983). Detection of F's in a single statement : The role of phonological recoding. *Memory and Cognition*, 11, 390-399.
- Rey, A., Jacobs, A. M., Schmidt-Weigand, F., & Ziegler, J. C. (1998). A phoneme effect in visual word recognition. *Cognition*, 68, 41-50.
- Treiman, R. (1989). The internal structure of the syllable. In : G. Carlson & M. Tanenhaus (Eds.), *Linguistic structure in language processing*. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer.
- Treiman, R., & Chafetz, J. (1987). Are there onset- and rime- like units in written words ? In : M. Coltheart (Ed.), *Attention & Performance XII*. London : Erlbaum.
- Treiman, R., Goswami, U., & Bruck, M. (1990). Not all words are alike : Implications for reading development and theory. *Memory and Cognition* 18, 559-567.
- Treiman, R., Mullennix, J., Bijeljac-Babic, R., & Richmond-Welty, E. D. (1995). The special role of rimes in the description, use, and acquisition of English orthography. *Journal of Experimental Psychology* 124, 107-136.
- Treiman, R., & Zukowski, A. (1988). Units in reading and spelling. *Journal of Memory and Language* 27, 466-477. 1291.
- Venezky, R. L. (1970). *The structure of English orthography*. The Hague : Mouton.
- Wise, B. W., Olson, R. K., & Treiman, R. (1990). Subsyllabic units in computerized reading instruction : Onset-rime vs. postvowel segmentation. *Journal of Experimental Child Psychology* 49, 1-19.
- Ziegler, J., Rey, A., & Jacobs, A. M. (1998). Simulating individual word identification thresholds and errors in the fragmentation task. *Memory & Cognition* 26, 490-501.

**Table 1**

Mean Correct Response Times (RT in milliseconds), Percentage of Errors (Err%), and the corresponding standard errors (SE) for the four conditions in Experiment 1 (in English) and in Experiment 2 (in French).

		LF words		HF words	
		Multi-letter Grapheme	Single-letter Grapheme	Multi-letter Grapheme	Single-letter Grapheme
English (Exp. 1)					
	RT (ms)	562	531	557	542
	SE	28	26	30	28
	% Err	8.7	10.9	9.9	7.1
	SE	1.7	2.7	2.4	2.3
French (Exp. 2)					
	RT (ms)	568	527	566	517
	SE	28	23	27	22
	% Err	10.3	6.1	9.3	7.5
	SE	1.8	1.5	2.1	1.3

## Appendix A

Mean response times (RT) and percentage of error (%Err) for items of Experiment 2 (T = target letter).

	LF words						HF words						
	Multi-letter Grapheme			Single-letter Grapheme			Multi-letter Grapheme			Single-letter Grapheme			
	T	item	RT	%Err	item	RT	%Err	item	RT	%Err	item	RT	%Err
English (Exp. 1)													
A	peach	521	5	stark	523	10	reach	524	0	class	500	15	
A	yearn	561	5	tract	501	10	learn	559	5	black	517	0	
A	lease	610	5	slack	548	5	peace	620	0	grass	534	5	
A	leach	532	5	graft	479	0	teach	564	10	glass	516	5	
A	poach	583	15	trash	493	5	coast	541	15	track	516	5.3	
A	hoard	593	5.6	brash	518	15	board	572	10	staff	466	5	
E	niece	522	0	speck	517	15.8	piece	561	5	dress	686	10.5	
E	wield	546	5	theft	568	10	field	601	15	press	575	10	
I	waive	563	5	skimp	535	10	paint	549	15	quick	519	20	
I	maize	631	15.8	whisk	538	20	raise	584	20	stick	554	0	
I	poise	582	0	twine	565	10	joint	540	15.8	shift	525	0	
I	hoist	541	10.5	slick	509	15.8	noise	580	15	skill	559	10	
U	rouse	588	10	pluck	599	20	count	646	15	trust	585	5	
U	mourn	634	15	crumb	616	20	mouth	534	0	truth	628	0	
U	louse	626	30	snuff	669	5.3	youth	552	10	stuff	580	20	
French (Exp. 2)													
A	taupe	533	5.6	casse	474	0	faute	521	0	vague	423	10.5	
A	faune	535	0	bagne	440	0	jaune	505	5.3	basse	458	5.3	
A	lange	501	0	latte	449	0	danse	431	5.3	balle	424	0	
A	saule	486	5.3	panne	490	0	cause	516	0	salle	473	10.5	
A	stand	511	0	stage	481	0	franc	520	0	grave	453	0	
I	beige	543	10.5	tripe	485	10.5	neige	577	5.3	crime	478	0	
I	moite	532	21.1	prime	549	10.5	poids	541	5.3	crise	539	10.5	
I	poire	551	10.5	bribe	527	5.3	voile	555	15.8	prise	551	5.3	
N	gland	706	10.5	gaine	714	5.6	blanc	600	22.2	peine	604	11.8	
N	plant	608	26.3	liane	678	11.8	chant	642	26.3	haine	717	15.8	
N	coing	692	17.6	frêne	689	21.1	poing	630	5.6	reine	633	27.8	
O	sonde	592	10.5	colle	510	10.5	honte	554	11.1	poche	467	5.3	
U	guêpe	651	15.8	pulpe	528	5.3	quart	679	21.1	russe	538	5.3	
U	loupe	594	10.5	prune	501	0	sourd	620	0	plume	547	0	
U	moule	535	10.5	rhume	493	10.5	douze	648	15.8	chute	531	5.6	