

Traitements phonétiques en lecture : lecture normale et dyslexie développementale

Par Sonia KRIFI-PAPOZ

Thèse de doctorat en Neuropsychologie

Sous la direction d'Olivier KOENIG et Nathalie BEDOIN

Présentée et soutenue publiquement le 18 juin 2010

Membres du jury : Olivier KOENIG, Professeur des universités, Université Lyon 2 Nathalie BÉDOIN, Maître de conférences, Université Lyon 2 Christophe ROUSSELLE, Praticien hospitalier, Hôpital Femme-Mère-Enfant José MORAIS, Professeur émérite Willy SERNICLAES, Directeur de recherche, C.N.R.S.

Table des matières

Contrat de diffusion ..	6
Remerciements ..	7
Résumé ..	8
Introduction ..	10
Chapitre 1 : Cadre théorique ..	11
1. Phonologie en lecture ..	11
1.1. Phonologie, phonèmes, catégories et traits phonologiques ..	11
1.2. Les différents modèles de reconnaissance des mots écrits et la phonologie ..	12
1.3. Arguments pour un rôle de la phonologie en lecture ..	16
2. Les traits phonologiques dans les traitements langagiers ..	19
2.1. Statut cognitif des traits phonologiques ..	20
2.2. Rôle des traits phonologiques en mémorisation à court terme ..	22
2.3. Rôle des traits phonologiques en production de la parole ..	23
2.4. Rôle des traits phonologiques en perception de la parole ..	28
2.5. Rôle des traits phonologiques dans l'évaluation de similarité ..	32
2.6. Rôle des traits phonologiques en lecture ..	33
3. Deux mécanismes pour les traits phonologiques en lecture : proposition d'un modèle ..	40
3.1. Une proposition de modèle ..	41
3.2. Test d'une prédiction du modèle : amorcages proactif et rétroactif ..	45
4. Statut cognitif des types de traits phonologiques ..	48
4.1. Existence de types de traits ..	48
4.2. Hiérarchie des types de traits ..	55
5. Représentation des traits phonologiques chez l'enfant ..	64
5.1. Sensibilité aux traits phonétiques chez les bébés ..	64
5.2. Sensibilité aux traits phonologiques chez les très jeunes enfants ..	65
5.3. Représentations phonologiques en période pré-scolaire ..	67
5.4. Aspects tardifs du développement de l'organisation phonologique des enfants ..	77
6. Troubles phonologiques et phonétiques chez les enfants dyslexiques ..	80
6.1. Définition de la dyslexie développementale ..	80
6.2. Les grandes formes de dyslexie développementale ..	80
6.3. Hypothèses sur les mécanismes cognitifs responsables de la dyslexie développementale ..	81
6.4. Explications neuroanatomiques – Apport de l'imagerie cérébrale ..	104
7. Traits phonologiques et difficultés d'apprentissage de la lecture ..	110
7.1. Perception catégorielle chez l'apprenti-lecteur avec ou sans difficulté ..	110
7.2. Insensibilité des enfants dyslexiques à la similarité phonologique graduelle ..	116
7.3. Difficultés particulières pour certains types de traits et dyslexie ..	116
Chapitre 2 : Problématique et hypothèses générales ..	120

Questions centrales de la thèse. . .	120
Mécanisme d'inhibitions latérales dans le système phonologique et dyslexie. . .	121
Mise en évidence de deux mécanismes phonologiques en lecture, basés sur le trait de voisement. . .	121
Mécanismes phonologiques en lecture et simultanéité de la présentation des lettres. . .	122
Deux mécanismes phonologiques basés sur les traits en lecture : cas particulier du voisement. . .	123
Organisation catégorielle des traits phonologiques en lecture. . .	123
Hiérarchie des traits phonologiques. . .	124
Chapitre 3 : Partie expérimentale . . .	126
1. Sensibilité au voisement et dyslexie : Expérience 1 . . .	126
1.1. Méthode . . .	126
1.2. Résultats . . .	128
1.3. Discussion . . .	132
2. Sensibilité à la ressemblance de voisement en lecture chez l'adulte : Expériences 2a, 2b et 2c (présentation simultanée) ; Expériences 3a et 3b (présentation divisée) . . .	135
2.1. Expérience 2a (SOA = 33 ms, présentation simultanée) . . .	136
2.2. Expérience 2b (SOA = 66 ms, présentation simultanée) . . .	139
2.3. Expérience 2c (SOA = 100 ms, présentation simultanée) . . .	141
2.4. Expérience 3a (SOA = 50 ms, présentation divisée) . . .	143
2.5. Expérience 3b (SOA = 66 ms, présentation divisée) . . .	146
3. Sensibilité au voisement en production chez les adultes : Expérience 4 . . .	148
3.1. Méthode . . .	149
3.2. Résultats . . .	150
3.3. Discussion . . .	152
4. Sensibilité à différents types de traits phonologiques en lecture chez l'adulte : Expériences 5a, 5b, 5c . . .	153
4.1. Sensibilité au partage de traits phonologiques de voisement : Expérience 5a . . .	155
4.2. Sensibilité au partage de traits phonologiques de mode : Expérience 5b . . .	159
4.3. Sensibilité aux traits phonologiques de voisement, de mode et de lieu : Expérience 5c . . .	161
5. Organisation de catégories de traits phonologiques : Expériences d'appariement de syllabes (Expériences 6a et 6b) . . .	165
5.1. Organisation hiérarchique des types de traits chez les adultes normo-lecteurs : Expérience 6a . . .	166
5.2. Organisation hiérarchique des catégories de traits chez les enfants avec ou sans trouble d'apprentissage de la lecture : Expérience 6b . . .	186
Chapitre 4 : Discussion générale . . .	200
1. Rôle des connaissances infra-phonémiques en lecture : deux mécanismes en jeu . . .	200
1.1. Proposition de modèle . . .	200
1.2. Décours temporel des deux mécanismes phonologiques . . .	202

1.3. Rôle de la présence simultanée des lettres sur l'engagement des relations d'inhibition latérale ..	204
1.4. Argument supplémentaire pour un mécanisme phonologique facilitateur basé sur le voisement ..	205
1.5. Organisation des connaissances phonologiques et dyslexie développementale ..	207
2. Hiérarchie des catégories de traits phonologiques ..	210
2.1. Sensibilité différente au partage de traits phonologiques en fonction du type de trait ..	210
2.2. Mise en évidence d'une organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques chez les bons lecteurs ..	212
2.3. Anomalie dans l'organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques chez les enfants dyslexiques ..	216
Conclusion ..	218
Références bibliographiques ..	221
Notes bibliographiques ..	259

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « Paternité – pas d'utilisation commerciale - pas de modification » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes deux directeurs : Olivier Koenig et Nathalie Bedoin pour leur soutien et leur rigueur scientifique qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Un merci tout particulier à Nathalie Bedoin pour son aide inestimable, sa grande disponibilité et sa confiance tout au long de ces années de thèse.

Je remercie vivement mes deux rapporteurs, Willy Serniclaes et José Morais, d'avoir bien voulu accepter ce rôle. C'est un grand honneur pour moi qu'ils fassent partie de mon jury pour ce travail que j'espére abouti.

Je remercie également les étudiants de l'Université Lumière Lyon 2 qui ont participé aux différentes expériences, ainsi que quelques amis proches qui ont accepté de se soumettre à ces études. Et un grand merci à tous les enfants des écoles lyonnaises ayant bien voulu participer à ce travail, et à tous mes « petits patients » de l'Hôpital Debrousse et de l'Hôpital Femme-Mère-Enfant, sans qui ce travail de thèse n'aurait pu aboutir.

Mes remerciements sont maintenant adressés au Laboratoire d'Etude des Mécanismes Cognitifs, qui m'a accueillie les premières années de mon doctorat. J'adresse ensuite mes remerciements aux membres du Laboratoire Dynamique du Langage, tout particulièrement à François Pellegrino et Egidio Marsico, qui m'ont apporté leur aide et leur soutien ces trois dernières années. Un grand merci également à René Carré qui a bien voulu accepter d'élaborer un programme informatisé pour la dernière expérience.

Un énorme merci tout particulier à Vania Herbillon, qui m'a acceptée en stage il y a 10 ans dans le cadre de ma formation de recherche, et qui m'a ensuite formée en tant que neuropsychologue. Je lui dois presque tout ce que je sais aujourd'hui sur les troubles des apprentissages et en particulier sur la dyslexie développementale. Je remercie également le Pr. Vincent des Portes, mon chef de service à l'Hôpital Femme-Mère-Enfant, car il m'a toujours encouragée à terminer cette thèse et a accepté que je dégage parfois du temps pour que ce travail aboutisse.

Enfin, je ne peux que remercier mille fois (et même plus) ma famille, mes parents, et surtout mon cher Benjamin et mes deux petits garçons, qui du haut de leurs 5 ans et 18 mois ont su comprendre ma nécessité parfois de travailler. Leur présence dans ma vie m'a donné la force et le courage de terminer cette thèse.

Résumé

L'objectif de cette thèse est de contribuer à comprendre la nature du code phonologique et des mécanismes par lesquels les connaissances phonologiques interviennent en lecture. Notre hypothèse générale est que les premières étapes du processus de reconnaissance de mot écrit impliqueraient un code phonologique suffisamment fin pour être décrit en termes de traits phonologiques. Douze expériences ont été conduites pour étudier son rôle lors des étapes précoces de traitement d'un stimulus écrit chez trois populations différentes (Expériences 1, 6a et 6b menées auprès d'enfants normo-lecteurs et dyslexiques ; Expériences 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 4, 5a, 5b et 5c auprès d'adultes bons lecteurs). Nous proposons dans cette thèse un modèle de lecture articulant deux mécanismes basés sur les traits phonologiques, inspiré du modèle d'Activation Interactive (McClelland & Rumelhart, 1981) : un mécanisme impliquant des relations activatrices entre les phonèmes et les traits phonologiques, et un mécanisme de relations d'inhibition latérale entre phonèmes partageant des traits phonologiques.

Dans l'Expérience 1, nous reprenons le principe expérimental de nos précédents travaux conduits auprès d'adultes et d'enfants normo-lecteurs (Bedoin, 2003 ; Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003) en manipulant, dans une tâche de détection de lettre, la ressemblance de voisement entre les consonnes d'un pseudo-mot C_1VC_2V . Nous apportons des arguments favorables à l'hypothèse d'une absence ou d'un retard de la mise en place des relations d'inhibition latérale entre phonèmes chez les enfants dyslexiques, avec des anomalies différentes selon le type de dyslexie. Nous montrons en effet que les enfants dyslexiques avec trouble phonologique présentent une absence de sensibilité au partage de traits phonologiques par des consonnes successives en lecture, alors que le déficit des enfants dyslexiques sans trouble phonologique n'est pas aussi radical. Ils semblent souffrir d'un retard dans l'établissement d'une structure phonologique basée sur des inhibitions latérales, qui témoignerait d'une immaturité de l'organisation fine des connaissances phonologiques.

Les Expériences 2a, 2b, 2c, 3a, 3b et 4, menées auprès d'adultes bons lecteurs, permettent de préciser le décours temporel des deux mécanismes phonologiques proposés dans le modèle. Ils se dérouleraient à des rythmes différents. Le mécanisme phonologique activateur intervient plus rapidement que celui qui implique les relations d'inhibition latérale. Le mécanisme basé sur les inhibitions latérales interviendrait plus tardivement et viendrait masquer les effets du précédent, si les durées de présentation excèdent 50 ms (66 ms, Expérience 2b, et 100 ms, Expérience 2c). Les résultats de nos expériences montrent que ce décours temporel est cependant modulé par la catégorie des traits phonologiques partagés : la similarité basée sur le voisement permet un engagement particulièrement rapide des relations d'inhibition latérales. Aussi faut-il des conditions de présentation et des tâches particulièrement exigeantes pour recueillir des indices du mécanisme antérieur, rapide et basé sur des relations activatrices entre traits de voisement et phonèmes, avant que ses effets ne soient masqués par le mécanisme phonologique suivant. Un autre résultat marquant de cette série d'expériences est la mise en évidence du rôle de la présence simultanée de plusieurs syllabes écrites sur l'engagement de ces mécanismes phonologiques. Nous avons fait le choix d'étudier les deux mécanismes en manipulant le partage de traits phonologiques par deux consonnes d'un stimulus écrit disyllabique, afin

de se rapprocher d'une situation de lecture normale. Nous avons montré que ce choix n'est pas méthodologiquement anodin, car dans un tel contexte la mise en œuvre de relations d'inhibition latérale est favorisée par la concurrence directe et d'emblée évidente entre les lettres en présence. En effet, il est apparu qu'une présentation successive (même très rapide) des syllabes n'encourage pas le développement du mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale et permet un traitement plus indépendant des deux syllabes, en tout cas lorsqu'elles sont présentées à des emplacements distincts.

L'objectif des Expériences 5a, 5b et 5c est de poursuivre l'étude de la sensibilité des lecteurs adultes au partage de traits phonologiques par les consonnes de stimuli écrits en imposant un codage plus précis de la position des lettres. Nous testons en outre la sensibilité au partage de différents types de traits phonologiques par les consonnes de stimuli écrits (voisement, mode et lieu d'articulation), afin d'étendre la portée des résultats et de trouver de nouveaux arguments pour la pertinence de cette typologie du point de vue cognitif. Etant donné que des travaux en perception et en production de parole montrent une influence variable de la ressemblance infra-phonémique selon les types de traits, nous prédisons que l'effet du partage de traits phonologiques suit des règles de même nature en lecture. L'examen de la littérature permet d'ériger le mode d'articulation au sommet de la hiérarchie des types de traits, la position relative du lieu et du voisement étant plus variable selon les situations expérimentales. Nous avons donc formulé l'hypothèse d'une plus grande sensibilité des lecteurs au partage de traits de mode par les consonnes d'un stimulus écrit. Nous apportons des arguments favorables à ces hypothèses : des effets de similarité basés sur le partage de traits phonologiques se produisent en lecture pour les trois catégories de traits étudiées, et cette typologie des traits est cognitivement pertinente puisque les effets varient légèrement selon la catégorie de trait. Une organisation hiérarchique de celles-ci se dégage dans les situations de lecture. Les inhibitions latérales basées sur le trait de voisement sont les plus rapides, mais cette supériorité n'est que d'ordre temporel. Les inhibitions les plus fortes et les plus systématiques sont basées sur le mode. Les effets de lieu d'articulation sont moins systématiques, mais le sont tout de même davantage que les effets de voisement. Les adultes bons lecteurs élaboreraient donc une organisation des phonèmes intégrant des relations d'inhibition latérale dont le poids varie selon le type de trait phonologique partagé.

Les Expériences 6a et 6b proposent une tâche d'appariement de syllabes en modalités visuelle ou audio-visuelle à des adultes bons lecteurs, des enfants normo-lecteurs et des enfants dyslexiques. Elles confirment la différence de statut des traits de mode, de lieu d'articulation et de voisement. Le mode d'articulation semble la catégorie la plus organisatrice chez les adultes et les enfants normo-lecteurs, qui l'utilisent de manière privilégiée pour rapprocher des syllabes. La hiérarchie des catégories de traits comme critère d'organisation des consonnes s'établit toutefois progressivement pendant la période où les enfants apprennent à lire.

Enfin, cette thèse précise certaines anomalies des représentations phonologiques des enfants dyslexiques au niveau infra-phonémique, tout en tenant compte de disparités selon le type de dyslexie. L'Expérience 6b est ainsi proposée à des enfants dyslexiques avec et sans trouble phonologique majeurs. Les résultats vont dans le sens de notre hypothèse d'une organisation hiérarchique atypique des trois catégories de traits phonologiques étudiées chez les enfants dyslexiques, avec des anomalies particulièrement marquées chez les enfants présentant une dyslexie avec trouble phonologique.

Mots-clés : traits phonologiques, lecture, inhibition latérale, mode d'articulation, lieu d'articulation, voisement, dyslexie développementale.

Introduction

Dans le cadre général des travaux sur le rôle des connaissances phonologiques dans le processus de reconnaissance de mot écrit, l'objectif de notre thèse est de contribuer à mieux décrire la nature du code impliqué et de comprendre les mécanismes par lesquels les connaissances phonologiques interviennent en lecture. Nous voudrions avant tout défendre l'idée selon laquelle les premières étapes du processus de reconnaissance de mot écrit impliquent un code phonologique suffisamment fin pour être décrit en termes de traits phonologiques, en montrant que les lecteurs sont sensibles à des aspects infra-phonémiques et qu'il existerait une organisation hiérarchique de ces traits. D'autre part, cette thèse vise à apporter des arguments en faveur de l'existence de troubles phonologiques chez les enfants dyslexiques, à préciser certaines anomalies de leurs représentations au niveau infra-phonémique, tout en tenant compte de disparités possibles dans ces anomalies selon le type de dyslexie.

Nous présenterons en premier lieu le cadre théorique et les travaux expérimentaux en psychologie cognitive et psycholinguistique nous conduisant à formuler des questions précises à ce propos. La présentation de travaux réalisés en linguistique et en neuropsychologie étayera les hypothèses que nous proposerons ensuite. Dans la partie théorique, nous présenterons notamment une proposition de modèle de lecture articulant deux mécanismes basés sur les traits phonologiques et l'orientation de nos hypothèses sera guidée par les contraintes de ce modèle.

Une démarche expérimentale sera développée en plusieurs étapes pour apporter des données comportementales permettant de discuter nos hypothèses à propos d'adultes bons lecteurs, d'enfants présentant un développement ordinaire et d'enfants dyslexiques.

Chapitre 1 : Cadre théorique

1. Phonologie en lecture

1.1. Phonologie, phonèmes, catégories et traits phonologiques

L'étude des sons de parole s'organise autour de deux disciplines : la phonétique et la phonologie. Alors que la phonétique s'intéresse aux aspects physiques de la parole (description du signal et des gestes articulatoires), la phonologie se rapporte davantage au traitement des sons de parole et à leur représentation. La phonologie considère que les sons du langage sont produits dans le but de coder et de transmettre l'information linguistique (les mots). La plus petite unité phonologique commutable, mais non décomposable en une succession de segments sonores, est le phonème. Ce dernier se caractérise par ses traits distinctifs ou phonologiques, eux-mêmes définis par des critères articulatoires et acoustiques. Plusieurs catégories de traits phonétiques sont décrites, trois sont fondamentales pour les consonnes du français : le voisement correspond à la mise en jeu des cordes vocales, le lieu d'articulation à la localisation de la constriction principale, alors que le mode se rapporte à la manière dont le flux d'air utile à la phonation s'écoule dans le conduit vocal. Un phonème sera ainsi qualifié de voisé ou sonore si sa production implique la vibration des cordes vocales (dans le cas contraire, il sera dit non-voisé ou sourd). Concernant le lieu d'articulation, en français, /p, b/ sont bilabiales, /t, d/ dentales, /k, g/ vélaires ; /f, v/ sont labiodentales, /s, z/ dentales, /ʃ, ʒ/ post-alvéolaires. Pour des raisons de commodité, nous avons distribué ces consonnes en trois catégories de lieu, conformément à Clements (1985, voir aussi Calliope, 1989) : labial si l'articulation s'accompagne d'un contact des lèvres, dental si la langue se place contre les dents, ou encore vélo-palatal si cette dernière se place contre le palais (Tableau I). Par ailleurs, si la production du phonème implique un blocage de l'air expiré (occlusion complète) suivi d'un brusque relâchement (explosion), le mode est dit occlusif. Si la production implique au contraire un écoulement continu de l'air dans un espace réduit, on parlera plutôt de mode fricatif. Comme l'illustre le Tableau I, la décomposition des consonnes occlusives et fricatives du français selon ces traits de lieu d'articulation et de voisement compte douze phonèmes :

Tableau I : Classification des consonnes de la langue française, sur la base des trois catégories de traits phonologiques selon Clements (1985).

		Lieu d'articulation		
Mode d'articulation	Voisement	Labial	Dental	Vélo-palatal
Occlusif	Sourd	[p]	[t]	[k]
	Sonore	[b]	[d]	[g]
Fricatif	Sourd	[f]	[s]	[ʃ]
	Sonore	[v]	[z]	[ʒ]

Le phonème est un élément important pour la description linguistique, mais des travaux montrent qu'il est également fondamental en perception de parole notamment (Moraïs &

Kolinsky, 1994). Cette idée nous a conduit à supposer que le phonème pourrait également avoir un rôle en lecture. C'est le fondement de ce travail de thèse.

Le rôle d'un code phonologique en lecture pose la question de la nature, de la taille, et de l'organisation des unités impliquées. Avant de nous interroger sur la pertinence des traits en réponse à cette question, il convient de situer le problème de la phonologie en lecture dans le contexte des principaux modèles de reconnaissance de mots écrits.

1.2. Les différents modèles de reconnaissance des mots écrits et la phonologie

De nombreux modèles s'intéressent au rôle de la phonologie dans le processus de reconnaissance des mots écrits chez le lecteur expert. La place de ce code en lecture varie cependant selon l'époque et la nature des modèles.

Les modèles issus de la théorie dite « de l'accès direct » (Baron, 1973) n'accordent aucun rôle à l'information phonologique en lecture silencieuse de mots écrits. Ainsi, seule l'information visuelle ou orthographique constituerait une base nécessaire à l'identification des mots écrits. La présentation visuelle d'un mot permettrait d'élaborer une représentation orthographique, activant à son tour la représentation orthographique lexicale stockée en mémoire. Cette représentation permettrait enfin la récupération du sens du mot et l'accès direct à sa représentation phonologique complète. Pour cette position extrême, l'identité et la signification d'un mot écrit pourraient être directement dérivées d'une analyse visuelle, sans utilisation d'un code phonologique intermédiaire. La possibilité de reconnaître certains mots à partir de leur seule représentation orthographique trouve des arguments en sa faveur dans de nombreux travaux. Seidenberg, Waters, Barnes et Tanenhaus (1984) montrent par exemple que le temps de lecture à haute voix pour les mots fréquents est aussi rapide quand ils sont réguliers ou irréguliers alors que les mots rares irréguliers sont traités plus lentement que les mots rares réguliers. La différence de vitesse de lecture des mots irréguliers (rares et fréquents) s'explique seulement si on admet que la connaissance orthographique du mot joue un rôle.

Selon les modèles de la double voie (Coltheart, 1978 ; Coltheart, Curtis, Atkins & Haller, 1993), les connaissances phonologiques sont par contre un moyen parmi d'autres d'accéder au lexique. Chez un lecteur-expert, la procédure par adressage permettrait d'accéder directement à la représentation orthographique d'un mot dans le lexique mental. La procédure par assemblage, qui s'engagerait en parallèle, consisterait à coder le mot écrit sous une forme phonologique grâce à l'application successive de règles de conversion graphèmes-phonèmes, afin de reconnaître à travers cette représentation phonologique une forme déjà connue à l'oral, ou afin de prononcer le mot ainsi reconstruit. Cette procédure étant lente et se réalisant indépendamment, sans coopérer avec la procédure par adressage, son rôle serait très limité chez le lecteur expert. Elle ne serait utilisée que pour prononcer des pseudo-mots ou des mots réguliers mais rares (Coltheart, Avons, Masterson & Laxon, 1991). Selon cette conception, les traitements orthographique et phonologique seraient encapsulés, et la voie par adressage, à la fois plus automatique et plus rapide, court-circuiterait la voie par assemblage, plus contrôlée et plus lente. La plupart du temps, le lecteur-expert n'utiliserait donc pas de connaissances phonologiques pour reconnaître des mots écrits. En pathologie, l'observation d'une double dissociation entre dyslexie de surface et dyslexie phonologique chez des patients cérébro-lésés constitue un argument neuropsychologique favorable à l'existence de deux procédures autonomes pour la reconnaissance des mots écrits (Coltheart, Masterson, Byng, Prior & Riddoch, 1983 ;

Funnell, 1983 ; Shelton & Weinrich, 1997). De nombreux travaux soutenant ce type de modèles ont par ailleurs insisté sur le caractère optionnel du code phonologique en lecture (Peereman, 1991, pour une revue).

Cependant, une autre approche théorique accorde à la phonologie un rôle plus déterminant en lecture. Elle est notamment représentée par les travaux de Lukatela et Turvey (1991, 1993, 1994) et par les premiers travaux de Van Orden. Dans le modèle de vérification de Van Orden (1987, 1991), le codage phonologique exhaustif du mot écrit constitue une étape indispensable à l'activation de candidats lexicaux puisque le mot écrit serait converti en un code phonologique dit « pré-lexical » nécessaire à son identification. Une représentation phonologique complète du stimulus serait produite, activant à son tour une ou plusieurs représentation(s) lexicales(s) (candidats parmi lesquels une étape ultérieure de vérification orthographique permettrait de sélectionner le plus adapté). Cette conception, appelée théorie de la « Médiation Phonologique », remet en question l'existence d'un accès direct au lexique en lecture.

D'après des modèles plus récents, le code phonologique interviendrait rapidement dans le traitement de mots écrits, de manière systématique, sans être pour autant la base unique et nécessaire de la reconnaissance.

Le modèle révisé de la double voie (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001) propose par exemple un fonctionnement beaucoup plus interactif des deux procédures puisque, dans un tel modèle, l'analyse phonologique et le lexique orthographique peuvent influencer l'analyse visuelle du stimulus écrit. Ces deux procédures n'étant plus totalement indépendantes, les relations entre traitements phonologiques, graphémiques et lexicaux sont modifiées et deviennent bidirectionnelles. Deux types de feed-back sont ainsi proposés. Le système de phonèmes activé par l'application des règles graphème-phonème lors de la procédure d'assemblage pourrait activer le lexique phonologique de sortie qui exercerait à son tour une action sur le lexique d'entrée orthographique pouvant lui-même influencer le traitement des lettres par une action en feed-back selon un cheminement représenté en gras dans la Figure 1. Par ailleurs, les auteurs décrivent dans leur article une relation bi-directionnelle entre les lettres et les règles graphème-phonème (Coltheart et al., 2001, p. 217), représentée en pointillés sur la Figure 1. Cela permet d'envisager la participation d'unités phonologiques infra-lexicales au processus de reconnaissance de mot écrit même s'il est en grande partie réalisé par une procédure d'adressage. Les unités phonologiques pourraient ainsi renforcer le traitement des lettres soit, comme l'illustre la Figure 1, en passant par le lexique orthographique, soit par une action en feed-back direct comme le décrivent les auteurs dans leur article, en complément envisagé pour une prochaine version du modèle.

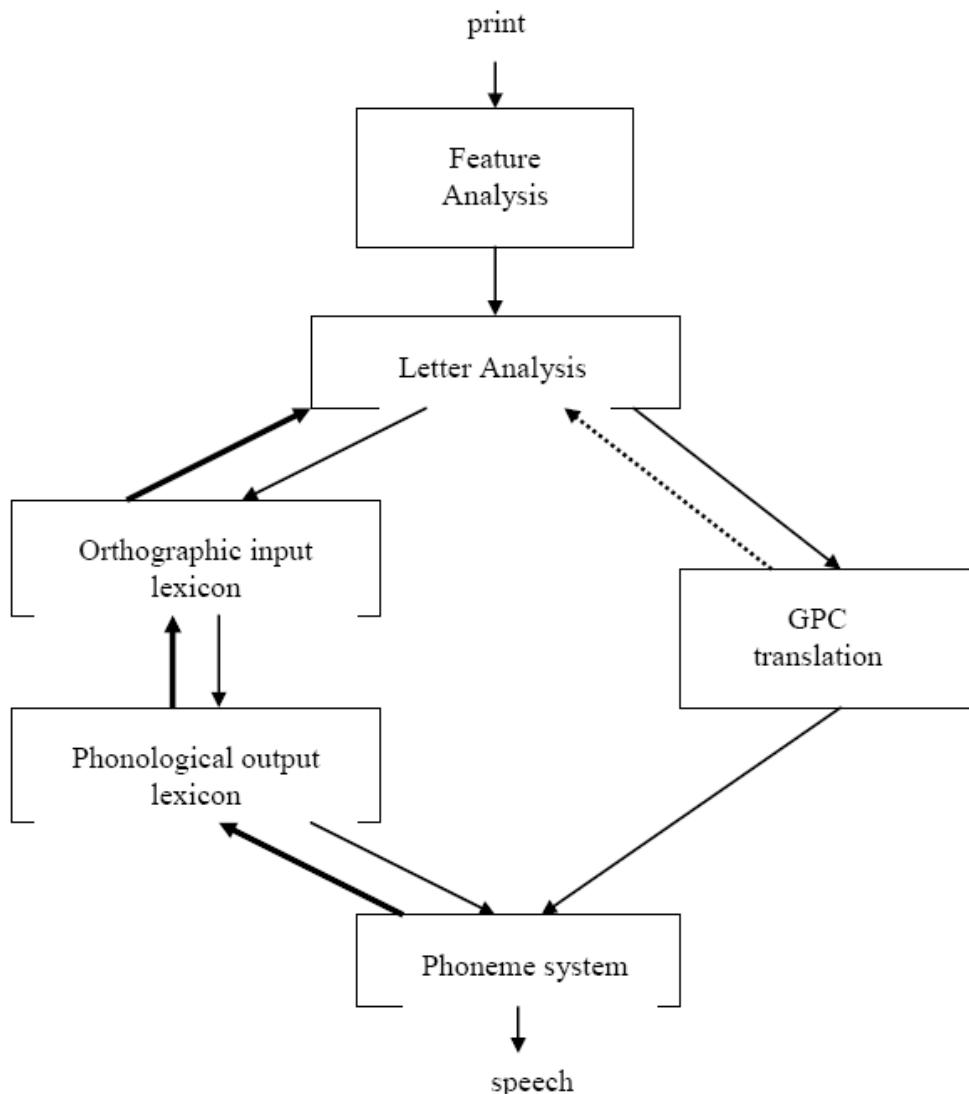


Figure 1 : Illustration de la version en cascade du modèle révisé de la double voie, d'après Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler (2001).

Etant donné que les deux procédures de cette version révisée de la double voie perdent leur « imperméabilité » et que la notion de bidirectionnalité des traitements est intégrée, ce modèle permet de rendre compte de deux choses : le système des phonèmes peut influencer directement le traitement des lettres sans passer par le lexique (ainsi, la phonologie pourrait influencer un traitement aussi élémentaire que celui des lettres) ; puisque cette influence peut aussi passer par les connaissances lexicales, ce modèle est propre à rendre compte d'une modulation des effets phonologiques par la nature, lexicale ou non, des stimuli présentés.

Le modèle connexionniste de l'activation interactive de McClelland et Rumelhart (1981) en lecture comporte trois niveaux de représentation (ou 'nœuds') : un niveau trait (correspondant aux éléments constitutifs des lettres), un niveau lettre et un niveau mot. Ce modèle décrit une montée de l'information visuelle par des relations bottom-up depuis le niveau des traits jusqu'au niveau des mots, en passant par le niveau des lettres. Il

se produit ensuite une descente des signaux lexicaux par des mécanismes top-down qui « votent » pour la présence de leurs lettres. Par ailleurs, le modèle inclut une composante inhibitrice importante : les informations allant d'un niveau à l'autre peuvent être activatrices ou inhibitrices. Les auteurs décrivent ainsi une compétition intra-niveau, due à des liens inhibiteurs instaurés entre des candidats présentant une forte ressemblance à l'intérieur d'un niveau de représentation (Figure 2). Un seul des nœuds-mot correspond au stimulus, et un seul nœud-lettre correspond à la lettre effectivement présentée à une position donnée dans le mot. Bien que le modèle ait précisé ces notions dynamiques avant tout au niveau des traitements visuo-orthographiques en lecture, les auteurs n'isolent pas ces derniers des connaissances phonologiques, qui pourraient être animées par des relations activatrices et inhibitrices analogues.

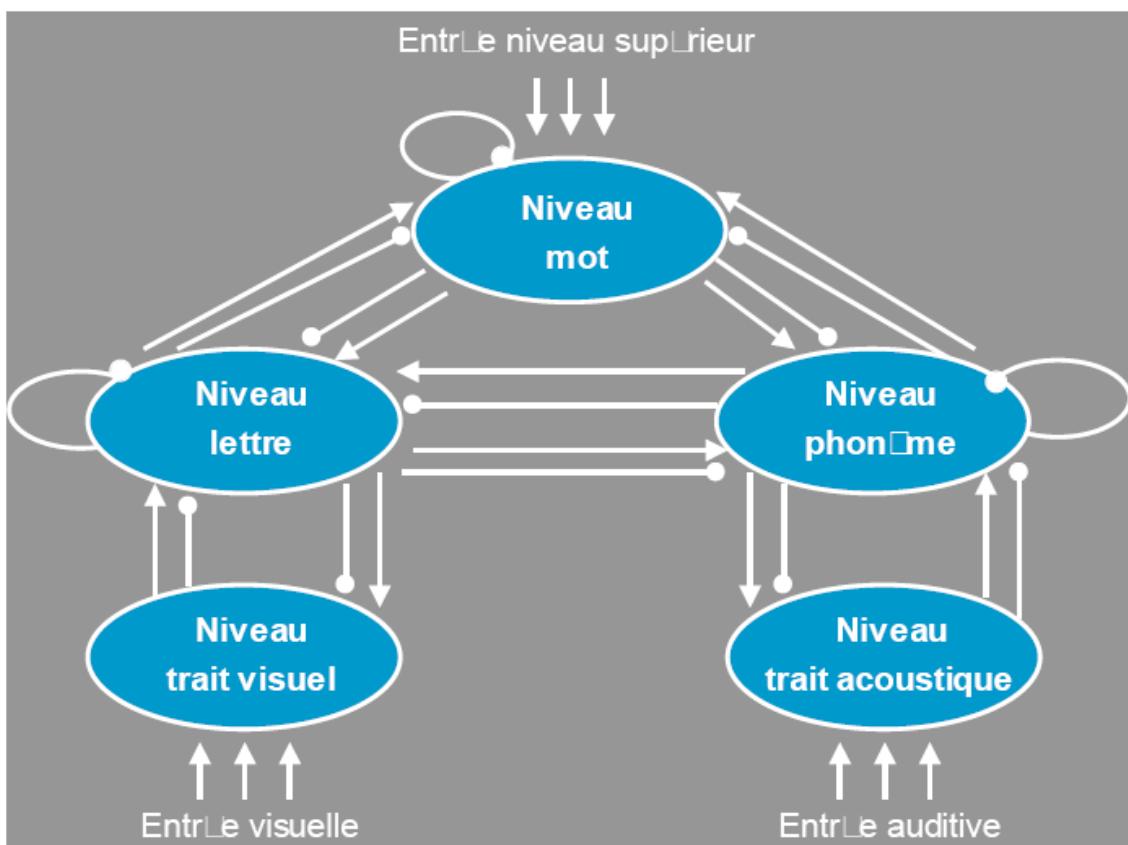


Figure 2 : Représentation du modèle d'activation interactive, d'après McClelland & Rumelhart (1981).

Le modèle interactif de la résonance (Bosman & Van Orden, 1998) accorde quant à lui un rôle systématique aux connaissances phonologiques lors du traitement d'un mot écrit. Dans ce type de modèle (Figure 3), les notions d'étape de traitement et de

stockage de représentations disparaissent pour laisser place à celles de résonance, cohérence ou encore configuration d'activation entre des nœuds. Il s'agit d'appliquer aux processus cognitifs la théorie des systèmes dynamiques (Van Orden & Goldinger, 1994). L'idée de règles de traduction graphèmes-phonèmes est également rejetée au profit de l'hypothèse d'un apprentissage par covariance (forte relation de cohérence entre des attributs apparaissant simultanément) (Bosman, 1994 ; Bosman & Van Orden, 1997 ; Van Orden, Jansen op de Haar & Bosman, 1997). Le traitement des mots écrits serait ainsi fortement influencé par la cohérence entre les attentes issues d'un niveau de traitement plus profond et le codage du stimulus à un niveau plus perceptif. La présentation d'un mot écrit activerait des nœuds correspondant aux lettres, activant immédiatement des nœuds phonémiques et sémantiques. En cas de forte correspondance entre les configurations, le cycle d'activation se maintiendrait et permettrait l'émergence d'un tout cohérent et dynamique (Bosman, 1994, p. 5). Les trois types de nœuds seraient connectés bidirectionnellement, avec toutefois des poids différents : dans les langues alphabétiques où les mêmes lettres et les mêmes phonèmes se produisent simultanément dans beaucoup de mots, les relations entre lettres et phonèmes présenteraient les corrélations bidirectionnelles les plus fortes, les relations phonème-signification et lettre-signification seraient quant à elles plus faibles. Il y aurait ainsi une très forte résonance d'activation entre la lettre « D » et le phonème /d/, par exemple ; d'où une implication majeure de la famille des nœuds phonologiques en lecture. On ne parle cependant pas d'unité-phonème /d/, mais plutôt d'une forte cohérence entre les traits de voisement, de lieu et mode d'articulation propres à cette consonne (sonore, dentale et occlusive). La perception de la lettre « D », dont la relation est peu ambiguë avec le phonème /d/ en français, s'accompagnerait ainsi d'une résonance d'activation très vite stabilisée grâce à la forte cohésion entre les configurations des différentes couches.

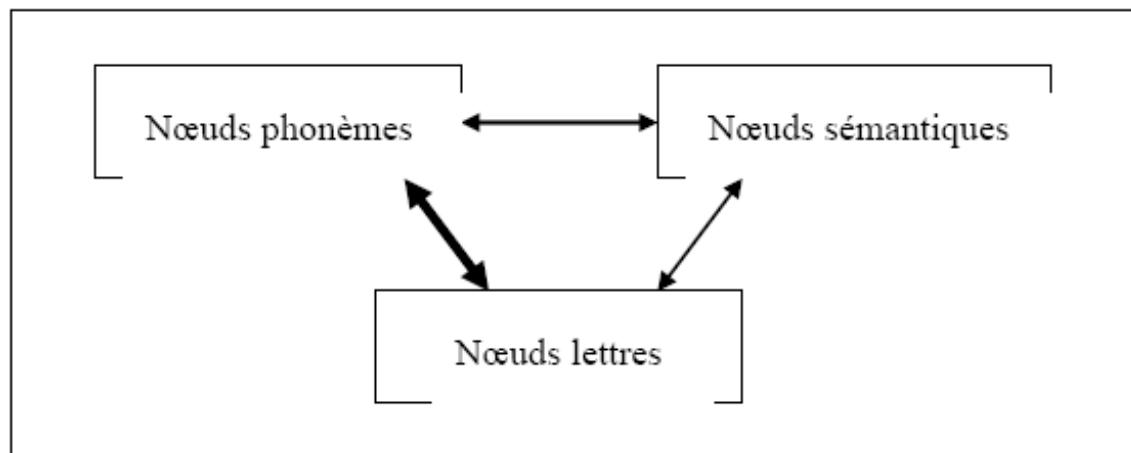


Figure 3 : Représentation schématique des trois familles de nœuds activées lors de la présentation d'un mot écrit, d'après Bosman & Van Orden (1998).

1.3. Arguments pour un rôle de la phonologie en lecture

Etant donné les différences de statut accordé aux connaissances phonologiques dans ces modèles, de nombreux travaux de psychologie expérimentale portent sur le rôle de la phonologie dans la reconnaissance de mots écrits. Au début de l'acquisition de la lecture, l'enfant ne posséderait pas encore de lexique orthographique et utiliserait principalement l'assemblage phonologique pour reconnaître les mots écrits (Bosman & de

Groot, 1996). Les représentations orthographiques de l'apprenti-lecteur seraient par ailleurs moins efficaces que celles des lecteurs experts (Booth, McWhinney & Perfetti, 1999). Des expériences faisant varier le nombre de présentations d'un mot écrit nouveau à des enfants montrent qu'elles doivent être assez nombreuses (à partir de 9) pour que l'enfant utilise la représentation orthographique du mot (Reitsma & Vinke, 1986 ; Waters et al., 1985). Chez l'enfant, le rôle des connaissances phonologiques dans le processus de reconnaissance de mot écrit n'est donc pas discuté. C'est surtout chez les lecteurs experts que le rôle de la phonologie est en question (Frost, 1998 ; Rastle & Brysbaert, 2006, pour des revues). La procédure par adressage étant très au point dans leur cas, le traitement du mot écrit pourrait en effet s'affranchir de toute participation des connaissances phonologiques infra-lexicales. Montrer qu'elles interviennent tout de même chez de tels lecteurs serait donc un argument très fort pour le caractère systématique et irrépressible de leur participation. Dans les années 90', des recherches ont étayé la thèse d'un codage phonologique qui ne serait pas forcément exhaustif, ni suffisant en lecture, mais qui ne serait pas pour autant « optionnel ». Ces travaux portent sur plusieurs langues alphabétiques (e.g., en anglais, Berent & Perfetti, 1995 ; en allemand, Ziegler & Jacobs, 1995 ; en serbo-croate, Lukatela, Carello & Turvey, 1990 ; en hébreu, Frost & Kampf, 1993 ; en français, Ferrand & Grainger, 1992 ; Bedoin, 1995) et non-alphabétiques (en chinois, Perfetti & Zhang, 1991 ; en japonais kanji, Wydell, Patterson & Humphreys, 1993). Par la suite, des données issues de l'électro-encéphalographie et de l'imagerie cérébrale ont confirmé l'intervention systématique d'un code phonologique en lecture silencieuse (Newman & Connolly, 2004), y compris dans des langues comme le chinois où l'association entre orthographe et phonologie est extrêmement irrégulière (Peng et al., 2004).

Il existe plusieurs paradigmes montrant le rôle crucial de la phonologie en lecture, mais nous n'en présenterons ici que certains, dont notre travail expérimental s'inspire.

Des expériences de masquage dit rétroactif (backward masking) ont permis de mettre en évidence une activation générale, automatique et précoce de la phonologie en lecture chez le lecteur adulte compétent. Dans ces expériences conduites en lecture, la cible est rapidement présentée puis immédiatement remplacée (masquée) par un autre stimulus. Le participant doit rappeler la cible, tâche rendue difficile par la présence du masque interrompant son traitement (Naish, 1980). Trois types de masques sont généralement utilisés : des masques reliés phonologiquement et orthographiquement à la cible (« masque phonologique » ou « homophone »), partageant avec elle un lien seulement orthographique (« masque orthographique » ou « graphémique ») ou n'ayant ni la même prononciation ni les mêmes lettres que celle-ci (« masque contrôle »). L'effet perturbateur du masque est réduit lorsque la cible (e.g., en anglais, *main*) partage un lien orthographique avec le masque (e.g., *main-MARN*) et l'est encore davantage lorsque ce lien est aussi phonémique (e.g., *main-MAYN*), (Perfetti & Bell, 1991 ; Perfetti, Bell & Delaney, 1988), ce qui atteste l'extraction de cette information phonologique en lecture. Dans ces expériences, le contenu orthographique et phonologique du masque est censé « relancer » (*to reinstate*) les codages interrompus dans la cible, ce qui n'est efficace qu'en cas de conformité entre cible et masque. La manipulation du délai entre l'apparition de la cible et l'apparition du masque a permis de montrer qu'un code phonologique participe très rapidement au traitement du stimulus écrit. En anglais, Tan et Perfetti (1999) ont obtenu un effet de masquage essentiellement graphémique pour une cible de 28 ms, mais un effet de masquage plus phonologique que graphémique pour une présentation de 42 ms (voir Perfetti & Bell, 1991, pour un effet de masquage phonologique dès 45 ms). L'effet d'une ressemblance phonologique est même relevée avec une cible de 14 ms suivie d'un masque de 14 ms, mais

cet effet disparaît pour une cible de 28 ms suivie d'un masque de 28 ms dans l'expérience de Frost et Yoge (2001) en hébreu.

Des expériences d'amorçage (priming), dans lesquelles la présentation d'une cible est cette fois précédée d'une amorce, ont également été utilisées pour préciser le rôle précoce de l'intervention phonologique en lecture. La réduction de la visibilité de l'amorce par le recours à des procédures de masquage et des durées de présentation très brèves (paradigme dit « d'amorçage masqué ») permet d'empêcher l'utilisation stratégique des informations extraites de l'amorce puisque celle-ci n'est pas visible conscientement. De nombreuses recherches utilisant ce paradigme ont montré que l'information phonologique influence les performances dans des tâches d'identification perceptive (Perfetti & Bell, 1991) : l'identification d'un mot-cible est en effet meilleure lorsque celui-ci est précédé d'une amorce phonologiquement et orthographiquement reliée (e.g., en anglais, rait-RATE) plutôt que d'une amorce reliée seulement orthographiquement (e.g., ralt-RATE), (Booth, McWhinney & Perfetti, 1999). Des effets d'amorçage phonologique direct ont également apporté des données allant dans ce sens. La reconnaissance d'une cible est améliorée par des amorces (mot ou pseudo-mot) homophones ou similaires du point de vue phonologique en serbo-croate, chinois, allemand, anglais et français (Berent, 1997 ; Brysbaert, 2001 ; Ferrand & Grainger, 1992, 1994, 1995 ; Grainger & Ferrand, 1996 ; Lukatela & Turvey, 1994 ; Perfetti & Bell, 1991 ; Perfetti & Zhang, 1991 ; Rayner, Sereno, Lesch & Pollatsek, 1995 ; Booth et al., 1999). Les effets se manifestent si rapidement (pour une amorce de 29 ms) qu'ils traduisent certainement un codage pré-lexical (Lukatela, Frost & Turvey, 1998). Les effets de similarité phonologique amorce-cible sont généralement étudiés en utilisant des paires de stimuli partageant complètement la forme phonologique, ou au moins l'attaque, la rime ou quelques phonèmes, avec l'idée implicite d'une intervention précoce du code phonologique en reconnaissance de mots écrits. Les données présentées au paragraphe suivant (paragraphe 2) indiquent cependant que ce code est suffisamment fin pour impliquer des informations encore plus détaillées, infra-phonémiques.

Pour obtenir une facilitation phonologique, la durée de présentation de l'amorce est un facteur critique. Perfetti et Bell (1991) ont observé cette facilitation entre 45 et 65 ms, Ferrand et Grainger (1993) entre 40 et 50 ms, mais dès 29-30 ms d'autres auteurs décrivent déjà un amorçage phonologique (Booth, McWhinney et Perfetti, 1999 ; Lukatela, Frost & Turvey, 1998). Ces effets facilitateurs semblent bien dus à une activation précoce, automatique et prélexicale de l'information phonologique.

Pour certains auteurs, les paradigmes d'amorçage et de masquage (reposant sur un principe d'interruption d'un processus) conduiraient les participants à davantage utiliser l'information phonologique qu'ils ne le feraient dans une situation plus naturelle de lecture (Verstaen, Humphreys, Olson & d'Ydewalle, 1995 ; Van Orden, Johnston & Hale, 1988). Pourtant, l'intervention de l'information phonologique a également été démontrée dans des tâches plus proches de la lecture normale (situations plus écologiques) : Van Orden (1987) et Van Orden, Johnston et Hale (1988) ont par exemple observé que les participants produisent plus d'erreurs positives dans une tâche de catégorisation sémantique lorsqu'ils doivent décider si « *ROWS* (homophone du mot *ROSE*) est une *fleur* » par rapport à *ROJE* (contrôle orthographique). L'effet d'interférence (le participant répond de manière erronée à « *ROZE* est une *fleur* ») suggère que la séquence de lettres *ROZE* a été encodée phonologiquement et a activé la représentation lexicale de *ROSE*. La réplication de ce résultat dans des conditions de présentation rapide (45 ms) et masquée confirme que ces effets phonologiques participent à des étapes très précoce du traitement de l'écrit (Peter & Turvey, 1994). Bosman et de Groot (1996) ont par ailleurs montré dans une tâche

de correction de fautes (tâche assez proche des conditions normales de relecture d'un texte) que les enfants, qu'ils soient lecteurs débutants ou plus expérimentés, détectent moins les erreurs portant sur des pseudo-homophones que celles portant sur des contrôles. Cet effet est également observé chez des adultes bons lecteurs (Van Orden, 1991). Un tel résultat confirme la présence de la médiation phonologique en lecture. L'intervention irrépressible de connaissances phonologiques en lecture apparaît aussi dans une tâche de jugement d'une relation sémantique entre deux mots présentés simultanément : il est plus difficile de répondre « non » pour des mots écrits non reliés sémantiquement, si l'un d'eux est homophone d'un mot lié (e.g., PILLOW-BEAD), (Lesch & Pollatsek, 1998 ; Luo, Johnson & Gallo, 1998). Ziegler et Jacobs pour l'allemand (1995) et Ziegler, Van Orden et Jacobs pour l'anglais (1997) ont quant à eux mis en évidence l'existence d'un effet « pseudo-homophone » dans une tâche de bas niveau (déttection de lettres) : en anglais, un participant commet significativement plus d'erreurs par oubli pour détecter un I dans TAIP, homophone à TAPE ne contenant pas de I, que lorsqu'il s'agit de détecter un I dans BAIP qui n'a pas d'homophone ne contenant pas cette lettre ; il fait aussi plus de fausses alarmes pour détecter un I dans BRANE, homophone de BRAIN contenant un I, que lorsqu'il s'agit de détecter un I dans BRATE. Cet effet *pseudo-homophone*, mis en évidence dans une tâche de détection de lettres, a été répliqué dans des conditions de lecture plus écologiques (temps de présentation non limité et masque pattern supprimé). Ces résultats constituent des arguments particulièrement convaincants pour une participation irrépressible de connaissances phonologiques au processus de reconnaissance de mot écrit, car l'effet de cette participation se produit ici au détriment des performances, comme s'il ne pouvait être évité.

D'autres preuves montrant le fort impact de la phonologie en lecture sont issues d'expériences d'amorçage sémantique avec médiation phonologique. La reconnaissance de mots écrits et la dénomination sont améliorées lorsque la cible est précédée par un homophone d'un mot sémantiquement relié à cette cible. Une facilitation en dénomination a été observée avec un SOA de 100 ms en anglais (Lesch & Pollatsek, 1993 ; Lukatela, Lukatela & Turvey, 1993 ; Lukatela & Turvey, 1991), et en décision lexicale en français, que l'amorce soit un mot ou un pseudo-mot (Bedoin, 1995 : présentation de l'amorce = 50 ms et d'un masque = 50 ms avant la cible).

Cet ensemble de travaux apporte donc des arguments au fait que la phonologie joue un rôle automatique et précoce en lecture. Nous allons maintenant montrer que ce code phonologique impliqué dans la reconnaissance de mots écrits pourrait être décrit en termes de traits phonologiques.

2. Les traits phonologiques dans les traitements langagiers

L'information phonologique semble donc jouer un rôle automatique et précoce dans le processus de reconnaissance de mots écrits, et ceci aussi bien dans des situations expérimentales de lecture que dans des situations plus naturelles. Il est néanmoins nécessaire de s'interroger sur la nature des unités de connaissances du code phonologique impliqué dans la reconnaissance des mots écrits. Notre hypothèse est que le lecteur est sensible à la ressemblance phonologique infra-phonémique entre des stimuli écrits traités successivement. Cela pose la question du statut cognitif et du rôle des traits dans les

traitements langagiers, question que nous proposons de replacer dans le cadre général des travaux sur les effets de similitude phonologique en psycholinguistique.

2.1. Statut cognitif des traits phonologiques

Les théories du décodage de la parole supposent généralement l'existence de représentations lexicales abstraites, mais décrivent aussi des représentations phonologiques pré-lexicales. Ainsi, la plus petite différence entre deux mots d'une langue implique une différence d'au moins un phonème. C'est pourquoi le phonème est un candidat privilégié comme unité de représentation pré-lexicale. Il s'agit d'un concept fondamental qui propose des unités invariantes très utiles pour la description de la parole.

L'étude de la perception de la parole accorde un statut central au processus qui associe des sons à des catégories phonémiques. La répartition du signal de parole en unités discrètes est une activité catégorielle qui témoigne d'un véritable codage de l'information. L'avantage observé pour la discrimination de sons de parole situés de part et d'autre d'une frontière phonémique (Liberman, Harris, Hoffman & Griffith, 1957) et la difficulté à les discriminer s'ils sont au contraire du même côté d'une frontière, constituent deux phénomènes qui fondent la pertinence psychologique de la notion de phonème. La perception catégorielle des phonèmes suggère que les unités phonémiques sont les éléments de base des représentations phonologiques.

Pourtant, le phonème est lui-même analysable en traits distinctifs, et défini comme un faisceau de traits. La structure phonologique d'un système de sons peut en effet être définie à partir de tels traits. Il est donc également possible que, d'un point de vue cognitif, ces traits soient représentés mentalement et jouent un rôle dans les processus de traitement de la parole. Les théories phonologiques actuelles s'accordent le plus souvent sur ce principe : les sons de parole seraient représentés en termes de traits articulatoires (Hahn & Bailey, 2005). Ces traits constituerait une interface entre des unités linguistiques intermédiaires, telles les syllabes, les phonèmes, et les sous-unités physiques (les productions articulées et les commandes motrices associées) de la parole (Meyer & Gordon, 1985).

Des modèles phonologiques récents proposent de décrire la structure des traits phonétiques (Clements, 1985). Certains traits ne sont pas indépendants, les traits [anterior] et [back] ne le sont pas, car un phonème ne peut avoir ces deux traits à la fois. Des traits mutuellement indépendants sont pour cela représentés sur des plans séparés, et constituent des catégories. On distingue ainsi :

- les traits laryngés, qui correspondent à l'état du larynx (voisement)
- la nasalité, qui correspond à l'ouverture du voile du palais
- les traits de mode qui correspondent au degré et au type de fermeture et d'ouverture du tractus vocal supralaryngé
- les traits de lieu qui correspondent au point d'articulation où la fermeture ou le rapprochement des articulateurs s'opère dans le tractus vocal.

L'hypothèse d'un statut cognitif des traits ne fait cependant pas tout à fait l'unanimité. A l'issue d'expériences de discrimination de syllabes dans un contexte bruité ou non, Wang et Bilger (1973) émettent ainsi des doutes sur l'existence de telles représentations mentales. En effet, il est difficile de faire émerger un ensemble de traits homogènes qui transmettraient particulièrement bien l'information, que ce soit à partir de l'analyse des confusions perceptives (notamment lors de la perception de syllabes dans du bruit) ou des réponses dans des tâches de jugement de similarité. Dans chaque expérience, certains

traits semblent privilégiés, mais ils varient selon la tâche, la position du segment dans la syllabe (VC vs. CV), le contexte de présentation (avec ou sans bruit). Par ailleurs, même si une analyse des données de chaque expérience peut être efficacement pratiquée à partir d'un système de traits, plusieurs systèmes de traits assez différents sont pour cela efficaces, et ce ne sont pas toujours les mêmes selon les contextes (Singh, Woods & Becker, 1972 ; Wang & Bilger, 1973). De plus, il est difficile d'associer chaque trait à un ensemble d'invariants acoustiques, ce qui a longtemps fait douter de l'existence de traits comme véritables catégories perceptives (Stevens, 2002).

Pour dépasser ces doutes, deux types d'éléments peuvent être évoqués.

Tout d'abord, des travaux expérimentaux se sont développés autour de différents types de traitements langagiers (mémorisation, production, perception de la parole...) pour montrer que la notion de représentation de traits permet souvent une meilleure analyse des performances qu'une interprétation basée sur les phonèmes. Il s'agit souvent d'expériences faisant varier la similarité des phonèmes en termes de traits phonologiques. Il est parfois demandé au participant d'évaluer directement cette similarité, mais l'influence des traits est souvent évaluée de façon plus indirecte. Nous proposons dans les parties 2.2. à 2.6. une synthèse de ces travaux, et dans la partie 3 nous présenterons notre proposition théorique à ce sujet dans le domaine de la lecture.

D'autre part, il faut signaler le développement de théories phonologiques regroupant les traits en catégories, fonctionnant sur des plans différents. Elles semblent offrir un cadre théorique propice à une meilleure compréhension des processus langagiers et des représentations qui les sous-tendent. Sans prétendre à une description détaillée de ces théories, nous les évoquerons dans la partie 4. Puis nous présenterons une synthèse des données actuelles permettant d'argumenter le regroupement des traits en catégories et leur éventuelle organisation hiérarchique. Ces différentes questions seront ensuite reprises concernant le système phonologique des enfants (partie 5).

Les données évoquées pour défendre la pertinence cognitive des traits dans les effets phonologiques sont souvent issues d'expériences où la notion de *similarité* est centrale. Il est généralement admis que la similarité phonologique entre deux mots dépend d'un ensemble de comparaisons entre les phonèmes correspondant aux mêmes positions, grâce à un processus d'alignement structural, ce qui permet de calculer une distance phonémique entre ces mots (Hahn & Bailey, 2005 ; Vitevitch & Luce, 1999). Cependant, la validité de cette mesure de la similarité a été assez peu étudiée et les métriques utilisées varient entre les études. Au-delà de l'évaluation parfois intuitive de cette similarité phonologique (Baddeley, 1966), notons que le partage de la rime est souvent retenu comme critère (Prasada & Pinker, 1993), de même que le nombre de phonèmes en commun ou distincts (Greenberg & Jenkins, 1964). Quelques travaux testent si la similarité entre deux stimuli linguistiques dépend aussi de la quantité de traits partagés. Dans ce cas, le présupposé est que les phonèmes ne seraient pas organisés de manière linéaire : la différence entre deux phonèmes reposeraient sur la quantité de traits qu'ils partagent ou qui les distinguent. Une telle approche s'intègre dans le champ plus général des recherches sur la similarité, qui évaluent celle-ci en prenant en compte les traits visuels ou sémantiques (Tversky, 1977) pour expliquer son rôle dans diverses activités cognitives. Nous verrons que, dans le domaine du langage, une métrique basée sur les traits phonologiques s'avère en général plus efficace qu'une métrique basée sur les phonèmes pour expliquer les données, que ce soit pour rendre compte des confusions en perception, en mémorisation, des erreurs de production ou du temps nécessaire à l'accès lexical. Nous rapprocherons ces travaux dans notre synthèse.

L'objet de notre recherche se rapporte, lui aussi, au statut cognitif des traits, mais nous les étudions dans des situations de lecture. Nous souhaitons montrer la sensibilité des lecteurs à des variations estimables en termes de traits phonologiques, afin d'apporter des arguments pour le rôle organisateur de ces traits dans des activités langagières s'écartant de la perception de la parole. Notre objectif sera de proposer la description de mécanismes susceptibles d'expliquer *comment* les connaissances sur ces traits interviennent en lecture. Avant cela, nous présentons quelques arguments sur le statut cognitif des traits phonologiques, issus de travaux impliquant différents types d'activités langagières.

2.2. Rôle des traits phonologiques en mémorisation à court terme

Les expériences de rappel immédiat de listes de mots fournissent des indices à propos de l'intervention systématique de connaissances sur les traits acoustiques-phonétiques des phonèmes. Ces données sont particulièrement convaincantes car les situations expérimentales dont elles sont issues ne requièrent jamais explicitement de telles connaissances. Deux types d'effets pourraient témoigner de l'implication de connaissances sur des traits phonologiques.

Le rappel immédiat d'une série de stimuli verbaux venant d'être appris donne souvent lieu à des erreurs. Certains phonèmes ne sont pas correctement produits dans les réponses. Toutefois, les substitutions de phonèmes ne se font pas au hasard : elles tendent à préserver beaucoup de traits phonologiques. Wickelgren (1965) a ainsi analysé les réponses erronées à partir de plusieurs systèmes de traits. Tous permettent des prédictions correctes à propos des erreurs. Le système de traits le plus efficace propose une analyse des consonnes en voisement, nasalité, mode d'articulation et lieu d'articulation. Les résultats suggèrent que les consonnes des mots appris ne sont pas codées en mémoire temporaire comme de simples unités phonémiques, mais plutôt comme un ensemble de traits distinctifs, chacun étant susceptible d'être oublié de manière relativement indépendante. Les phonèmes ne seraient donc pas les unités de codage les plus élémentaires pour la parole.

Par ailleurs, les expériences de mémorisation ont montré que la quantité d'erreurs varie selon la similarité phonologique entre les mots à apprendre. Une série de mots est en effet moins bien rappelée si les mots se ressemblent du point de vue phonologique. Dans les listes présentant une forte similarité, les mots qui partagent beaucoup de caractéristiques acoustiques suscitent le plus d'erreurs (Baddeley, 1966, 1968 ; Conrad & Hull, 1964). Une des explications proposées pour ce phénomène est la migration de traits. Les items seraient représentés comme des ensembles de traits et, en cas de forte ressemblance, les traits de phonèmes distincts, stockés en mémoire de travail, entreraient en interaction. Cela produirait des interférences. Les interactions pourraient prendre la forme d'une migration de traits créant des conjonctions illusoires. Ce phénomène est par exemple observé dans des expériences de rappel de pseudo-mots chez des enfants de 7 à 8 ans (Gathercole, Pickering, Hall & Peaker, 2001). Différentes méthodes de calcul de la similarité phonologique ont été utilisées pour étudier ces effets. Une méthode particulièrement efficace a été proposée par Mueller, Seymour, Kieras et Meyer (2003). Tous les traits phonologiques de chaque phonème du mot sont identifiés à partir du système de Chomsky et Halle (1968), chaque phonème étant ainsi associé à 13 traits binaires (au maximum) qui décrivent l'état des articulateurs vocaux. Sur cette base, un profil de similarité des couples de mots est alors calculé, non seulement en comparant les phonèmes individuellement, mais en prenant en compte leur place respective dans l'attaque, le noyau et la coda de chacune des syllabes. Les résultats de deux expériences permettent aux auteurs de conclure que,

ainsi calculée, la similarité phonologique est un excellent prédicteur des performances en rappel. L'évaluation de la similarité phonologique ayant été effectuée sur la base de traits articulatoires, il semble que les représentations de mots stockées temporairement en mémoire de travail soient codées dans un format très proche de celui que les articulateurs de l'appareil vocal utilisent pour produire la parole. Cette nature au moins en partie articulatoire du code utilisé est aussi défendue par un résultat obtenu par Conrad (1972) dans une épreuve de mémorisation de séquences de 5 à 6 lettres chez des participants adultes sourds profonds. Seuls les sourds ayant acquis de bonnes capacités d'expression orale présentent des erreurs similaires à celles des contrôles sans difficulté auditive : ils commettent plus d'erreurs de type phonologique que le hasard ne permet de le prédire et la configuration des erreurs est la même dans ces deux groupes. Dans la mesure où ces personnes sourdes ont développé des programmes moteurs adaptés à la parole en dépit de déficits auditifs massifs, les traits phonologiques qui sont à la base de ces erreurs seraient fortement liés à des composantes articulatoires, et pas seulement à des aspects acoustiques.

Dans leur ensemble, les recherches sur les représentations stockées en mémoire de travail concluent donc à la pertinence d'une description des représentations cognitives en termes de traits infra-phonémiques.

2.3. Rôle des traits phonologiques en production de la parole

2.3.1. Points communs aux erreurs de mémorisation et de production de la parole

Certains chercheurs ont mis en avant un ensemble de points communs aux erreurs de rappel immédiat d'une série d'informations verbales (comme nous venons de le résumer dans la partie précédente) et aux erreurs de production de parole spontanée (Ellis, 1980 ; Page, Madge, Cumming & Norris, 2007). Ellis fait l'hypothèse d'une mémoire temporaire de réponse (*buffer*) commune à ces deux types d'activité. Il s'agit d'un présupposé très économique. Cette mémoire stockerait temporairement le programme de parole entre la planification de la parole et l'articulation. Il interviendrait alors aussi bien dans les situations de production de parole que dans les tâches de mémorisation à court terme d'une série d'éléments. C'est pourquoi les erreurs commises dans les deux activités dépendraient de contraintes communes. Au nombre de ces contraintes, les auteurs notent le respect de la position des phonèmes dans leurs échanges, mais aussi l'effet de similarité de traits (*feature-similarity effect*) : les consonnes auraient d'autant plus de risque d'être échangées qu'elles ont beaucoup de traits en commun. De plus, des consonnes auraient d'autant plus de risque d'être échangées qu'elles interviennent dans un même contexte vocalique (*contextual similarity effect*). Avant d'être relevés par Ellis dans des épreuves de mémoire, ces principes régissant les erreurs avaient été décrits dans des tâches de production (MacKay, 1970).

Page et ses collègues (2007) ont confirmé la pertinence de ce rapprochement entre deux domaines de recherche auparavant distincts. Ils ont comparé les erreurs de rappel immédiat d'une série de lettres présentées visuellement et les erreurs commises dans une tâche de lecture à haute voix de cette liste. Les données ont montré que les performances dans les deux activités sont soumises à de mêmes effets de similarité phonologique. Par exemple, Ellis (1982) a décrit la sensibilité des locuteurs au partage de nombreux traits entre les attaques des syllabes (e.g., un mot commence par /dr/ et l'autre par /tr/). Page et ses collègues (2007) ont montré que les erreurs en rappel immédiat sont également très

sensibles à cette contrainte. Ces résultats soulignent que le rappel immédiat et la production de parole sont influencés par de mêmes types de ressemblances infra-phonémiques.

2.3.2. Effets de similarité phonologique sur la production de la parole

L'analyse des erreurs en production de parole a tout d'abord révélé qu'elles sont liées à des phénomènes de similarité phonologique générale. Par exemple, la présence de deux mots phonologiquement similaires dans une même phrase augmente les risques de les prononcer incorrectement (Stemberger, 1990). De même, la ressemblance du mot à prononcer avec un voisinage phonologique lexical important (i.e. de nombreux mots ressemblent à la cible) permet d'expliquer l'asymétrie observée dans les erreurs de substitution (i.e., la fréquence de substitution d'un phonème A par B n'est pas forcément identique à la fréquence de substitution de B par A) survenant lors de la prononciation de mots (Frisch, 1996, cité par Hahn & Bailey, 2005). De même, les erreurs dans la forme donnée aux verbes anglais au passé peuvent s'expliquer par leur ressemblance avec des mots similaires (Bybee & Slobin, 1982).

Hahn et Bailey (2005) remarquent que, malheureusement, la ressemblance phonologique est évaluée de façon variable entre les études sur l'influence de la similarité phonologique en production. Elle est parfois calculée au niveau de la forme générale du mot (*wordshape*, Stemberger, 1990) (e.g., les configurations de type CVCC, CVCCV, etc), par le partage de la rime (Prasada & Pinker, 1993) ou par le nombre de phonèmes différents ou partagés (Greenberg & Jenkins, 1964). Sevald et Dell (1994) montrent par exemple que la production rapide de quatres séquences CVC (en prononcer le maximum en 8 secondes) est ralentie pour les CVC qui partagent le même son initial CV ; les erreurs de production sont alors particulièrement fréquentes dans la suite de la syllabe. Une évaluation infra-phonémique de la similarité phonologique n'est donc pas systématique.

L'issue des travaux sur les effets de similarité basés sur une prise en compte des traits phonologiques a pourtant un enjeu important par rapport à des modèles de traitement de la parole. Par exemple, en n'observant pas d'effet de similarité phonologique basé sur le nombre de traits partagés entre deux mots qui n'ont aucun phonème en commun, Stemberger estime qu'il ne vérifie pas la prédiction du modèle de Rumelhart et McClelland (1986). En effet, ces derniers proposent que l'encodage des phonèmes est sensible au contexte créé par les phonèmes environnants, décrits au niveau de leurs traits. D'autres propositions théoriques sont aussi basées sur une description des mots en termes de traits phonétiques. Treisman (1978) propose ainsi de représenter un mot par un point dans un espace phonétique multidimensionnel, dans lequel un grand nombre de caractéristiques phonétiques sont prises en compte (voyelle ou consonne, nombre de syllabes, position de l'accent, lieu d'articulation, mode d'articulation, voisement, etc). Nous allons voir que, contrairement aux conclusions de Stemberger, certaines données obtenues dans des épreuves de production de parole sont cohérentes avec ces propositions théoriques qui prennent en compte un niveau très fin de représentation phonologique des mots.

Le rôle de la similarité en termes de traits est envisagé de trois manières : 1/ le partage de nombreux traits par les stimuli présentés (rôle de la similarité du contexte) augmenterait les risques d'échanges entre phonèmes, 2/ les erreurs seraient plus explicables par un échange de traits que par un simple échange de phonèmes et 3/ pourraient se limiter à des types de traits particuliers.

2.3.2.1. Effet de la similarité phonologique du contexte sur les erreurs de production

Stemberger (1990) a observé une augmentation des erreurs de production lorsque deux mots successifs partagent un phonème, mais, en l'absence de partage de phonème, il n'observe pas davantage d'erreurs si les premières consonnes des deux mots diffèrent par un seul trait articulatoire (e.g. *b ig g lass*) plutôt que par plusieurs (e.g. *b ig s lip*).

Toutefois, comme nous l'avons déjà signalé, d'autres études ont tout de même montré que des consonnes qui partagent de nombreux traits ont plus de risque d'être échangées entre elles (Ellis, 1979; MacKay, 1970 ; Page et al., 2007). MacKay (1970) l'observe par exemple à partir d'une analyse d'erreurs de production de parole en allemand et en anglais : les phonèmes qui sont échangés d'un mot à l'autre constituent des erreurs particulièrement fréquentes quand ces deux mots partagent des phonèmes par ailleurs, et quand les phonèmes échangés partagent de nombreux traits. Il cite des travaux montrant la même chose en grec, en français et en croate. Il y a une exception : les phonèmes échangés diffèrent souvent par leur lieu d'articulation. C'est donc ce trait qui aurait tendance à être échangé. Sevald et Dell (1994, Expérience 1) montrent aussi que la majorité des erreurs dans une tâche de production rapide de séquences implique des substitutions de consonnes qui partagent elles-mêmes beaucoup de traits (e.g., /r/ et /l/, /p/ et /t/). Les auteurs suggèrent que, pour rendre compte de leurs erreurs, il n'est pas forcément nécessaire d'évoquer une compétition entre phonèmes ; une compétition entre traits pourrait suffire.

Dans certains cas d'aphasie, les erreurs par échange ou par substitution entre phonèmes dans des discours spontanés tendent aussi à survenir davantage quand les phonèmes partagent beaucoup de traits phonologiques (Fromkin, 1971 ; MacKay, 1970). L'analyse des matrices de confusions révèle ainsi qu'il y a plus d'erreurs pour les paires /p/-/t/ et /p/-/b/ que pour la paire /p/-/d/. Ces données neuropsychologiques sont donc cohérentes avec certains travaux effectués auprès de participants sains.

Les performances en production peuvent être évaluées non seulement à travers les erreurs, mais aussi les latences de production. Dès 1970, Bradshaw a noté une réduction de la vitesse de production lorsqu'il s'agit de prononcer en alternance des syllabes qui partagent le même lieu d'articulation (e.g., la vitesse est réduite pour produire « *vah, mah, vah, mah* » plutôt que « *vah, nah, vah, nah* »). Bien que les variations de rythme de production puissent en partie s'expliquer par des interactions entre les articulateurs, à un niveau de traitement très périphérique, elles pourraient aussi ne pas être étrangères à des mécanismes plus centraux (Meyer & Gordon, 1985). La vitesse de production a aussi été étudiée par Yaniv, Meyer, Gordon, Huff et Sevald (1990) dans une expérience où le locuteur doit se préparer à produire le plus vite possible deux mots, dans l'ordre de présentation ou parfois dans l'ordre inverse, en fonction d'un indice préalable. Une telle situation expérimentale rend la production difficile à un niveau pré-moteur, et il s'agit alors d'évaluer si les erreurs dépendent de la ressemblance entre les items à produire. Les auteurs ont testé si le partage d'un trait par des stimuli successifs génère des erreurs et/ou retarde la production. La vitesse de production est évaluée en fonction de la ressemblance phonétique entre les voyelles des mots CVC ainsi produits. La latency est plus longue lorsque des voyelles se ressemblent beaucoup. Les auteurs concluent qu'un mécanisme d'inhibition latérale module probablement le processus de programmation motrice lors de la production de parole. Avec un paradigme expérimental du même type (*response-priming procedure*), Meyer et Gordon (1985) montrent un résultat de même type à partir de la ressemblance phonologique des consonnes. Ils ont évalué si la préparation à une réponse (réponse primaire), qui finalement ne doit pas être produite, influence le délai pour prononcer une autre réponse (réponse secondaire), qui doit être donnée à la place lorsqu'un indice demande de le faire. Ils montrent que la réponse secondaire est ralentie si le participant

vient de se préparer à produire une réponse primaire qui partage certains traits avec elle. Le mécanisme central de programmation de la parole serait donc influencé par des unités phonologiques infra-phonémiques. L'effet négatif du partage de trait a ainsi été observé pour le voisement et pour le lieu d'articulation, l'effet du voisement étant le plus systématique à travers les expériences.

De même, dans des expériences où 84 adultes ont lu à haute voix une succession de stimuli, Rogers et Storkel (1998) ont observé une augmentation de la latence de production d'un mot si le début de ce mot partage des traits phonologiques avec le début du mot précédent. Dans l'épreuve, les participants devaient lire à voix haute, le plus vite possible, une série de mots apparaissant successivement sur un écran. Ils riment, mais leurs consonnes initiales peuvent être plus ou moins similaires : certaines ne partagent aucun trait, d'autres partagent seulement le voisement, ou seulement le mode, le mode et le voisement ou le mode et le lieu. L'intervention d'un mécanisme d'inhibition basé sur des traits est attestée dans cette expérience par le ralentissement des productions dans les conditions où la consonne initiale du stimulus partage un ou des trait(s) avec la consonne initiale du mot précédent, par rapport à la condition contrôle. Cet effet de partage de traits serait dû à un phénomène intervenant lors de l'étape d'encodage phonologique. Il s'agit d'une étape du processus de production où la représentation sémantique et syntaxique du mot (lemme) est traduite sous une forme phonologique, abstraite, avant l'encodage phonétique et sa traduction dans un code moteur. Il s'agirait donc d'une étape pré-motrice dans le processus de production de la parole.

Ainsi, la ressemblance infra-phonémique peut produire une détérioration des performances, et les unités de représentation phonologiques utilisées dans la planification pré-motrice contiendrait une information détaillée sur les traits.

2.3.2.2. Erreurs de production par substitution de traits plutôt que de phonèmes

Les mécanismes par lesquels certains traits sont préservés dans les erreurs de production restent difficiles à cerner. Shattuck-Hufnagel & Klatt (1979) ont analysé une matrice de confusion de phonèmes à partir d'un ensemble de 1620 erreurs de production spontanées. Ils se sont tout d'abord employés à écarter certaines interprétations pour expliquer les erreurs.

Ils évoquent tout d'abord une prédiction issue des modèles de la marque (*markedness models*), selon lesquels les segments non marqués phonologiquement (e.g., non voisés) seraient particulièrement robustes : fréquents dans la langue, ils seraient acquis précocement et/ou simples à articuler. Une étude réalisée sur un corpus de 438 erreurs par substitution commises par des enfants de 6 ans a par exemple montré que le remplacement par une consonne sourde est 19 fois plus fréquent que le remplacement par une consonne sonore (Snow, 1964). De même, un rapport rédigé sur les erreurs de prononciation d'écoliers (384 erreurs) publié en 1970 (Williams, 1970) révèle que les erreurs par substitution consistent fréquemment à remplacer un phonème complexe par un phonème moins complexe. De plus, une tendance à faciliter l'articulation se double d'une tendance à augmenter les distinctions perceptives. Si la marque, la complexité articulatoire ou la tendance à augmenter les distinctions déterminent en partie la répartition des erreurs chez les enfants, Shattuck-Hufnagel et Klatt (1979) montrent que ce n'est cependant pas le cas chez les adultes.

Ces auteurs ont voulu tester l'hypothèse selon laquelle les erreurs de production des adultes consistent à échanger un trait entre deux phonèmes du mot, ce qui témoignerait de l'implication de représentations de traits lors de la planification de la production. Malheureusement, bien que de telles erreurs soient répertoriées dans leur corpus, elles restent assez rares. D'après la synthèse de Rogers et Storkel (1998), ces échanges ne représenteraient que 5% des erreurs, mais ces erreurs pourraient en fait être sous-estimées car elles sont perceptivement peu saillantes. Ce résultat incite tout de même à la prudence quant à l'affirmation de l'utilisation de représentations de traits par le locuteur lors de la planification de la production, même s'il ne faut sans doute pas, aussi radicalement que Shattuck-Hufnagel & Klatt (1979), conclure que les erreurs de production impliquent essentiellement des phonèmes et non des traits. D'autres études permettent en effet au débat de subsister.

A partir d'un important corpus d'erreurs de production dans des situations de discours spontané, Fromkin (1971) estime par exemple que les traits phonétiques jouent un rôle important dans les étapes de planification de la production de parole. Elle présente par exemple des observations où un locuteur dit « *glear plue sky* » au lieu de « *clear blue sky* », où le trait de voisement est échangé entre les deux consonnes initiales.

Par ailleurs, dans une autre étude, Stemberger (1989) ne comptabilise pas les erreurs par échange de traits entre deux phonèmes présents dans la phrase, mais les erreurs dans lesquelles un phonème est incorrectement produit à seulement un trait près. Il montre que chez des adultes sans pathologie, la majorité des erreurs de production portant sur des consonnes obstruantes n'impliquent qu'un seul trait (l'auteur utilise un système de trois types de traits : lieu, mode d'articulation et voisement). Ce type d'erreurs représente 74% des erreurs chez les adultes et 80% des erreurs des enfants, alors que seulement 22% des erreurs des adultes (et 17% des erreurs des enfants) impliquent deux traits. Une métrique basée sur les traits est donc mieux à même de rendre compte des erreurs de production spontanée qu'une métrique basée sur les phonèmes.

Pour ce qui est des données en pathologies, la majorité des erreurs de production impliquant un phonème n'implique en fait pas plus d'un ou deux traits phonétiques, que ce soit dans le cas de troubles verbaux acquis ou développementaux (Stackhouse, 1992 ; Thoonen, Maassen, Gabreels & Schreuder, 1994). Les travaux réalisés sur les erreurs de production de patients atteints d'aphasie apportent aussi des arguments importants sur la présence des traits phonologiques dans les représentations verbales. Si les segments étaient simplement organisés comme des touts inanalysables, les erreurs de production par substitution de phonèmes se produiraient au hasard. Or, elles se produisent plus souvent entre des phonèmes qui ne diffèrent que par un seul trait phonologique : une consonne est par exemple incorrecte seulement pour le lieu ou seulement pour le voisement, (Blumstein, 1990) et un patient donné a généralement tendance à faire des erreurs sur un type de traits (par exemple des erreurs de lieu d'articulation ou des erreurs de voisement).

Les études sur la production de la parole apportent donc plusieurs arguments favorables à l'idée d'un rôle majeur des traits phonologiques dans les étapes pré-motrices. Nous avions commencé la présentation de cette synthèse sur la production en précisant que les erreurs survenant dans ce type d'activité présentaient une analogie avec celles que l'on observe dans les tâches de mémorisation à court terme. Un rapprochement entre les erreurs de production et les erreurs de perception de la parole peut également être fait. C'est ce que soulignent Meyer et Gordon (1983). Quand un locuteur se prépare à *produire* un segment, cela affecte la vitesse de *perception* d'un autre segment qui partage des traits avec lui. De même, les auteurs montrent que la perception d'un segment affecte la vitesse

de production d'une autre segment qui en partage certains traits. Cela suggère l'existence de mécanismes communs aux deux activités, mais aussi l'utilisation de connaissances sur des traits phonologiques dans les deux cas.

2.4. Rôle des traits phonologiques en perception de la parole

En perception de la parole, l'évaluation des effets de similarité phonologique a été réalisée selon deux grands principes. Selon le premier principe, les expériences font varier les traits phonologiques qui distinguent le stimulus présenté et un mot, ce qui permet d'étudier le rôle des traits phonologiques dans l'accès lexical. Dans ce premier ensemble de travaux, nous distinguerons les expériences requérant explicitement la détection des erreurs de prononciation dans des mots, d'une part, et les expériences évaluant plus indirectement le rôle de la dégradation (ou de la substitution) des traits sur la réduction des effets lexicaux et sur la réduction des effets d'amorçage, d'autre part. Le second principe demande un jugement plus direct de la similarité entre des stimuli, sans nécessairement impliquer des connaissances lexicales : il s'agit de discriminer des stimuli qui se distinguent par un nombre variable de traits, ou d'estimer explicitement la taille de leur différence.

2.4.1. Dégradation des traits et détection d'erreurs de prononciation

La perceptibilité de différents traits phonologiques a été testée dans des tâches où il s'agit de détecter des erreurs de prononciation dans des mots entendus. L'avantage de cette technique est de tester la sensibilité aux traits dans un contexte écologique, les participants écoutant par exemple un enregistrement de la lecture d'un texte de Lewis Carroll dans lequel certains phonèmes ont été remplacés par d'autres (Cole, 1973). Dans cette étude, l'auteur faisait varier le nombre de traits modifiés pour chaque phonème incorrect. Les auditeurs se sont montrés sensibles à ces unités, puisqu'ils ont détecté 80% des erreurs reposant sur le changement de quatre traits, 70% des erreurs portant sur deux traits et seulement 30% des erreurs impliquant un seul trait. Ce résultat a été répliqué par Marslen-Wilson et Welsh (1978), qui relèvent également un moins bon taux de détection des erreurs (33%) lorsqu'elles n'impliquent qu'un trait, plutôt que trois traits (93%). Bien que la quantité de changement phonémique soit identique, les erreurs de prononciation impliquant peu de traits seraient donc mal perçues. Lorsqu'ils devaient répéter ce qu'ils entendaient (tâche de *shadowing*), les participants de l'expérience de Marslen-Wilson et Welsh produisaient la version correcte des mots comportant pourtant une erreur, dans 74% des cas si un seul trait était modifié et dans 24% des cas si l'erreur portait sur trois traits. Ces phénomènes de restauration spontanée de l'information dégradée suggèrent que l'accès lexical est possible à partir d'un stimulus imparfait, mais la difficulté de cet accès dépend non seulement des phonèmes corrects mais aussi du nombre de traits respectés.

2.4.2. Dégradation des traits et diminution d'effets lexicaux

Le statut réellement cognitif des traits phonologiques des consonnes a ensuite été attesté par des expériences impliquant la reconnaissance de mots. Elles montrent que des stimuli imparfaits, dont le premier phonème est incorrect par rapport à la représentation d'un mot, peuvent tout de même activer le lexique mental. L'accès lexical est cependant d'autant plus difficile que la différence présentée par ce phonème implique un plus grand nombre de traits. L'activation lexicale apparaît comme un processus graduel et la métrique basée sur les phonèmes ne suffit pas pour rendre compte des performances en identification de mots entendus (pour une revue, voir McQueen, Dahan & Cutler, 2003).

Ce principe de changement graduel du nombre de traits pour produire des effets lexicaux est également mis en œuvre pour la tâche de détection de phonème. Dans cette épreuve, un avantage est observé lorsque le phonème-cible est présenté dans un mot plutôt qu'un pseudo-mot. Connine, Titone, Deelman et Blasko (1997) ont montré que cet avantage lexical classique demeure si le phonème-cible est inséré dans un pseudo-mot qui diffère d'un mot par un seul phonème, à condition que cette différence n'excède pas un trait.

2.4.3. Dégradation des traits et amorçage sémantique

Grâce à des expériences d'amorçage sémantique, il est possible de tester si des traits peuvent influencer l'accès à des représentations lexicales (*lexical forms*), mais aussi l'accès au réseau lexical-sémantique. Il faut pour cela montrer que la taille de l'amorçage sémantique varie avec l'adéquation plus ou moins forte entre les traits du stimulus et ceux de la représentation du mot amorce (Blumstein, 2003). De telles expériences ont été conduites avec des stimuli auditifs en néerlandais. Marslen-Wilson, Moss et Van Halen (1996) ont ainsi montré qu'un pseudo-mot amorce qui diffère par un seul phonème d'un mot sémantiquement lié à la cible produit un effet d'amorçage facilitateur, à condition que la différence phonémique n'implique qu'un ou deux traits. Les effets d'amorçage se dégradent de façon linéaire avec le nombre de traits phonétiques incorrects dans les stimuli auditifs (Milberg, Blumstein & Dworetzky, 1988). Cet effet a été répliqué dans des expériences inter-modales en anglais, présentant des couples formés d'une amorce auditive et d'une cible écrite (Connine, Blasko & Titone, 1993). Les auteurs montrent qu'une amorce (e.g., *cedar*) facilite le traitement d'une cible à laquelle elle est sémantiquement liée. Cet effet s'amoindrit, mais s'observe encore, si l'amorce est un pseudo-mot dont la différence acoustico-phonétique avec le mot de base est faible (e.g., *zedar*, diffère de *cedar* par un seul trait). Par contre, il n'y a plus du tout d'effet si l'amorce diffère de ce mot de base par plus de deux traits (e.g., *gedar*). Les différences sont ici évaluées à partir du nombre de traits articulatoires partagés (Jakobson, Fant & Halle, 1952).

L'influence de caractéristiques infra-phonémiques dans l'accès lexical a aussi été testée du point de vue phonétique-acoustique, ce qui est une façon intéressante de montrer l'intérêt de décrire les traits de manière articulatoire et acoustique. Des expériences d'amorçage sémantique ont ainsi proposé des amorces dans lesquelles un seul des indices acoustiques associés à un trait (ici, le VOT pour le trait de voisement) était modifié. La durée du VOT de la consonne initiale de l'amorce (une occlusive sourde en anglais) était réduite de 2/3, ce qui rendait le trait sourd peu représentatif de sa catégorie, et créait une ambiguïté avec le trait sonore (Andruski, Blumstein & Burton, 1994). Les résultats ont révélé une réduction de l'effet d'amorçage produit par de telles amorces présentant cette ambiguïté. Bien que trop subtile pour empêcher l'identification du phonème, cette modification acoustique, infra-phonémique, introduit une ambiguïté suffisante pour perturber l'accès au lexique et au réseau sémantique. Des modifications analogues, mais sur la longueur des voyelles ou sur des consonnes occlusives localisées en position non initiale du mot, ont permis de répliquer cet effet (Utman, Blumstein & Sullivan, 2001). Le simple fait que l'indice acoustique rende le trait peu typique de sa catégorie suffit à produire l'effet. Il n'est pas nécessaire que la détérioration de l'indice acoustique rende le trait plus proche de la valeur de trait opposé. En effet, Blumstein (2003) a répliqué l'effet en allongeant (4/3) le VOT des occlusives sourdes initiales des amorces. Cette manipulation rend le trait peu typique de sa catégorie, sans le rapprocher du VOT typique des occlusives sonores (qui sont des VOT très courts, voire nuls, en anglais).

Il apparaît donc bien que la présence de chaque trait, mais aussi la typicalité de chacun, constituent des critères infra-phonémiques susceptibles d'avoir un impact sur des niveaux de traitements langagiers élevés, lexicaux et sémantiques. Ils ne sont donc pas à négliger pour comprendre les processus linguistiques et leurs détériorations dans les pathologies.

De telles modulations de l'accès lexical par des informations infra-phonémiques s'intègrent bien dans le cadre de certains modèles de reconnaissance de mots entendus, où l'activation des représentations lexicales ne repose pas sur un simple appariement de phonèmes, mais sur le degré de similarité de l'ensemble des traits acoustiques-phonétiques avec la représentation lexicales. C'est le cas du modèle modifié de la cohorte, Cohort II, (Marslen-Wilson, 1987 ; Marslen-Wilson & Warren, 1994), ou de modèles interactifs comme TRACE (McClelland & Elman, 1986). Selon ce dernier, l'activation d'un phonème serait en effet modulée à la fois par l'information acoustique-phonétique et par les représentations lexicales. De même, le modèle strictement ascendant *Shortlist* décrit l'information entrant dans le réseau comme un ensemble de phonèmes représentés sous forme de traits (Norris, 1994). Enfin, selon le *Neighborhood Activation Model* (NAM, Luce & Pisoni, 1998), le stimulus activerait en mémoire un ensemble (*neighborhood*) de configurations acoustico-phonétiques, activant elles-mêmes un système d'unités de décision à propos des mots. Un des avantages de tels modèles est aussi de rendre compte de la grande tolérance des processus de reconnaissance de mot à l'égard des erreurs et des ambiguïtés du signal (pour une revue, voir Miller & Eimas, 1995).

2.4.4. Les traits dans l'amorçage phonologique ou phonétique

La sensibilité des auditeurs à la similarité calculée à partir des traits a aussi été étudiée plus directement, à travers la manipulation de la ressemblance infra-phonémique entre une amorce et un mot cible.

La ressemblance entre un stimulus et un mot est classiquement évaluée en quantifiant les phonèmes qu'ils partagent et ceux qui les différencient. Ainsi, la mesure standard de la densité du voisinage d'un mot est la quantité de mots qui ressemblent à celui-ci, à un phonème près, que ce soit par substitution, ajout ou suppression (Bailey & Hahn, 2001). Malheureusement, cela ne permet pas de prendre en compte la similarité entre les phonèmes : le remplacement de /p/ par /b/ n'est pas considéré comme différent de son remplacement par /z/, bien que le nombre de traits modifiés passe de un à trois. Le modèle d'activation du voisinage (*Neighborhood Activation Model*) de Luce (1986) est en cela une exception, puisqu'il évalue la similarité de deux stimuli à partir des confusions possibles entre leurs phonèmes. Bailey et Hahn (2001) ont également pris en compte ces ressemblances entre phonèmes, afin de proposer « une mesure plus réaliste des différences phonologiques » (p. 573). Ils se sont pour cela basés sur les critères proposés par Frisch (1996), prenant en compte le nombre de classes naturelles auxquelles l'un des stimuli appartient alors que l'autre ne lui appartient pas (une classe naturelle est un groupe de sons partageant un trait phonologique). Les auteurs ont ensuite proposé des expériences dans lesquelles il fallait évaluer à quel point des pseudo-mots étaient typiques de la langue (*wordlikeness*). D'après les résultats de leurs expériences, à partir de la présentation écrite ou auditive des pseudo-mots, le système cognitif perçoit cette typicalité en partie sur la base de la similarité du pseudo-mot avec un mot du lexique, calculée de cette manière. Les autres méthodes de calcul du voisinage lexical d'un pseudo-mot, qui ignorent la similarité entre phonèmes, s'avèrent moins performantes.

Notons que ces travaux évaluant la pertinence cognitive d'une mesure infra-phonémique de la similarité sont cohérents avec les modèles qui décrivent les

représentations lexicales comme des séquences de segments eux-mêmes décrits à partir d'un inventaire de traits distinctifs, comme le propose notamment Stevens (2002). Selon lui, le but du traitement acoustique du signal de parole est de retrouver les traits que le locuteur avait l'intention de produire, afin que ces traits soient mis en correspondance avec le lexique, lui-même décrit à partir de traits et de segments (p. 1872). Une telle conception de l'accès lexical ne fait pas l'unanimité (Klatt, 1979), étant donné la grande variabilité des formes acoustiques d'un trait ou d'un mot, et la faiblesse de la correspondance entre les paramètres acoustiques et les traits distinctifs. Pour Stevens, cette faiblesse n'est qu'apparente, car il est possible de décrire des règles (aujourd'hui seulement découvertes partiellement) expliquant cette variabilité, et définissant la sélection des indices acoustiques nécessaires à l'identification de traits.

Prenant en compte une telle mesure de la ressemblance basée sur les traits, certains auteurs opposent une condition d'*amorçage phonologique*, où l'amorce et la cible partagent au minimum un phonème, et une condition d'*amorçage phonétique* où elles ne partagent aucun phonème mais ont plusieurs traits en commun. Des effets d'amorçage se produisent dans les deux cas, et le simple partage de traits par des stimuli verbaux traités successivement suffit donc à affecter les performances. De plus, les amorçages dits *phonologique* et *phonétique* se traduisent par des effets opposés. Les mécanismes qui en sont responsables pourraient donc ne pas être strictement les mêmes. Ainsi, la perception auditive d'un mot-cible est améliorée par la présentation préalable d'une amorce partageant avec elle au minimum un phonème (*amorçage phonologique*, Slowiaczek, Nusbaum & Pisoni, 1987). Par contre, des effets inhibiteurs sont observés lorsque l'amorce et la cible partagent de nombreux traits phonologiques, mais aucun phonème (*amorçage phonétique*, Goldinger, Luce & Pisoni, 1989 ; Goldinger, Luce, Pisoni & Marcario, 1992 ; Luce, Goldinger, Auer & Vitevitch, 2000). Pour expliquer de tels effets inhibiteurs, les auteurs proposent que des représentations de traits phonologiques, de phonèmes et de mots sont disposées à des niveaux distincts. Le principe est très voisin de celui des modèles d'activation interactive pour la lecture (McClelland & Rumelhart, 1981). Des activations, produisant des effets facilitateurs, sont supposées se produire entre les niveaux. Des connexions latérales agiraient cependant de manière inhibitrice entre les unités d'un même niveau. Dans les situations d'amorçage, les inhibitions latérales entre les phonèmes permettraient de supprimer les compétiteurs des phonèmes identifiés dans l'amorce. Les compétiteurs sont les phonèmes qui n'étaient pas dans l'amorce, mais qui ressemblent à ceux de l'amorce parce qu'ils ont certains de leurs traits. De telles relations d'inhibition latérale pourraient très bien rendre compte du fait que des couples amorce-cible partageant beaucoup de traits (mais pas de phonèmes) suscitent de mauvaises performances sur la cible, phénomène observé dans les expériences de Goldinger et ses collègues (1989, 1992).

2.4.5. Discrimination de phonèmes et partage de traits phonologiques

Les expériences de discrimination de phonèmes réalisées pour répondre à des questions sur les traits phonologiques sont parfois destinées à tester l'importance relative de différents types de traits pour fonder la différence entre les phonèmes. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet, et nous verrons les limites de ces données qui nous renseignent surtout sur l'intelligibilité des différents traits selon les types de distorsion (bruit, filtrage, réduction temporelle du signal...), mais restent insuffisantes pour traiter de leur représentation mentale. Bien que le type de trait distinguant deux phonèmes module les performances en discrimination, les expériences considérées dans leur ensemble montrent une amélioration de la différenciation entre deux stimuli, lorsque le nombre de traits qui les différencient

augmente, que ce soit chez les enfants (Graham & House, 1970), ou les adultes (McInish & Tikofsky, 1969).

Des observations neuropsychologiques concourent à montrer que les représentations sont stockées sous une forme qui préserve les traits phonologiques. En perception de la parole, quelle que soit la forme d'aphasie (mais de manière plus claire dans l'aphasie de Wernicke), les difficultés des patients dans les épreuves de discrimination sont plus marquées si les stimuli de la paire diffèrent par un seul trait (notamment le voisement, ou le lieu d'articulation), plutôt que deux traits (Baker, Blumstein & Goodglass, 1981). Les auteurs remarquent que la condition la plus difficile est celle où les stimuli ne diffèrent que par le lieu d'articulation (plutôt que par le voisement), effet surtout relevé dans l'aphasie de Wernicke (Blumstein, Baker & Goodglass, 1977). Les auteurs interprètent cette difficulté particulière pour le traitement du lieu en disant que ce trait repose sur des indices acoustiques (rapides transitions de formants) qui imposent des demandes particulièrement fortes à l'aire associative auditive de l'hémisphère gauche, région détériorée chez ces patients.

Un ensemble de données en discrimination de phonèmes, tant chez des adultes, des enfants, que chez des patients, concourent donc aussi à soutenir l'hypothèse d'un rôle important des traits dans les représentations phonologiques.

2.5. Rôle des traits phonologiques dans l'évaluation de similarité

Certaines recherches testent si les traits phonologiques ont un statut cognitif à travers des épreuves de jugement de similarité, ou des épreuves d'appariement (choix forcé entre deux stimuli pour apparier à une cible), portant sur des segments dont le nombre de traits en commun varie. Dans ces épreuves métalinguistiques, il s'agit d'une évaluation explicite de la similarité, mais la prise en compte des traits eux-mêmes n'est jamais demandée directement.

Certaines analyses ont tout d'abord montré que les jugements de similarité entre deux mots sont liés à l'évaluation de leur distance phonologique par la proportion de phonèmes différents entre les deux. Cette mesure s'avère efficace pour rendre compte des jugements à propos de mots de 1 à 4 syllabes (Vitz & Wikler, 1973). Les travaux confrontant une évaluation infra-phonémique de la similarité et les résultats d'épreuves métalinguistiques sont par contre assez rares.

A partir des réponses fournies par des adultes à une épreuve de jugement de similarité de six consonnes de l'anglais, Greenberg et Jenkins (1964) ont tout de même montré que la différence entre deux consonnes est systématiquement estimée comme moindre si elles diffèrent par un trait phonétique plutôt que par deux traits. De même, Bailey et Hahn (2005) ont comparé différents prédicteurs des jugements de similarité de phonèmes. Ils concluent que la meilleure façon de rendre compte de tels jugements est de se baser sur le nombre de traits articulatoires qui différencient les consonnes : traits de lieu, de mode d'articulation et de voisement. Ils ont aussi montré la pertinence d'une mesure de similarité phonologique passant par les traits dans une autre étude (Hahn & Bailey, 2005). Il s'agissait d'effectuer un choix forcé entre deux stimuli pour apparier l'un d'eux à une cible monosyllabique en fonction de la ressemblance au niveau des sons. Les performances montrent que la similarité estimée par les auditeurs est particulièrement bien évaluée par la prise en compte du nombre de traits en commun pour des phonèmes localisés au même endroit dans les stimuli. Le nombre de traits partagés a un impact encore plus fort au niveau des cudas qu'à celui des attaques de syllabes. Le rôle du nombre de traits de lieu, de mode et de voisement partagés par les stimuli semble donc attesté, mais les auteurs n'ont pas avancé l'analyse

plus loin, en examinant par exemple le poids des ressemblances selon l'appartenance des traits partagés à l'une ou l'autre de ces grandes classes.

Un dernier principe d'expérience semble pouvoir être rangé parmi les épreuves métaphonologiques. Le participant est invité à juger à quel point des non-mots ressemblent à des mots. Ici encore, une mesure de la similarité basée sur la distance phonémique est moins efficace pour rendre compte des réponses qu'une mesure basée sur la similarité entre les caractéristiques des phonèmes (Bailey & Hahn, 2001).

2.6. Rôle des traits phonologiques en lecture

2.6.1. Variété des unités phonologiques évoquées pour la lecture

Plusieurs unités phonologiques ont été envisagées pour l'étude du traitement de l'écrit.

Ainsi, des travaux montrent que les lecteurs activent l'information syllabique dans le processus de reconnaissance de mots écrits en anglais ou en français (Ashby, 2010 ; Ashby & Martin, 2008 ; Carreiras, Ferrand, Grainger & Perea, 2005 ; Chetail & Mathey, 2009 ; Colé, Magnan & Grainger, 1999 ; Colé & Sprenger-Charolles, 1999 ; Ferrand & New, 2003 ; Ferrand, Segui & Grainger, 1996 ; Spoehr, 1978 ; Spoehr & Smith, 1975). Un effet négatif de la forte fréquence de la première syllabe du mot sur les performances en décision lexicale a été décrit en français et dans d'autres langues (en espagnol, Alvarez, Carreiras & Taft, 2001 ; Conrad, Carreiras, Tamm & Jacobs, 2009 ; en allemand, Conrad & Jacobs, 2004 ; Hutzler, Conrad & Jacobs, 2005 ; en français, Mathey & Zagar, 2002). Signalons tout de même que les résultats de certaines recherches permettent de douter du caractère systématique de l'amorçage syllabique en lecture (Brand, Rey, & Peereman, 2003), ou du découpage syllabiques dans les épreuves de conjonctions illusoires (Doignon & Zagar, 2005). Dans une version modifiée du modèle de l'Activation Interactive de McClelland et Rumelhart (1981), Mathey, Zagar, Doignon et Seigneuric (2006) ont proposé de rendre compte des effets syllabiques en lecture en incluant dans le modèle un niveau phonologique basé sur les syllabes, entre les unités lettres et les unités lexicales. Les effets syllabiques en lecture pourraient dépendre de la langue maternelle du lecteur (Bedoin & Dissard, 2002 ; Cutler, Mehler, Norris & Segui, 1986 ; Cutler, Mehler, Norris & Segui, 1992) ou encore des rapports de sonorité entre les phonèmes situés aux frontières de syllabes : ils seraient en cela dépendants de caractéristiques infra-phonémiques (Fabre & Bedoin, 2003).

Les attaques et les rimes ont aussi été envisagées comme des unités phonologiques extraites lors des premières étapes du traitement du mot écrit (Bowey, 1990 ; Fowler, 1987 ; Fowler, Treiman & Gross, 1993 ; Hillinger, 1980 ; Seymour & Duncan, 1997 ; Treiman, Goswami & Bruck, 1990). L'effet de rime varierait lui aussi selon la transparence des règles graphème-phonèmes de la langue (Geudens & Sandra, 1999) et selon les caractéristiques infra-phonémiques (sonorité) des segments impliqués (Gross, Treiman & Inman, 2000).

Le phonème pourrait aussi être une unité phonologique fondamentale en lecture (Rey, Jacobs, Schmidt-Weigand & Ziegler, 1998), avec ici encore des variations selon les langues (Sprenger-Charolles, 2003) ; l'importance de la notion de règles de correspondance graphème-phonème dans les modèles de lecture témoigne de la place centrale de cette unité dans les recherches sur la phonologie en lecture. Selon certaines propositions théoriques, comme le modèle bimodal de l'activation interactive de Ferrand et Grainger (1992) (adapté du modèle de McClelland & Rumelhart, 1981), les unités orthographiques infra-lexicales, activées par le stimulus écrit, activeraient à leur tour les unités mots et

des unités phonologiques infra-lexicales, décrites comme des syllabes ou des phonèmes (Ferrand, 1995) eux-mêmes connectés aux unités-mots.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons pour notre part à l'intervention en lecture d'unités encore plus petites, les traits phonologiques. Il existe encore peu de travaux à ce sujet. Un premier ensemble d'expériences a été réalisé en français à la fin des années 90', par Nathalie Bedoin, et nous avons pris part à ces recherches dès 2002-2003 avec des expériences que nous résumerons ici (partie 2.6.2.), mais qui sont antérieures aux travaux réalisés pour cette thèse. Dès lors, il est apparu que le rôle des traits phonologiques en lecture était nuancé par la catégorie des traits impliqués. En langue anglaise, Lukatela et ses collègues ont publié quant à eux deux articles, en 2001 et 2004, confirmant l'intervention d'un niveau de traitement infra-phonémique en lecture. En néerlandais, Ernestus et Mak (2004) ont précisé que les auditeurs et les lecteurs s'appuient sur les traits phonologiques qui présentent une forte stabilité, ce qui conforte la pertinence de la répartition des traits en catégories de mode, de lieu et de voisement. Enfin, tout récemment, Ashby, Sanders et Kingston (2009) ont étudié l'activation de l'information sur le voisement dans une tâche de lecture avec la technique des potentiels évoqués. Nous résumerons ces travaux, avant de présenter notre proposition d'un modèle de lecture impliquant deux mécanismes de traitement infra-phonémique (partie 3.1.). Nous expliquerons ensuite comment ce modèle a été mis à l'épreuve dans des expériences auxquelles nous avons participé avant cette thèse (partie 3.2.). Une synthèse des travaux permettant de traiter du statut cognitif des catégories de traits et de leur hiérarchie (partie 4), complétée par une synthèse sur les troubles phonologiques des enfants dyslexiques viendront clore notre partie théorique et introduiront le travail expérimental de cette thèse.

2.6.2. Activation des traits phonologiques en lecture : arguments expérimentaux

2.6.2.1. Expériences en français

Le codage phonologique prenant part au processus de reconnaissance de mot écrit n'est peut-être pas exhaustif, mais cela ne signifie pas qu'il soit nécessairement approximatif, superficiel et imprécis. Cette idée a fait naître l'hypothèse d'un code phonologique qui, tel qu'il est activé en lecture, serait suffisamment fin pour être décrit en terme de traits phonologiques. Cette hypothèse a tout d'abord été testée chez des lecteurs du français, à propos du voisement.

Une série de 3 expériences d'amorçage a été conduite chez des lecteurs experts adultes (Bedoin, 1998a). Elles consistaient à présenter un point de fixation central, puis une amorce écrite en lettres minuscules, suivie d'un masque visuel, finalement remplacé par une cible écrite en majuscules. L'amorce et la cible, tous deux monosyllabiques, rimaient et leur rime s'orthographiait de la même façon. Amorce et cible ne différaient que par l'attaque, qui était toujours une consonne unique. L'amorce et la cible différaient donc par une lettre, du point de vue orthographique, et par un phonème du point de vue phonologique. Deux listes présentées à des participants différents permettaient de proposer la même cible associée à deux amorces différentes. Chaque participant traitait ainsi les deux conditions expérimentales, mais sur des couples différents et complémentaires entre les listes, pour éviter qu'un même participant traite deux fois le même mot. Dans la condition avec ressemblance de voisement, les consonnes initiales de l'amorce et de la cible présentaient seulement une différence phonologique dite « de base », qui pouvait porter sur le lieu d'articulation (1/3 des couples), le mode d'articulation (1/3) ou le lieu et le mode d'articulation

(1/3). Dans la condition avec différence de voisement, amorce et cible présentaient en plus une différence de voisement. Par exemple, le couple cage – PAGE (qui diffère à la base par le lieu d'articulation) illustre la condition avec ressemblance de voisement ; il est opposé au couple gage – PAGE dans lequel une différence de voisement s'ajoute. Les mots cibles commençaient par une consonne sonore ou sourde, occlusive ou fricative, dont le lieu était labial, dental ou vélo-palatal. La densité du voisinage orthographique était équilibrée entre les deux conditions. De plus, dans la condition avec ressemblance de voisement comme dans la condition avec différence de voisement, 50% des couples contenaient un mot amorce dont la fréquence lexicale orthographique était plus élevée que celle de la cible et il y avait un rapport de fréquence lexicale inverse pour l'autre moitié des couples ; la même contrainte était respectée dans la condition avec différence de voisement. Les couples de stimuli expérimentaux étaient mêlés à des couples distracteurs et ne constituaient que 10% de la liste. Les amorces et cibles des couples distracteurs ne présentaient aucun lien particulier. Cinquante pourcent des couples de la liste contenaient un mot cible, les autres couples contenaient un pseudo-mot cible. Le lecteur était informé de la présence de l'amorce, mais devait seulement effectuer silencieusement une décision lexicale sur la cible. Le SOA (Stimuli Onset Asynchrony) variait entre les expériences. L'Expérience 1 ($N = 48$) proposait un SOA de 100 ms (amorce = 50 ms, masque = 50 ms), l'Expérience 2 ($N = 24$) un SOA de 66 ms (amorce = 33 ms, masque = 33 ms), l'Expérience 3 ($N = 24$) un SOA de 33 ms (amorce = 33 ms, pas de masque).

L'analyse des données a montré un retard significatif des réponses pour les couples présentant une ressemblance de voisement par rapport aux couples présentant une différence de voisement (voir Table 1), dans l'Expérience 1, $F_1(1,46) = 13.17, p = .0007$; $F_2(1,10) = 5.99, p = .028$, dans l'Expérience 2, $F_1(1,22) = 7.505, p = .012$; $F_2(1,10) = 5.98, p = .028$, et dans l'Expérience 3, $F_1(1,22) = 13.72, p = .0012$; $F_2(1,10) = 2.50, p = .14$. Ces effets ne sont pas modulés par le rapport de fréquence lexicale entre l'amorce et la cible, ce qui ne va pas dans le sens d'un effet de niveau lexical. Les pourcentages d'erreurs sont également plus élevés dans la condition avec partage du voisement, et ceci même dans la seule condition où l'effet de ressemblance de voisement n'a pas d'effet sur les latences (Expérience 2, condition avec différence de base sur le lieu).

Table 1 : Temps de réponse moyen (ms), erreur standard (entre parenthèses), et pourcentage d'erreurs (en italique) en fonction de la condition de différence ou de partage du voisement par les consonnes initiales de l'amorce et de la cible, selon la différence de base entre ces initiales, dans les Expériences 1, 2 et 3 (Bedoin, 1998a).

Difference phonologique de base	Différence de voisement	Partage du voisement
Lieu d'articulation Mode d'articulation Lieu et mode d'articulation	Expérience 1 (100 ms-SOA) 582.56 (12.51) 2.08	626.76 (16.51) 4.17 629.63
	587.65 (12.07) 3.13	(16.59) 6.25 659.34 (20.87)
	605.99 (13.19) 3.13	5.21
Lieu d'articulation Mode d'articulation Lieu et mode d'articulation	Expérience 2 (66 ms-SOA) 633.77 (28.31) 4.17	631.85 (31.35) 6.25 655.83
	609.77 (32.33) 2.08	(33.87) 6.25 726.94 (41.59)
	620.52 (25.26) 2.08	4.17
Lieu d'articulation Mode d'articulation Lieu et mode d'articulation	Expérience 3 (33 ms-SOA) 566.15 (19.75) 2.08	596.58 (23.08) 4.17 609.02
	582.98 (25.32) 4.17	(25.64) 2.08 639.50 (25.53)
	571.46 (19.15) 2.08	12.5

L'effet négatif du partage de trait de voisement entre l'amorce et la cible a été ensuite confirmé avec deux expériences présentant des pseudo-mots en amorce, ce qui procure un argument supplémentaire pour la nature pré-lexicale du code phonologique impliqué. Cet effet a été répliqué avec un pseudo-mot amorce associé à un SOA de 33 ms dans l'Expérience 4, $F_1(1,26) = 5.09, p = .03; F_2(1,13) = 3.92, p = .06$. Il a aussi été rapporté à l'issue de l'Expérience 5 ($N = 36$), avec un SOA de 66 ms (Bedoin, 1998a). Le principe de cette dernière expérience était très proche de celui de l'Expérience 4, mais il n'y avait que deux types de différence phonétique de base (différence de lieu ou différence de mode d'articulation). De plus, cette fois, une condition contrôle était proposée. Il était délicat de choisir une telle condition, et elle était ici remplie par une amorce qui ne partageait aucune lettre et aucun phonème avec la cible. Les données moyennes sont présentées dans la Table 2, qui révèle des temps intermédiaires pour la condition contrôle, des réponses plus rapides pour la condition avec différence de voisement et des réponses plus lentes pour la condition avec partage du voisement. Le retard en condition de partage de voisement par rapport à la condition de différence de voisement est significatif, comme dans les expériences présentant un mot en amorce, $F_1(1,66) = 7.40, p = .008; F_2(2,34) = 1.81, p = .19$.

Table 2 : Temps de réponse moyen (ms), erreur standard (entre parenthèses) et pourcentages d'erreurs (en italique) dans l'Expérience 5.

Condition contrôle	Différence de voisement	Partage du voisement
586.30 (19.02) 2.32	561.51 (11.57) 4.17	611.77 (11.75) 4.63

Enfin, cette première série d'expériences est complétée par une épreuve de décision lexicale (Expérience 6, $N = 36$) manipulant la ressemblance phonologique entre les consonnes initiales des deux syllabes de l'amorce et des deux syllabes de la cible (e.g., zévit-DÉBUT vs. séfut-DÉBUT). L'amorce était toujours un pseudo-mot et un SOA de 33 ms était proposé. Amorce et cible présentaient une différence de base sur le lieu ou sur le mode d'articulation. Cette fois, des couples de stimuli expérimentaux où la cible était un pseudo-mot s'ajoutaient aux couples dont la cible était un mot, ce qui permettait de tester l'effet sur des réponses non seulement positives mais aussi négatives en décision lexicale. Ici encore, un ralentissement des réponses a été observé en cas de ressemblance de voisement, et ceci quel que soit l'autre trait phonétique différent à la base entre l'amorce et la cible (lieu, mode ou les deux), $F_1(1,34) = 8.03, p = .007; F_2(1,22) = 8.27, p = .009$ (Bedoin, 1998b).

L'effet de partage de trait de voisement en lecture se produit donc même si les deux stimuli se ressemblent peu dans l'ensemble.

Table 3 : Temps de réponse moyens (ms), erreur standard (entre parenthèses) et pourcentages d'erreurs (en italique) en fonction de la lexicalité de la cible (mot ou pseudo-mot) et de la condition de ressemblance de voisement dans l'Expérience 6.

Mot cible		Pseudo-mot cible	
Différence de voisement	Partage du voisement	Différence de voisement	Partage du voisement
622.19 (13.57) 8.80	656.67 (13.96) 6.48	662.39 (15.95) 4.17	680.06 (21.31) 2.78

En montrant un effet plutôt régulier du partage du trait de voisement entre deux stimuli verbaux lus successivement de manière rapide, ce premier ensemble de six expériences suggère l'implication de connaissances sur des traits phonologiques dans les étapes précoce du processus de reconnaissance de mot écrit en français.

Pour compléter, des expériences du même type ont ensuite été conduites en manipulant la ressemblance infra-phonémique pour d'autres catégories de traits phonologiques. Des effets d'amorçage basés sur la ressemblance de lieu ou de mode entre des stimuli écrits ont ainsi été observés (Chavand, 1998 ; Chavand & Bedoin, 1998). Ils sont apparus comme globalement moins stables : alors que les effets de partage du voisement ne sont pas modulés par le temps de traitement ni par la différence phonétique de base (différence de lieu et/ou mode), les effets de partage du lieu et du mode varient selon le SOA et le contexte phonologique. Les résultats de ces expériences sont présentés de manière détaillée dans un chapitre d'ouvrage (Bedoin & Krifi, 2009). Les expériences décrites sous les noms 1a, 1b et 1c proposaient des couples pseudo-mot amorce - cible présentés avec un SOA de 33 ms, 66 ms et 100 ms, respectivement. Amorce et cibles rimaient et ne différaient que par leur consonne initiale. Ces consonnes présentaient une ressemblance de base parce qu'elles partageaient toujours le voisement. Les Expériences décrites sous les noms 2a, 2b et 2c proposaient aussi des pseudo-mots amorces avec les trois SOA, mais cette fois amorce et cible présentaient toujours une différence de base quant au voisement.

Les Expériences 1a, 1b et 1c ($N = 81$, chaque groupe de 27 participants ne réalisant qu'une version de l'épreuve) proposaient ainsi les trois conditions expérimentales suivantes :

- Condition **VM** : amorce et cible partagent le voisement et le mode ; elles diffèrent par le **Lieu** (e.g., BAME-dame; /bam/-/dam/);
- Condition **VL** : amorce et cible partagent le voisement et le lieu ; elles diffèrent par le **Mode** (e.g., ZAME-dame; /zam/-/dam/);
- Condition **V** : amorce et cible partagent le voisement ; elles diffèrent par le **Lieu et le Mode** (e.g., VAME-dame; /vam/-/dam/).

Les Expériences 2a, 2b et 2c ($N = 81$, chaque groupe de 27 participants ne réalisant qu'une version de l'épreuve) proposaient les trois conditions expérimentales suivantes :

- Condition **LM** : amorce et cible partagent le lieu et le mode ; elles diffèrent par le **Voisement** (e.g. FAGUE-vague; /fag/-/vag/);
- Condition **M** : amorce et cible partagent le mode ; elles diffèrent par le **Voisement et le Lieu** (e.g. SAGUE-vague; /sag/-/vag/);
- Condition **L** : amorce et cible partagent le lieu ; elles diffèrent par le **Voisement et le Mode** (e.g. PAGUE-vague; /pag/-/vag/).

Comme les effets produits par le partage de voisement, les effets de partage de lieu ou de mode qui atteignent le seuil de significativité se sont traduits par une détérioration des performances pour les SOAs de 66 et 100 ms.

Ainsi, dans l'Expérience 1b (SOA = 66 ms), il y avait plus d'erreurs en condition VM qu'en condition V, ce qui témoigne d'un effet négatif du partage du mode, $F(1,48) = 7.31$, $p = .010$, confirmé par l'augmentation des temps de réponse, $F(1,48) = 6.80$, $p = .012$. Il y avait aussi plus d'erreurs en condition VL qu'en condition V, ce qui témoigne d'un effet négatif du partage du lieu, $F(1,48) = 5.08$, $p = .029$. Dans l'Expérience 2b (SOA = 66 ms), il n'y avait pas d'effet sur les erreurs, mais les temps de réponse étaient plus longs en condition LM qu'en condition M, répliquant l'effet négatif du partage du lieu. Le SOA de 66 ms s'accompagne donc d'un effet négatif du partage du lieu et, dans une moindre mesure, un effet négatif du partage du mode.

Les effets étaient faibles avec le SOA de 100 ms, mais les erreurs tendaient à être moins nombreuses en condition V qu'en conditions VL et VM (Expérience 1c), traduisant un certain maintien de l'effet négatif du partage du lieu et du mode pour un délai de traitement long. Dans l'Expérience 2c, les temps de réponse étaient significativement plus longs en condition LM qu'en condition M, $F(1, 48) = 4.82$, $p = .030$, ce qui confirme l'effet négatif du partage du lieu avec le SOA de 100 ms. Avec ces SOAs relativement longs, les effets significatifs vont donc tous dans le sens d'une altération des performances avec le partage de traits phonologiques, en particulier pour le lieu d'articulation. Dans l'ensemble, avec des SOA de 66 ou 100 ms, les effets de partage de lieu ou de mode sont donc à l'image de l'effet négatif du partage du voisement observé dans les expériences antérieures.

Les résultats obtenus avec un SOA de 33 ms sont plus surprenants. Avec ce SOA très court, une amélioration (et non une baisse) des performances en décision lexicale est observée en cas de similarité infra-phonémique. Ainsi, dans l'Expérience 1a, les temps de réponse sont plus rapides lorsque le partage de mode ou de lieu s'ajoute au partage du voisement (VM ou VL, par rapport à V), respectivement $F(1,48) = 5.42$, $p = .024$, et $F(1,48) = 4.93$, $p = .031$. De même, dans l'Expérience 2a, les réponses tendent fortement à une plus grande rapidité en cas de partage du mode (condition LM par rapport à la condition L), $F(1,48) = 4.00$, $p = .051$ pour les mots, et $F(1,48) = 5.04$, $p = .029$ pour les pseudo-mots. Avec ce délai très court, le partage du mode joue d'ailleurs un effet, positif, plus net que le partage du lieu, avec des réponses plus rapides pour les mots en condition M qu'en condition L, $F(1,48) = 5.05$, $p = .028$.

Table 4 : Résumé des effets de partage des traits de mode et de lieu d'articulation par les amores et les cibles écrites, d'après les six premières Expériences (Bedoin, 1998a) et les Expériences 1a, 2a, 1b, 2b, 1c, 2c (Chavand & Bedoin, 1998). Les signes + et - représentent respectivement les effets positifs et négatifs de l'amorçage, d'après Bedoin et Krifi (2009).

Trait phonologique partagé	SOA		
	33 ms	66 ms	100 ms
Mode	++	--	
Lieu	+	--	-
Voisement	--	--	--

Une synthèse des effets est proposée dans la Table 4. Dans l'ensemble, les résultats de ces deux séries d'expériences sur l'amorçage par partage du lieu et du mode montrent que la ressemblance pour ces deux types de traits altère les performances sur la cible,

à l'image de ce que produit le partage du voisement, pour des SOAs de 66 à 100 ms. Cet effet négatif se prolonge cependant plus longuement pour le lieu que pour le mode. Par contre, le partage du mode et dans une moindre mesure le partage du lieu produisent un effet d'amorçage positif s'il s'agit des 33 premières millisecondes de traitement d'un mot écrit. Par cet amorçage facilitateur, les effets de partage de voisement en lecture se démarquent clairement de l'effet du partage des traits de lieu et de mode. Ces premiers travaux réalisés en lecture du français nous ont incitée à approfondir l'hypothèse d'un rôle des traits phonologiques en lecture. L'effet des traits en lecture semble complexe, à la fois parce qu'il varie selon le type de trait et parce qu'il se manifeste d'une manière non-linéaire selon l'étape de traitement étudiée.

2.6.2.2. Expériences en anglais et en néerlandais

En 2001, Lukatela et ses collaborateurs ont publié un article dans lequel ils montrent eux aussi un effet de partage de traits phonologiques dans des expériences d'amorçage en lecture, mais cette fois en anglais. Comme dans les expériences en français, l'amorce et la cible écrites riment, et la ressemblance infra-phonémique est manipulée entre la consonne initiale de l'amorce et celle de la cible. Ils ont utilisé un SOA court (57 ms) et ont observé un effet d'amorçage facilitateur en cas de partage de traits entre le pseudo-mot amorce et la cible. Ils ont comparé une condition dans laquelle amorce et cible différaient seulement du point de vue du voisement et une condition de plus faible ressemblance où l'amorce et la cible différaient du point de vue du voisement et du mode, ou du point de vue du voisement et du lieu. Ces conditions expérimentales permettaient donc d'évaluer les effets de ressemblance de lieu et de mode. Aussi, leurs résultats peuvent-ils être rapprochés de ceux qui ont été obtenus en français dans les travaux de Chavand et Bedoin (1998), dans les expériences avec un SOA très court de 33 ms. Comme en français, Lukatela et ses collègues montrent que les lecteurs de l'anglais traitent plus facilement un mot écrit qui suit un mot à qui il ressemble pour le lieu ou le mode d'articulation, tout au moins lorsque la succession du traitement des deux mots est très rapide (apparemment en dessous de 66 ms). Par contre, ces auteurs n'ont pas testé l'effet du partage du voisement, et les données en français sont à cet égard précieuses, car elles montrent l'influence de ce trait en lecture. Lukatela et ses collègues concluent en considérant que l'effet de ressemblance infra-phonémique en lecture suggère une grande proximité entre le système de reconnaissance de mots écrits et les processus de perception et de production de la parole. Ils recommandent une réflexion permettant d'accorder une place aux traits phonologiques dans les modèles de reconnaissance de mot écrits.

Les travaux de Lukatela sur les composantes infra-phonémiques du processus de reconnaissance de mot écrit se sont ensuite orientés vers le rôle de traits dans des voyelles (Lukatela, Eaton, Sabadini & Turvey, 2004). Ils ont montré que, pour des mots comme *plead* et *pleat* dont la longueur de la voyelle diffère (sans que cette différence motive une différence phonémique), la décision lexicale est davantage facilitée par un amorçage par répétition (*identity priming*) pour le mot avec une voyelle plus longue. En lecture, l'activation des mots contenant une voyelle longue serait retardée, ce qui permettrait aux effets d'amorçage d'être plus efficaces. Il s'agit d'une autre façon de montrer que le code phonologique impliqué dans les étapes précoces du processus de reconnaissance de mot en lecture est suffisamment fin pour contenir des détails infra-phonémiques.

Ernestus et Mak (2004) ont étudié d'une manière encore différente la sensibilité des lecteurs, comme des auditeurs, aux traits phonologiques. Ils ont montré qu'en lecture, comme en perception de la parole, on s'appuie davantage sur les traits les plus stables, ceux

qui constituent les indices les plus pertinents. En anglais, par exemple, le lieu d'articulation est considéré comme moins stable que le voisement, car le lieu est plus souvent l'objet de phénomènes d'assimilation. Les auteurs ont étudié l'effet de la stabilité des traits de la consonne initiale d'un mot, sur leur influence en lecture du néerlandais. Dans cette langue, pour les mots commençant par une fricative, le voisement est moins stable que le mode et le lieu (les fricatives sonores sont souvent réalisées comme des sourdes à l'initiale de mots dans cette langue). Le trait sonore est quant à lui peu stable dans les consonnes occlusives finales. Dans une épreuve de lecture *self-paced*, ils ont montré des variations de temps de lecture pour des mots incorrectement écrits, selon le type de trait incorrect. Comme dans les expériences de perception de parole, le voisement semble moins pertinent que le mode en lecture. Un mot incorrect du point de vue du mode est lu plus lentement qu'un mot incorrect du point de vue du voisement, et l'ajout d'une erreur de voisement à une erreur de mode n'accroît pas le retard du lecteur. Les données montrent aussi que les lecteurs néerlandais s'appuient davantage sur le lieu que sur le voisement pour les fricatives initiales. Les auteurs concluent que la pertinence des traits pour le traitement de mots écrits dépend de la stabilité phonologique de ce trait, ce qui apporte un nouvel argument pour l'implication d'un niveau infra-phonémique en lecture.

Pour finir, deux expériences d'amorçage ont tout récemment été conduites avec la technique des potentiels évoqués pour étudier le décours temporel des traitements infra-phonémiques en lecture (Ashby, Sanders & Kingston, 2009). Les participants anglophones lisaien des mots cibles dont la consonne finale était voisée ou non, la cible étant précédée d'une amorce cohérente ou non avec la cible pour le voisement (e.g., *fad – fat*) et pour la durée de la voyelle (e.g., *fap – faz*). Le masque entre l'amorce et la cible pouvait être bref (22 ms) ou long (100 ms). Les données montrent que l'amplitude des potentiels cérébraux varie dès 80 ms selon la cohérence entre les traits phonologiques de l'amorce et de la cible. La précocité de cet effet vient s'ajouter aux arguments favorables à une participation précoce des connaissances sur les traits phonologiques au processus d'identification de mot écrit.

3. Deux mécanismes pour les traits phonologiques en lecture : proposition d'un modèle

En lecture, nous supposons que deux mécanismes basés sur des traits phonologiques participent au processus d'identification de mot. Ils permettraient de rendre compte de deux phénomènes. L'un des mécanismes pourrait expliquer, d'une part, la gêne observée pour le traitement du deuxième stimulus en cas de succession de stimuli écrits partageant des traits phonologiques. D'autre part, un second mécanisme pourrait rendre compte de la facilitation observée parfois, en cas de SOA très bref, en condition de forte ressemblance infra-phonémique.

Pour ce qui est de la perception de la parole, le modèle TRACE et celui de la cohorte accordent un rôle aux traits phonologiques dans l'accès lexical en perception de la parole. Marslen-Wilson, Moss et Van Halen (1996) insistent cependant sur une différence quant à leur moyen d'action selon l'une et l'autre approche.

Selon le modèle TRACE (McClelland & Rumelhart, 1981), chaque nœud-mot est connecté à des nœuds au niveau des phonèmes, qui sont eux-mêmes connectés à des nœuds-traits. Il n'y aurait pas de relation inhibitrice ascendante, si bien qu'une information

sur des traits qui ne concorderait pas avec le mot n'aurait pas d'effet direct sur le niveau d'activation de ce dernier. Si [k] est entendu à la fin de [strik], cela n'aura pas d'action négative directe sur le niveau d'activation du mot *street*. L'absence de concordance sera perçue grâce à un processus indirect, au moyen des connexions d'inhibition latérale établies entre des unités lexicales candidates activées à cause du trait incorrect et exerçant alors une concurrence avec le bon candidat lexical.

Le modèle de la cohorte (Marslen-Wilson, 1987) admet que le niveau d'activation d'une représentation lexicales est proportionnel à l'ampleur du recouvrement entre l'input et la représentation lexicales, et comme dans le modèle TRACE, ce recouvrement est mesuré par le nombre de traits phonologiques partagés. Toutefois, contrairement au modèle TRACE, le modèle de la cohorte repose sur des relations ascendantes et non sur des relations d'inhibition latérale. Une absence de concordance entre les traits de l'input et ceux d'une représentation lexicales entraînerait directement une action négative sur cette représentation lexicales.

Dans notre proposition, il s'agit de lecture et non de perception de la parole. Les deux mécanismes phonologiques que nous décrivons se rapprochent cependant, l'un de la notion de relation ascendante (il s'agira du mécanisme décrit comme le plus rapide), l'autre de la notion d'inhibition latérale (il s'agira d'un mécanisme légèrement plus tardif).

3.1. Une proposition de modèle

Dans notre modèle, nous nous intéressons à la lecture, mais nous supposons que les relations entre les connaissances sur les unités phonologiques peuvent jouer un rôle dans la reconnaissance des lettres du mot écrit. Nous ne nous intéressons pas ici au rôle des connaissances sur les mots, mais simplement à celles des phonèmes et des traits phonologiques. Nous ne nions pas l'effet potentiel des connaissances sur les mots, mais ne les étudions pas pour l'instant.

Dans le modèle que nous proposons, nous reprenons l'idée d'un rôle des traits dans les traitements phonologiques, idée commune aux deux modèles évoqués, et nous intéressons aux relations entre ces traits et les phonèmes. Nous proposons que les unités-lettres activent les unités-phonèmes, activant elles-mêmes les traits phonologiques, comme dans le modèle TRACE. Par exemple, la lettre « P » active le phonème /p/, qui lui-même active le trait sourd (Figure 4). Un trait pourrait alors renforcer les phonèmes avec lesquels il est compatible, par des relations ascendantes activatrices. Ces activations seraient à l'origine d'un renforcement du phonème correspondant effectivement à la lettre présentée, mais elles produiraient aussi l'activation d'autres phonèmes avec lesquels le trait activé est compatible, ce qui créerait un ensemble de compétiteurs pour le phonème à identifier (Figure 5). Ainsi, dans notre exemple, le trait sourd renforce le phonème /p/, mais également tous les phonèmes présentant le trait sourd, par exemple le phonème /t/, comme l'illustre la Figure 5.

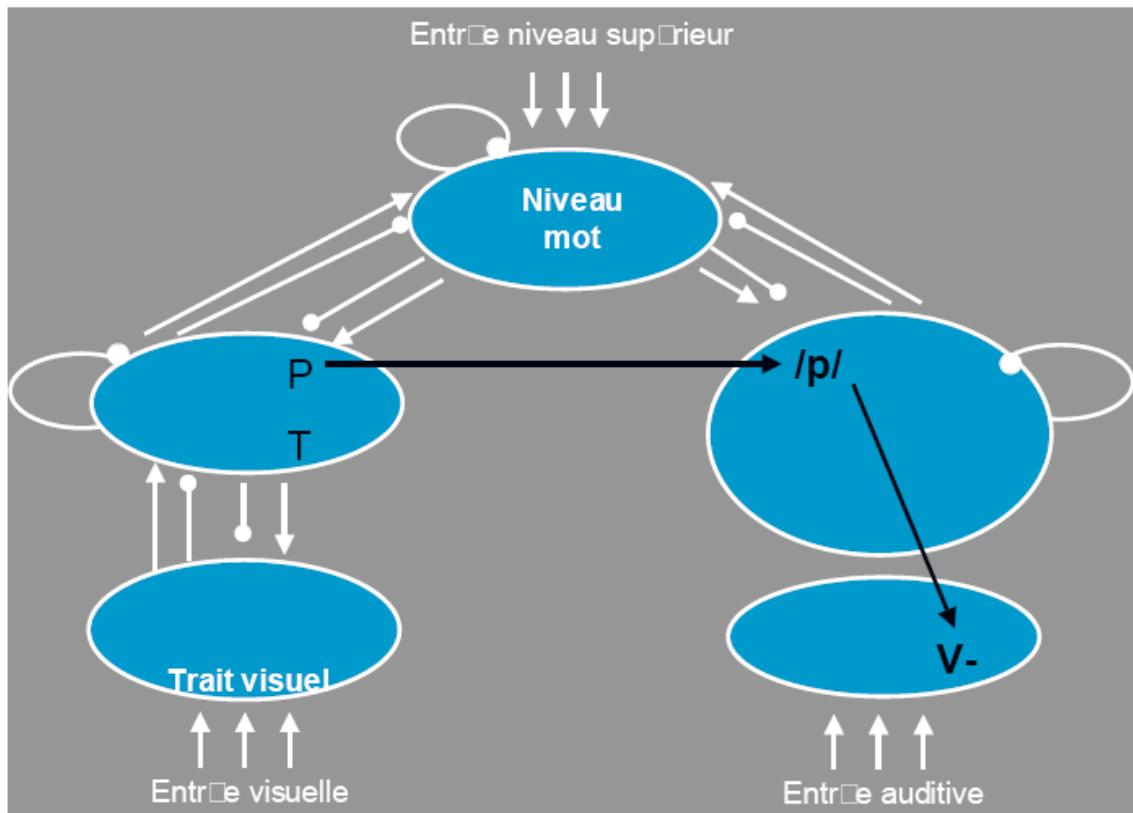


Figure 4 : Etape d'activation des unités-phonèmes et des traits phonologiques correspondants.

Les compétiteurs issus de ce mécanisme seraient suffisamment activés pour être particulièrement bien reconnus par la suite. Grâce à ce mécanisme, la lettre « T » dans notre exemple serait donc particulièrement activée si elle était présentée après la lettre « P ». Cela expliquerait que, dans les premières étapes de traitement d'un stimulus écrit (2), le partage de traits phonologiques avec un stimulus préalable (1) facilite l'identification du stimulus (2), effet observé en cas de partage de traits de mode ou de lieu d'articulation (Bedoin & Krifi, 2009 ; Chavand, 1998 ; Chavand & Bedoin, 1998 ; Lukatela et al., 2001). Il s'agirait en fait d'un biais initial, induisant une tendance à lire dans le deuxième stimulus une lettre partageant des traits phonologiques avec les stimuli traités précédemment. Comme tout biais, il pourrait bien sûr être à l'origine de certaines erreurs en lecture. Pour décrire ce mécanisme initial, nous évoquons seulement des relations activatrices entre les phonèmes et les traits (comme dans le modèle TRACE), sans évoquer de relations ascendantes inhibitrices comme le modèle de la cohorte les imagine entre les traits et les représentations lexicales.

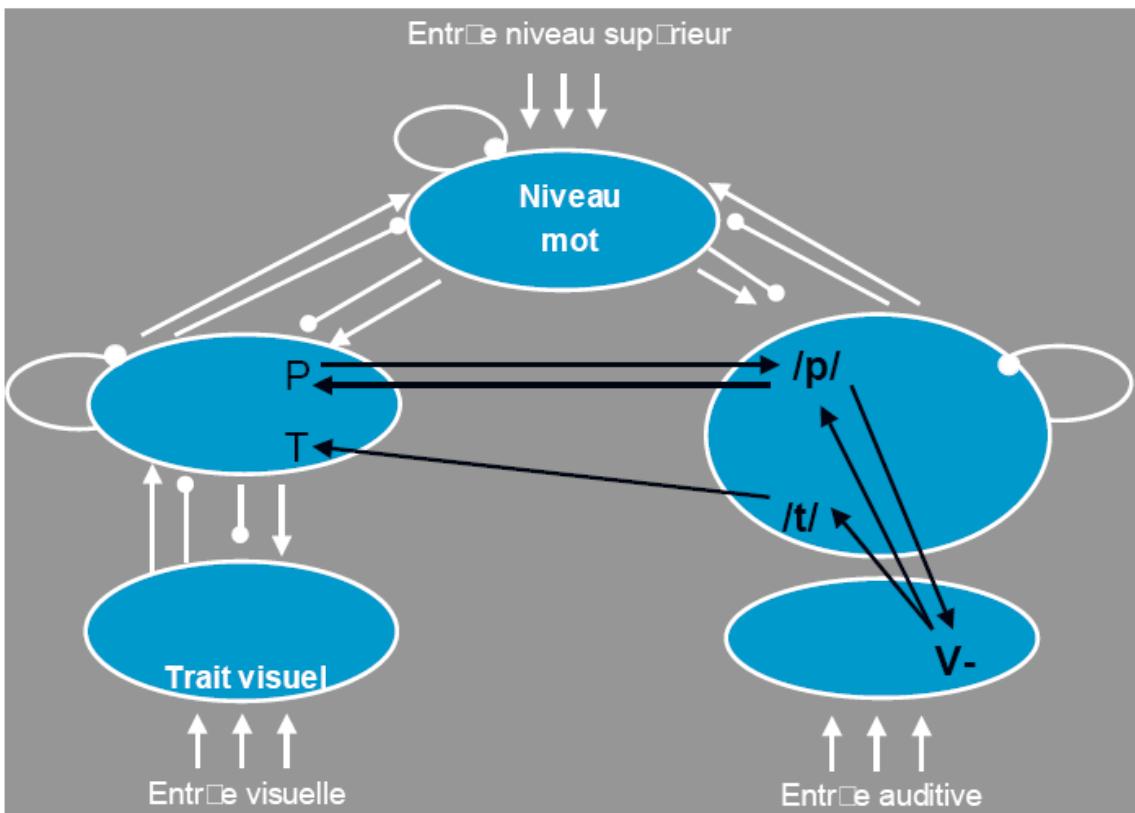


Figure 5 : Etape de renforcement des phonèmes compatibles par des relations ascendantes activatrices.

Par ailleurs, notre modèle propose, comme dans le modèle TRACE et à la différence du modèle de la cohorte, des relations d'inhibition latérale. Celles qui nous intéressent ne concernent cependant pas le niveau des représentations lexicales, mais celui des phonèmes. Nous ajoutons que ces relations d'inhibitions latérales auraient des poids différents selon la similitude des phonèmes en termes de traits phonologiques. Le partage de traits phonologiques par deux phonèmes se traduirait par une augmentation de la force des relations d'inhibition latérale entre les phonèmes qui les relient (Figure 6). Ainsi, pour reprendre notre exemple, à partir de la lettre P, le phonème /p/ activerait le trait sourd, lui-même susceptible de faire émerger des phonèmes concurrents (premier mécanisme). Grâce à la mise en jeu de relations d'inhibition latérale entre les phonèmes partageant de nombreux traits, ces candidats concurrents verrraient leur niveau d'activation baisser. Ce deuxième mécanisme contrebancerait le premier et, surtout, permettrait de contrer le biais initial qu'il produit. Au final, le mécanisme basé sur les inhibitions latérales pourrait donc éviter au lecteur des erreurs spontanément induites par le premier mécanisme phonologique. Dans notre

exemple, grâce aux relations d'inhibition latérale entre phonèmes, le biais vers une lecture de la lettre « T » dans un deuxième stimulus serait amoindri (croix en pointillé sur la Figure 6). Le mécanisme d'inhibition latérale entre les phonèmes est donc censé induire une détérioration du traitement de la deuxième lettre. Ce deuxième mécanisme permettrait de rendre compte de la détérioration des performances sur le stimulus présenté en deuxième position, lorsqu'il partage des traits phonologiques avec le précédent, et lorsqu'un délai suffisant sépare les deux stimuli, sans doute essentiellement à partir de 66 ms (Bedoin & Krifi, 2009 ; Lukatela et al., 2001).

Il se peut que le poids des inhibitions latérales soit influencé par le nombre de traits partagés, sans que cela se calcule de manière simplement additive. Le partage de certains types de traits pourrait avoir un poids plus ou moins important. Il se peut aussi que le partage de certains traits se traduise par la mise en jeu de relations d'inhibition latérale plus précoce que d'autres. La mise en jeu des relations d'inhibition peut être envisagée comme progressive, les inhibitions latérales motivées par le partage d'un certain type de trait s'animant avant les inhibitions latérales motivées par d'autres types de traits.

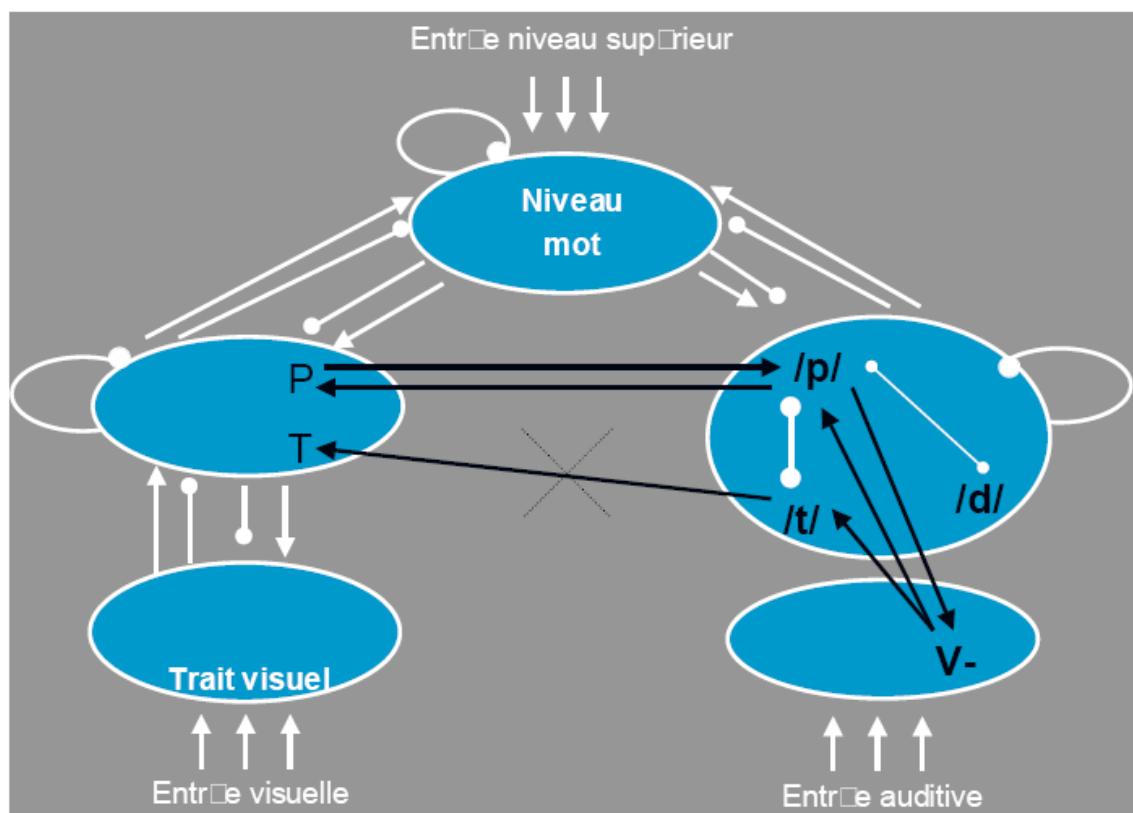


Figure 6 : Etape d'inhibitions latérales entre phonèmes se ressemblant en termes de traits phonologiques

Au-delà de ces nuances, qui sont relatives à notre intérêt pour les différents types de traits phonologiques et une éventuelle hiérarchie entre l'influence du lieu, du mode d'articulation et du voisement, nous reprenons, avec de deuxième mécanisme, une notion d'inhibition latérale tout à fait centrale dans le modèle TRACE, et que l'on retrouve aussi dans le modèle de lecture d'activation interactive entre les unités-mots et les unités-lettres (McClelland & Rumelhart, 1981).

Pour ce qui est de la production de la parole, certains modèles connexionnistes de production de la parole proposent que l'étape de codage phonologique repose sur des mécanismes d'inhibition. La sélection d'un nœud serait rapidement suivie d'une inhibition (*post-selection inhibition*) empêchant sa resélection immédiate. Aussi, quand deux mots phonologiquement similaires sont produits rapidement, le modèle suppose que le traitement du second est retardé, au moins lorsque les éléments infra-lexicaux en commun sont situés au même emplacement dans les deux mots. Dans notre modèle de lecture, nous proposons aussi ce type d'inhibition entre des phonèmes qui se ressemblent sans être identiques. Les expériences que nous avons décrites et dont nous cherchons à rendre compte, a posteriori, étaient elles aussi des situations où des phonèmes plus ou moins similaires étaient présentés dans des mots différents, mais à de mêmes emplacements dans ces mots. Nous verrons dans la partie 3.2. que notre modèle sert cependant aussi de base à des prédictions concernant des effets de similarité infra-phonémique entre deux lettres d'un même mot, dans des emplacements forcément distincts.

Le modèle de production de la parole proposé par Meyer et Gordon (1985) est très proche de notre proposition. Ces auteurs suivent la terminologie de McClelland et Rumelhart (1981) et décrivent un modèle d'activation interactive. La production de la parole reposerait sur un réseau dans lequel les phonèmes entretiennent des relations activatrices avec les traits, qui ont eux-mêmes ce type de relation avec des mécanismes de contrôle articulatoire. Une activation résiduelle pourrait passer du niveau des traits à celui des phonèmes, pour réactiver ces derniers de manière ascendante. De plus, il y aurait une relation d'inhibition latérale au sein d'une paire de phonèmes qui partagent des traits. Ce type de structure est compatible avec celui qui était déjà proposé par MacKay (1970) et Dell (1984) pour la production de parole, ou le modèle de reconnaissance de mot écrit de McClelland et Rumelhart (1981). Le rôle des relations d'inhibition latérale est de maintenir le niveau d'activation résiduelle en dessous du seuil pour les phonèmes qui ont reçu de l'activation à tort des traits phonétiques, et qui sans cela créeraient une concurrence. Le modèle de Meyer et Gordon (1985) prédit que la préparation à produire une réponse primaire induit une inhibition des phonèmes différents de ceux contenus dans cette réponse, mais phonologiquement similaires, ce qui se traduit par un retard dans la production d'une réponse secondaire contenant de tels phonèmes. Les résultats des trois expériences des auteurs sont conformes à cette hypothèse.

Ce mécanisme d'inhibitions latérales entre phonèmes, que nous proposons en lecture, n'est donc pas étranger à des idées développées pour l'étude d'autres types de traitements verbaux, et il permettrait d'éviter des confusions lors du traitement de l'écrit.

3.2. Test d'une prédition du modèle : amorcages proactif et rétroactif

Après avoir décrit les deux mécanismes phonologiques imaginés pour rendre compte des effets observés, nous nous sommes appuyés sur ce modèle pour faire différentes

prédictions. Nous mettons ainsi cette proposition de modèle à l'épreuve des performances des lecteurs.

Le mécanisme phonologique basé sur des relations d'inhibition latérale a été imaginé pour expliquer pourquoi la similarité phonologique entre deux stimuli successifs amoindrit les performances pour le traitement du deuxième stimulus. Le modèle peut permettre une prédition sur l'influence de la similarité phonologique sur le traitement du premier stimulus. Cela correspond aux situations expérimentales de backward masking. Dans de telles expériences, deux stimuli différents sont présentés en succession rapide au même endroit. Le participant est invité à rappeler le premier stimulus en le produisant à voix haute. Une telle tâche est difficile, car le traitement de la cible présentée en premier est interrompu par le second stimulus qui la masque. Ce masque produit donc un effet négatif. Toutefois, cet effet négatif est réduit lorsque cible et masque ont des lettres en commun, ou lorsqu'ils sont homophones (Frost & Yoge, 2001 ; Perfetti & Bell, 1991 ; Perfetti, Bell & Delaney, 1988 ; Tan & Perfetti, 1999). Sur la base des données de la littérature, notre prédition sera donc que le partage de traits phonologiques par la cible et le masque devrait permettre de lire la cible plus facilement. En se fondant sur notre proposition de modèle, nous pouvons décrire comment une telle facilitation se produirait. En cas de partage de traits phonologiques par la cible et le masque, le mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale devrait entraver le traitement du second stimulus. Mal identifié, celui-ci constituerait un masque peu performant, qui entraverait alors assez peu le traitement de la cible qui le précède. C'est pourquoi il était possible de prédire que le partage du trait de voisement par deux stimuli se succédant rapidement (SOA = 33 ms) devait produire une réduction des performances dans une épreuve de décision lexicale sur le second stimulus en situation d'amorçage, mais une amélioration des performances pour le rappel du premier en situation de backward masking. Cette hypothèse a été vérifiée dans deux expériences utilisant la même liste de couples de stimuli dont les consonnes partageaient ou non le voisement, l'une avec une tâche de rappel du premier stimulus, l'autre avec une tâche de décision lexicale sur le second stimulus (Bedoin & Chavand, 2000). Les stimuli étaient disyllabiques et se différenciaient l'un de l'autre par leurs deux consonnes, celles-ci partageant en outre le même trait de voisement ou pas (e.g., TYPE – zye pour la condition avec différence de voisement ; TYPE – syfe pour la condition avec partage du voisement ; dans cet exemple, la cible TYPE était présentée en premier pour l'expérience de backward masking et en second pour l'expérience d'amorçage). Les résultats allaient dans le sens de l'hypothèse, avec de meilleures performances en cas de ressemblance de voisement dans l'épreuve d'amorçage, $F_1(1, 34) = 8.03, p = .007$; $F_2(1, 22) = 8.27, p = .009$, mais davantage d'erreurs en cas de ressemblance de voisement dans l'épreuve de backward masking, $F_1(1, 34) = 8.87, p = .013$; $F_2(1, 22) = 8.27, p = .025$ (Bedoin & Chavand, 2000). Ces données apportent donc des arguments à l'implication de connaissances infra-phonémiques en lecture, à l'extraction rapide du voisement et à la mise en jeu rapide d'un mécanisme phonologique basé sur des inhibitions latérales modulées par le partage de traits.

L'apparition de ces phénomènes d'amorçage et de masquage entre deux stimuli successifs a enfin été vérifiée entre les deux consonnes d'un même stimulus écrit (pseudo-mot de structure CVCV). La tâche est alors d'identifier l'une des deux consonnes. Conformément aux effets observés dans les expériences de masquage et d'amorçage impliquant deux stimuli successifs, Krifi, Bedoin et Mérigot (2003) ont montré que la ressemblance de voisement facilite le traitement de la première consonne (effet conforme à celui observé dans les situations de masquage) alors même qu'elle perturbe le traitement de la deuxième (effet conforme à celui observé dans les situations d'amorçage). Cette

situation expérimentale un peu plus écologique (les stimuli ne sont pas successifs mais présentés simultanément) confirme la sensibilité des lecteurs aux traits phonétiques, et plus particulièrement à celui de voisement.

Des effets d'amorçage et de masquage basés sur le partage de traits phonologiques par les consonnes d'un même stimulus ont également été testés chez des apprentis-lecteurs de CE1 et CE2 (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003), ainsi que chez des enfants dyslexiques (Krifi, Bedoin & Herbillon, 2003). Les effets sont résumés dans la Figure 7.

Les plus jeunes lecteurs (en CE1) sont déjà sensibles au partage de voisement par les deux consonnes, mais cela se traduit par une amélioration des performances (du point de vue de l'exactitude comme de la rapidité) pour l'identification de la deuxième consonne. Cet effet peut s'expliquer par la mise en jeu du premier mécanisme phonologique, basé sur les relations activatrices entre phonèmes et traits phonologiques. Ces jeunes lecteurs ne semblent pas encore disposer d'une organisation des phonèmes par des relations d'inhibition latérales, ou l'engagement d'un mécanisme basé sur cette structure leur demande peut-être trop de temps pour entrer en jeu dans cette expérience où le stimulus n'est présenté que 85 ms.

Dès le CE2, les effets s'inversent. Le partage de voisement réduit les performances pour le traitement de la seconde consonne, que ce soit pour la vitesse ou pour l'exactitude. Cet effet suggère l'implication du deuxième mécanisme phonologique, impliquant des inhibitions latérales. Les pourcentages d'erreurs nous apprennent aussi que le partage du voisement permet de mieux identifier la première consonne, effet également prédit par ce mécanisme. En CM2, l'analyse des temps de réponse confirme que le partage du voisement gêne le traitement de la seconde consonne, tout en aidant celui de la première. C'est d'ailleurs essentiellement ce dernier effet qui est confirmé dans chez les adultes.

L'ensemble de ces données, sur des épreuves impliquant le traitement de deux stimuli présentés successivement, ou le traitement des deux consonnes d'un pseudo-mot écrit, est donc conforme aux prédictions de notre proposition de modèle. Celui-ci semble donc se maintenir, à l'épreuve de ces premiers faits. Les données chez les enfants suggèrent en outre que les deux mécanismes phonologiques proposés mettent du temps à s'établir au cours du développement.

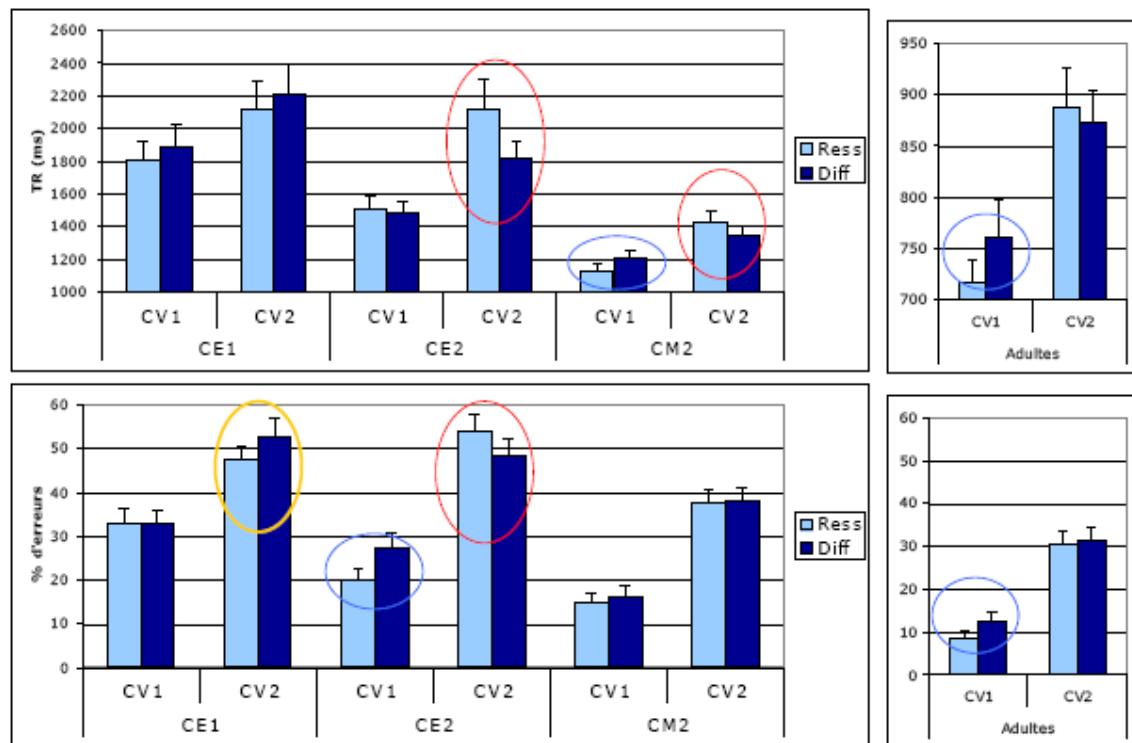


Figure 7 : Résultats pour les expériences d'amorçage et de masquage phonétique à l'intérieur d'un stimulus écrit CVCV avec manipulation de la ressemblance de voisement entre les deux consonnes, chez les enfants et adultes normo-lecteurs (Krif, Bedoin & Mérigot, 2003).

4. Statut cognitif des types de traits phonologiques

4.1. Existence de types de traits

4.1.1. Phonologie non-linéaire et géométrie des traits

Alors que la question de la définition des traits phonologiques a mobilisé la recherche en phonologie pendant longtemps, l'intérêt pour *l'organisation* des représentations phonologiques est plus récent. Dans les théories phonologiques actuelles, les segments sont organisés en termes de traits, dont l'ensemble présente une structure interne (Clements, 1985). On trouve déjà chez Trubetzkoy (1939, cité par Clements & Hume, 1995) l'idée d'un regroupement de certains traits sur des plans distincts pour former des '*related classes*', selon des critères à la fois phonétiques (e.g., regroupement du voisement et de l'aspiration, car ils sont réalisés par l'activité laryngale, indépendamment du lieu d'articulation) et phonologiques (voisement et aspiration fonctionnent ensemble phonologiquement car ils subissent souvent ensemble le même phénomène de neutralisation). Le développement de cette idée ne s'est cependant réalisé que plus tard, avec la théorie de la '*géométrie des traits*'. La notion de '*classe naturelle de traits*' (ou encore '*type de traits*') reprend alors celle de '*related classes*'. Les traits qui se comportent

régulièrement d'une manière commune, en suivant une même règle phonologique, relèvent d'un même type de traits, représenté dans l'organisation arborescente par un nœud dit '*constituent*' (Clements, 1985). Ainsi, les traits ne sont plus représentés dans des matrices, mais sous la forme d'un arbre : un nœud racine (au sommet) représente le son de parole lui-même, les valeurs de traits sont les terminaisons au bout des branches et les *constituents* sont les nœuds intermédiaires qui rendent compte de la typologie des traits. Selon cette théorie essentiellement articulatoire, cette organisation en types de traits serait universelle. Clements et Hume (1995) décrivent ainsi plusieurs types de traits (i.e., *constituents*), qui organisent l'arborescence pour les consonnes.

Le lieu d'articulation forme une classe naturelle, un *constituent* sous lequel se déploient trois valeurs de traits, selon l'articulateur actif : a/ Labial (les lèvres), b/ Coronal (la partie antérieure de la langue), c/ Dorsal (le dos de la langue) (Sagey, 1986, p. 274). Ces valeurs de traits sont représentées sur des paliers (*tiers*) distincts. En dehors de cette catégorie de traits, les autres traits sont répartis en deux types : les traits *articulator-bound* et les traits *articulator-free*. Les traits libres par rapport aux articulateurs sont généralement considérés comme situés à un niveau plus élevé de la hiérarchie que les traits liés aux articulateurs (Clements & Hume, 1995, p. 253).

La réalisation des traits *articulator-bound* dépend d'un articulateur spécifique. Clements et Hume (1995) décrivent ainsi les traits [antérieur] et [distribué], qui ne sont reliés qu'au trait coronal, car ils ne précisent que la fermeture associée à ce trait, dans certaines langues (le premier oppose des coronales antérieures et postérieures, le second oppose des coronales apicales et laminaires).

Les traits [sonorant], [approximant] et [consonantique] sont *articulator-free*, mais les deux grands types de traits indépendants des articuleurs sont les traits laryngés et les traits de mode d'articulation.

Le mode d'articulation correspond au type de fermeture du chenal expiratoire : le passage de l'air est bloqué dans les consonnes occlusives, mais seulement restreint, freiné, dans les consonnes fricatives, et ceci quel que soit l'articulateur impliqué. Dans certaines représentations de la géométrie des traits, dont celle présentée par Sagey (1986), le nœud des traits de lieu et le nœud des traits de mode sont l'un et l'autre placés sous un nœud intermédiaire qui les sépare de la racine : le nœud de la cavité orale. Ce *constituent* reprend la notion générale de fermeture de la cavité orale : celle-ci est alors définie comme une unité fonctionnelle, décrite de façon plus détaillée par le caractère plus ou moins radical de la fermeture (le mode) et par la localisation de celle-ci (le lieu).

La catégorie de traits laryngés recouvre entre autres le voisement [voice], caractérisé par l'opposition entre [stiff vocal cords] (cordes vocales tendues, ce qui correspond grossièrement au trait sourd) et [slack vocal cords] (cordes vocales relâchées ; trait sonore).

Grâce à cette typologie, la phonologie essaie de prendre en compte le fait que les processus linguistiques se réalisent souvent sur le même sous-ensemble de traits distinctifs dans un segment (McCarthy, 1988). Par exemple, l'assimilation (propagation d'un trait d'un segment à l'autre) se produit plus particulièrement pour les traits qui définissent le lieu d'articulation : chacun des traits de lieu est concerné, et ceci indépendamment du mode d'articulation. Cette organisation s'appuie donc sur des données empiriques : les traits regroupés sous un même nœud de classification sont fréquemment l'objet d'application d'une même règle phonologique. La géométrie des traits est un module de la théorie phonologique non-linéaire : elle propose de rendre compte de la façon dont les traits distinctifs sont classifiés par les processus phonologiques (notamment l'assimilation et la

réduction). Elle se distingue en cela de la *Theory of Segmental Representation* proposée par Chomsky et Halle (1968) et leurs précurseurs, selon laquelle chaque segment était décomposé en une liste de nombreux traits distinctifs binaires, dont les statuts étaient équivalents.

Dans les travaux où la similarité phonologique est évaluée en termes de traits, cette répartition en trois classes majeures (mode, lieu, voisement) pour les consonnes est très fréquente ; dans le cas contraire, les auteurs précisent à quelle liste de traits ils se réfèrent (en particulier, celle de Chomsky & Halle, 1968 ; Frisch, 1996 ; Wickelgren, 1966).

Les traits considérés n'étant pas acoustiques mais articulatoires, on pourrait faire l'hypothèse de leur plus forte pertinence pour les situations de mémoire à court terme et les tâches de production de parole, que pour les tâches de reconnaissance de mots. Pourtant, comme le soulignent Bailey et Hahn (2005), les probabilités de confusion dans différentes activités langagières ne semblent pas totalement indépendantes. Les différentes parties du système langagier sont certainement en étroite interaction, ce qui permet au système perceptif d'extraire du sens à partir du signal acoustique issu de systèmes de production. Une '*monnaie d'échange commune*' serait partagée par ceux qui connaissent, produisent et perçoivent la parole (Goldstein & Fowler, 2003, p. 174), et il semble intéressant de rapprocher des données correspondant à différentes activités langagières pour mieux comprendre les représentations phonologiques et appréhender leur organisation. Ces trois catégories sont donc souvent utilisées en psycholinguistique, avec des situations expérimentales impliquant la perception, la production ou la mémorisation de la parole, que ce soit chez l'enfant (Gerken, Murphy & Aslin, 1995 ; Jusczyk & Aslin, 1995), ou chez l'adulte (Bailey & Hahn, 2005 ; Marslen-Wilson, Moss & van Halen, 1996 ; Frisch, 1996).

4.1.2. Arguments issus de tâches de jugement de similarité

Dès 1964, Greenberg et Jenkins ont souhaité prendre en compte des traits pour évaluer l'influence de la similarité phonologique sur le jugement de ressemblance. Dans leur épreuve, les consonnes initiales des syllabes se distinguaient soit par le lieu d'articulation, soit par le voisement, soit par les deux types de traits. Ils ont montré que la similarité était estimée comme inférieure par les juges lorsque deux traits plutôt qu'un seul portaient la différence. Le débat persiste cependant au sujet de la pertinence d'une mesure de la similarité phonologique basée sur le partage de traits plutôt que de phonèmes, car Vitz et Winkler (1973) n'ont pas amélioré la qualité de leur évaluation en utilisant une métrique infra-phonémique.

Plus récemment, Hahn et Bailey (2005) ont conduit une série de 5 expériences où il s'agit de choisir, entre deux pseudo-mots mono-syllabiques entendus, celui dont la forme sonore ressemble le plus à un pseudo-mot cible. Les résultats montrent clairement que les réponses sont influencées par le degré de recouvrement des traits infra-phonémiques, et ceci aussi bien au niveau des attaques que des cudas des syllabes.

D'autres travaux réalisés par la même équipe ont consisté à comparer la pertinence de plusieurs mesures de la similarité entre phonèmes afin de rendre compte des jugements de similarité effectués par des adultes sur des consonnes de l'anglais (Bailey & Hahn, 2005). Ils ont notamment confronté deux mesures de similarité. La première reprend les trois catégories de traits privilégiés dans les théories phonologiques de la géométrie des traits : les traits de lieu, de mode et de voisement (SPMV). Dans ce cas, chaque type de trait est multi-valent, ce qui permet en anglais une évaluation de la similarité des consonnes en 4 niveaux (0, 1, 2, 3 traits partagés). L'autre mesure de similarité a été

proposée par Frisch (1996), avec une plus large série de traits à une seule valeur (chaque trait est présent ou absent). Cette dernière mesure est basée sur une comparaison des classes naturelles auxquelles les deux phonèmes appartiennent. Les classes naturelles sont des ensembles de phonèmes partageant une combinaison particulière de traits. La similarité est alors calculée comme la proportion de classes naturelles partagées par les deux phonèmes, par rapport à la somme de ces classes naturelles partagées et de celles qu'elles ne partagent pas. Cette mesure permet une évaluation plus fine de la similarité, sur une échelle comportant davantage de degrés que SPMV. Toutefois, les auteurs montrent que l'évaluation plus simple, reprenant les trois types de traits, reste la plus efficace pour expliquer les jugements de similarité dans une tâche de choix forcé entre deux couples de mots entendus, la consigne étant de désigner le couple le plus similaire. Bien qu'en production de parole, les erreurs soient bien prédites par la métrique proposée dans la thèse de Frisch (1996, cité par Bailey & Hahn, 2005), la mesure de similarité SPMV, semble particulièrement efficace pour expliquer les données dans des tâches d'évaluation de ressemblance effectuées sur la parole perçue ; elle est en outre particulièrement économique.

En dehors des tâches de jugement explicite de la ressemblance que Bailey et Hahn ont directement expérimentées, les auteurs ont aussi évalué avec succès la prédictibilité de la similarité estimée par SPMV pour les erreurs de production recueillies par d'autres chercheurs dans le corpus du MIT (Shattuck-Hufnagel & Klatt, 1979), ainsi que pour des erreurs de perception dans du bruit (Luce, 1986) ou pour les performances en mémoire à court terme (Wickelgren, 1966).

4.1.3. Arguments empiriques issus de la neuropsychologie

Des données issues de la neuropsychologie viennent appuyer cette typologie des traits. Elles sont issues de l'analyse des performances de patients cérébro-lésés dans des tâches de production et de perception de parole et montrent que, lorsque les détériorations n'affectent pas le traitement de tous les traits, les déficits respectent la classification phonologique en types de traits. Par ailleurs, un ensemble de données contribue à montrer que les supports neuroanatomiques des traitements phonologiques peuvent varier selon les types de traits, avec notamment des différences de dominance hémisphérique pour le traitement des traits de lieu d'articulation et des traits de voisement.

4.1.3.1. Types de traits et production de parole chez des patients

Pour ce qui est de la production de parole, les erreurs de substitution commises par des patients aphasiques se limitent souvent à un seul type de trait (Blumstein, 1990). Les erreurs portent généralement seulement sur le voisement, seulement sur le mode ou encore seulement sur le lieu d'articulation, et impliquent rarement à la fois le lieu et le voisement ou le mode et le voisement. De plus, les erreurs de production les plus fréquentes chez les patients aphasiques consisteraient à substituer un phonème qui n'est pas correct du point de vue du lieu d'articulation, ce qui est cohérent avec le fait que c'est aussi pour ce trait que les difficultés semblent les plus marquées pour la discrimination de phonèmes chez les dyslexiques (Blumstein, 1990). Pour l'auteur, le fait que les erreurs de production d'un patient soient la plupart du temps relativement restreintes à une catégorie de traits est un argument important pour soutenir l'idée d'une organisation des traits phonologiques en catégories pertinentes du point de vue cognitif.

4.1.3.2. Types de traits et perception de parole chez des patients

Les difficultés de compréhension des patients aphasiques pourraient en partie s'expliquer par le déficit, parfois discret, de traitements acoustiques-phonétiques, comme le suggérait déjà Luria à propos de l'aphasie de Wernicke. Depuis, une détérioration des traitements phonémiques (notamment la discrimination de phonèmes) a été relatée dans différentes formes d'aphasie (Blumstein, Baker & Goodglass, 1977), sans qu'un lien de causalité soit d'ailleurs nécessairement établi entre troubles phonologiques et sémantiques. Des travaux comparant les performances de patients atteints de lésions différentes dans des régions cérébrales importantes pour le langage (lésions frontales ou temporales) n'ont pas fait ressortir de différences stables quant à leur incidence spécifique sur l'importance relative des types de traits faisant l'objet d'erreurs de perception ou de mémorisation de parole. Cela suggère que ni l'utilisation d'un code phonologique, ni le traitement d'un type de trait, ne dépendent d'une structure cérébrale unique, que celle-ci soutienne l'organisation motrice/articulatoire ou l'analyse acoustique. Du point de vue neuro-fonctionnel, le code phonologique pourrait être représenté de manière redondante, ce qui contribuerait à le préserver, au moins en dehors de l'aphasie (Hebben, 1986).

En perception de la parole, quelle que soit la forme d'aphasie (mais de manière plus claire dans l'aphasie de Wernicke), les difficultés des patients dans les épreuves de discrimination sont plus marquées si les stimuli de la paire diffèrent par un seul trait (notamment le voisement, ou le lieu d'articulation), plutôt que deux traits (Baker, Blumstein & Goodglass, 1981). Les types de traits auraient aussi leur importance. Selon Blumstein, Baker et Goodglass (1977), la condition la plus difficile est celle où les stimuli ne diffèrent que par le lieu d'articulation (plutôt que par le voisement), effet surtout relevé dans l'aphasie de Wernicke. Ils interprètent cette difficulté particulière pour le traitement du lieu en disant que ce trait repose sur des indices acoustiques (les rapides transitions de formants) qui imposent des demandes particulièrement fortes à l'aire associative auditive de l'hémisphère gauche, région détériorée chez ces patients. Un tel déficit limité à la discrimination nécessitant le traitement du lieu d'articulation, et non du voisement, est relaté dans plusieurs travaux (Miceli, Caltagirone, Gainotti & Payer-Rigo, 1978 ; Oscar-Berman, Zurif & Blumstein, 1975). La plus grande stabilité des indices acoustiques du voisement que des indices acoustiques du lieu à travers les contextes a été évoquée pour expliquer le meilleur maintien des capacités de discrimination du voisement. Toutefois, d'autres patients présentent le trouble opposé, avec un déficit sélectif de la discrimination du voisement (Caplan & Aydelott Utman, 1994). Cette dissociation, ainsi que la stabilité de ces troubles sélectifs à travers le temps et à travers les tâches (discrimination et identification de phonèmes) confirment la relative indépendance des traits de lieu et de voisement ; les processus de traitement qui leur correspondent seraient séparables (Gow & Caplan, 1996).

Ainsi, ces derniers auteurs ont proposé une épreuve de discrimination de mots issus de parole naturelle à 22 patients atteints de lésions cérébrales gauches et présentant des difficultés de traitement acoustique-phonétique, ainsi qu'à un groupe de 15 participants contrôles. La discrimination est significativement mieux effectuée sur la base du lieu que sur celle du voisement chez les contrôles, alors que cet avantage pour le lieu disparaît au profit d'un avantage non significatif pour le voisement chez les patients. Les types de traits semblent donc affectés de manière distincte par la pathologie. Dans le cas présent, la difficulté particulière à traiter le lieu d'articulation chez les patients a été interprétée comme un reflet de la vulnérabilité des discriminations qui dépendent fortement du traitement d'indices acoustiques rapides dans le signal. Mais comme d'autres travaux avaient au contraire montré que le traitement du lieu pouvait parfois être davantage préservé que celui

du voisement, ce résultat plaide avant tout en faveur de l'indépendance des types de traits. De plus, les auteurs ont comparé les performances pour les discriminations basées sur les traits qu'ils considèrent comme *articulator-free* (mode et sonorité) et *articulator-bound* (voisement et lieu) (Stevens, 2002). Aucune différence n'apparaît chez les contrôles, alors que les performances des patients sont mieux préservées pour les traits *articulator-free*. Ce résultat soutient cette fois la distinction entre le mode d'articulation, d'une part, et le voisement et le lieu, d'autre part. Il montre aussi que l'étude de patients peut apporter des arguments pour des distinctions parfois plus difficiles à argumenter à partir de données relevées en dehors de la pathologie.

4.1.3.3. Types de traits et variations de dominance hémisphérique

Des données neuropsychologiques et neurophysiologiques concourent à reconnaître que le traitement des différents types de traits n'est pas associé à une configuration unique d'asymétrie hémisphérique fonctionnelle. Des différences existent cependant quant à la dominance hémisphérique pour le traitement des traits de lieu et de voisement.

Les résultats d'une épreuve métalinguistique conduite auprès de patients aphasiques atteints d'une lésion hémisphérique gauche et de patients atteints d'une lésion hémisphérique droite soutiennent l'hypothèse d'une représentation dissociée des traits de lieu et des traits de voisement, du point de vue des supports neuro-anatomiques (Perecman & Kellar, 1981). Les auteurs ont demandé aux patients de rapprocher deux syllabes parmi les trois proposées, en se basant sur leur similarité phonologique. Les syllabes étaient présentées à la fois de manière auditive et à l'écrit et les stimuli offraient toujours un choix entre un appariement selon le lieu et un appariement selon le voisement. Alors que les contrôles et les patients cérébro-lésés à droite ont indifféremment choisi l'un ou l'autre critère, les patients atteints d'une lésion hémisphérique gauche ont davantage suivi le critère de voisement que celui du lieu. L'utilisation d'une épreuve métalinguistique, sans contrainte de rapidité et avec possibilité d'écouter chaque stimulus aussi souvent que souhaité, a permis aux auteurs de conclure que les patients atteints d'une lésion gauche ne présentent pas seulement une anomalie des traitements verbaux, mais aussi une altération de leurs représentations phonologiques. De plus, la représentation des traits de lieu et de voisement ne semble pas dépendre des structures cérébrales de l'hémisphère gauche dans les mêmes proportions. En cas de détérioration cérébrale gauche, le voisement semble être relativement préservé, ce qui suggère que son traitement peut reposer non seulement sur des structures de l'hémisphère gauche, mais aussi sur des structures de l'hémisphère droit. Le traitement du lieu d'articulation semble au contraire beaucoup plus dépendant de régions cérébrales gauches. L'examen d'autres patients aphasiques ne souffrant d'aucune lésion dans l'hémisphère droit confirme la persistance de bonnes compétences pour traiter le voisement, les lésions gauches des patients étant par contre associées à une détérioration marquée du traitement du lieu d'articulation (Blumstein, Baker & Goodglass, 1977 ; Miceli, Caltagirone, Gainotti & Payer-Rigo, 1978 ; Oscar-Berman, Zurif & Blumstein, 1975 ; Yeni-Khomshian & Lafontaine, 1983). De plus, le traitement du voisement est affecté dans des proportions équivalentes en cas de lésion unilatérale, qu'elle soit droite ou gauche, ce qui conforte encore l'implication particulièrement forte de l'hémisphère droit dans le traitement du voisement (Yeni-Khomshian et al., 1986).

D'autres travaux corroborent cette idée d'une différence d'implication de l'un et l'autre hémisphère pour le traitement du lieu et du voisement, et témoignent donc de la réalité psychologique et neuropsychologique des types de traits, chez des personnes sans pathologie. Dans une revue de question, Simos, Molfese et Brenden (1997) apportent

des arguments pour une implication particulièrement forte de l'hémisphère droit dans le traitement du voisement.

Par exemple, en acquisition, Cohen et Segalowitz (1990a, 1990b) montrent qu'apprendre un contraste de voisement inconnu dans la langue maternelle est plus facile et plus rapide si les stimuli sont présentés à l'oreille gauche (et donc traités préférentiellement par l'hémisphère droit) plutôt qu'à l'oreille droite.

Par ailleurs, Molfese (1978) et Segalowitz et Cohen (1989) ont recueilli les potentiels évoqués auditifs associés à l'écoute d'une série de consonnes occlusives dont le VOT (Voice Onset Time, indice acoustique très important pour le voisement) variait. Alors que ces potentiels varient de manière linéaire avec la durée du VOT sur l'hémisphère gauche (ce qui correspond à un simple traitement auditif des stimuli), ils varient de manière catégorielle (et donc selon des critères linguistiques) avec cette durée sur l'hémisphère droit.

De même, des études en écoute dichotique suggèrent une implication plus forte de l'hémisphère droit pour le voisement que pour le lieu. Depuis les années 1970, de nombreux travaux réalisés avec cette technique mettent en évidence un avantage de l'oreille droite chez les droitiers (REA, *Right Ear Advantage*) pour identifier un stimulus linguistique lorsque deux stimuli différents sont adressés simultanément à l'une et l'autre oreilles (Cutting, 1974 ; Darwin, 1971 ; Haggard, 1971 ; Hugdahl & Andersson, 1984 ; Studdert-Kennedy & Shankweiler, 1970). Cela reflèterait la supériorité de l'hémisphère contro-latéral (hémisphère gauche, HG) pour les traitements langagiers (Hugdahl & Wester, 1992 ; Kimura, 1967 ; Milner, Taylor & Sperry, 1968 ; Sparks & Geschwind, 1968). Cependant, lorsque le contraste de voisement est manipulé dans de telles épreuves, l'hémisphère droit (HD) semble plus impliqué. Un résultat ancien, et jusqu'ici isolé, montre en effet que le REA est moins marqué quand les stimuli en concurrence diffèrent par le voisement plutôt que par le lieu (Studdert-Kennedy & Shankweiler, 1970). Une expérience dérivée du principe de l'écoute dichotique a ensuite consolidé cette hypothèse (Cohen, 1981) : les participants devaient évaluer la ressemblance entre deux stimuli présentés successivement dans une oreille, pendant qu'un bruit blanc était présenté à l'autre oreille. Un avantage de l'oreille gauche (et donc de l'HD) est apparu lorsque la différence portait sur le voisement. Tout récemment, une recherche conduite dans l'équipe a confirmé, en français, l'implication particulièrement forte de l'hémisphère droit pour le traitement du voisement, avec une diminution significative du REA pour les couples de mots dont la différence porte sur le voisement plutôt que sur le lieu d'articulation (Bedoin, Ferragne & Marsico, en révision). Une analyse qualitative des erreurs en condition de différence de lieu et de voisement entre les deux mots présentés en écoute dichotique (réponses qui ne correspondent à aucun des deux mots, mais à un mélange des deux), montre qu'en français l'implication de l'HD est essentiellement associée au trait voisé (+V) et non au trait sourd (-V). En anglais, l'inverse se produit (Rimol, Eichele & Hugdahl, 2006). L'explication proposée s'intègre dans la théorie *Asymmetric Sampling in Time* (AST) et propose que l'implication de l HG et de l HD est déterminée par la présence d'événements acoustiques respectivement courts ou longs. Il est en effet vraisemblable que l HD extraie l'information à partir d'une fenêtre de traitement plus large que l HG (Poeppel, 2003), ce qui reprend la dissociation bien connue en vision entre traitements global et local, pour lesquels les hémisphères respectivement droit et gauche seraient spécialisés (Navon, 1977 ; Sanders & Poeppel, 2007). Rimol et ses collègues, en anglais, ont en effet relevé une association entre une dominance de l'oreille gauche (HD) lorsque le mot adressé à l'oreille gauche (HD) contient une consonne occlusive dotée d'un long VOT (occlusive sourde, en anglais). En français, ce sont les occlusives sonores qui sont associées à un événement long (barre de pré-voisement) et une

dominance de l'oreille gauche (HD) n'est observée que si le mot adressé à l'oreille gauche contient une occlusive sonore (Bedoin et al., en révision). Cette interprétation est cohérente avec les bonnes performances de l'HD pour traiter des transitions de fréquence assez longues (200 ms) (McKibbin, Elias, Saucier & Engebregston, 2003). Le flux acoustique serait divisé selon des fenêtres temporelles différentes par l'un et l'autre hémisphère (Boemio et al., 2005 ; Hesling, Dilharreguy, Clément, Bordessoules & Allard, 2005 ; Poeppel, Idsardi & van Wassenhove, 2008), et serait soumis à des fréquences d'échantillonnage différentes. Cela induirait une différence qualitative dans le recrutement de réseaux cérébraux selon le type de trait.

Ainsi, il existe des arguments pour une différence des catégories de traits du point de vue neuropsychologique, non seulement pour ce qui est des représentations des traits, mais aussi pour leur traitement.

4.2. Hiérarchie des types de traits

S'il existe de solides arguments pour défendre la pertinence cognitive de la répartition des traits en différentes classes, la question d'une éventuelle hiérarchie de ces types de traits demeure. La recherche en phonologie a proposé une organisation hiérarchique des types de traits, fonctionnellement reliés en catégories formant des nœuds dans une structure arborescente. Selon McCarthy (1988), la dichotomie principale au sein d'un segment concerne le nœud laryngé et le nœud de lieu d'articulation. Cette dichotomie serait subordonnée au mode d'articulation (la sonorité, le caractère consonantique, la nasalité, le caractère continu « *continuance* »). Pour discuter cette hiérarchie, il est possible d'évoquer des données empiriques dans le domaine des erreurs de perception de la parole, des expériences de détection d'erreurs de production, des expériences où la similarité des phonèmes doit être évaluée par les auditeurs de manière explicite, et enfin des erreurs de production de parole. Pour certains chercheurs, il n'est pas impossible qu'une catégorie de traits soit associée à des poids différents selon les tâches dans lesquelles les participants sont engagés (Bailey & Hahn, 2005 ; Wang & Biler, 1973). Nous chercherons si, au-delà des variations, le statut de certains types de traits est relativement stable, avec notamment la prépondérance des traits de mode.

Notons aussi que le statut des différents types de traits pourrait être en partie déterminé par des caractéristiques de la langue. Par exemple, le fait que certaines valeurs de traits soient plus fréquentes que d'autres parmi les mots de langue peut constituer une information sur laquelle s'appuyer lorsque le signal acoustique est dégradé. La distribution statistique des unités linguistiques a donc sans doute son importance pour le statut des traits et des types de traits. La recherche conduite par Denes (1963) sur l'anglais a ainsi montré que, pour cette langue, le trait de lieu alvéolaire prédomine statistiquement sur les autres lieux d'articulation (il est représenté dans 2/3 des consonnes), ce qui traduirait une préférence articulatoire de l'anglais pour les sons articulés à l'avant de la bouche. Par ailleurs, les règles qui régissent la succession des phonèmes diffèrent selon le type de traits. En anglais, le mode d'articulation semble avoir à cet égard un statut particulièrement important. L'examen des successions de phonèmes montre en effet que deux consonnes qui se suivent en anglais partagent en général le même lieu d'articulation mais se distinguent par le mode. De plus, les paires minimales qui s'opposent par le mode d'articulation sont nettement plus nombreuses que celles qui s'opposent par tout autre type de trait. Les traits de mode servent donc particulièrement souvent à distinguer les mots de cette langue (à eux seuls, ils opposent autant de mots que les traits de voisement et de lieu réunis). Tout se passe

comme si l'organisation de l'anglais permettait en priorité d'éviter les confusions concernant le mode d'articulation. A ce titre, ce type de trait a un statut particulièrement important et en accord avec la hiérarchie défendue par McCarthy. Ces descriptions se limitent cependant à une langue et il est difficile de savoir si elles correspondent vraiment à des préférences universelles dues à des caractéristiques de l'organisation des organes articulatoires et/ou des particularités des mécanismes perceptifs.

4.2.1. Hiérarchie des types de traits et perception de parole

4.2.1.1. Traits libres et traits liés aux articulateurs

Dans la rapide présentation que nous avons faite de la géométrie des traits, nous avons évoqué une distinction proposée entre deux familles de traits (Stevens, 2002) : les traits libres par rapport aux articulateurs (*articulator-free features*) et les traits liés aux articulateurs (*articulator-bound features*). Les traits libres constituent une classe qui permet une première catégorisation grossière des segments (la classe des voyelles, et de grandes classes de consonnes). Ils n'apportent pas de précisions sur les articulateurs activés pour la production du segment (Halle, 1992, cité par Stevens, 2002), mais seulement des informations sur la fermeture du chenal expiratoire. Selon certains modèles d'identification de phonèmes, l'identification des traits libres (caractérisant notamment le mode d'articulation, mais aussi la sonorité ou encore l'opposition consonne-voyelle) constituerait la base pour la discrimination ultérieure des traits liés, car les premiers délimiteraient dans le signal des régions où pourraient se trouver les indices acoustiques des seconds (Stevens, 2002). L'identification des traits *articulator-free* permettrait de localiser des indices spectraux qui dépendent du mode d'articulation. Les traits liés précisent par ailleurs quels articulateurs primaires sont impliqués dans la production, quelles sont leur forme et leur position. Dans la description que propose Stevens, les traits de lieu d'articulation semblent eux-mêmes faire partie des traits liés (c'est aussi ce que considèrent Gow et Caplan, 1996). Par contre, Clements et Hume (1995) parlent essentiellement des traits liés comme s'ils précisait la façon dont un lieu d'articulation particulier est produit (les traits [anterior] et [distributed] pour le lieu coronal), ce qui correspond à un niveau d'analyse plus précis. Selon Stevens (2002), en plus de cela, il serait généralement nécessaire de spécifier les traits associés à des articulateurs dits *secondaires*. Il s'agirait notamment des traits [nasal] et [stiff vocal folds] (i.e., le voisement). Notons enfin que le trait de voisement est lui-même rangé dans la catégorie des traits *articulator-bound* par certains auteurs (Gow & Caplan, 1996), et non dans cette troisième catégorie. En bref, la hiérarchie proposée dans cette théorie phonologique situe les traits de mode d'articulation au sommet, puis viennent les traits de lieu d'articulation et enfin le voisement, sans que la différence de statut entre lieu et voisement soit claire et reconnue de façon homogène. Le mode d'articulation est par ailleurs supposé être au niveau le plus haut dans la mesure où il définit la représentation d'un segment à l'intérieur d'une syllabe (Van der Hulst, 2005). Des estimations de distance psychologique entre consonnes sont issues des performances de participants écoutant des consonnes produites oralement : ils doivent évaluer leur taux de similarité (Peters, 1963). Il a été montré que le mode d'articulation est la dimension la plus importante, suivi du voisement, puis du lieu d'articulation. Tout se passe comme si les traits « *articulator-free* », comme le mode, étaient à la base de la discrimination des traits « *articulator-bound* » tels que le voisement et le lieu d'articulation (Stevens, 2002). L'avantage de la discrimination des traits « *articulator-free* » sur les traits « *articulator-bound* » chez des patients aphasiques apporte des arguments à ce point de vue (Gow & Caplan, 1996). Ces traits sont donc organisés en hiérarchie arborescente, géométrique,

pour les disposer dans leurs relations avec les structures articulatoires (Clements, 1985 ; Mc Carthy, 1988).

4.2.1.2. Hiérarchie des traits et perception de parole chez des patients

Dans l'étude conduite par Gow et Caplan (1996) et relatée précédemment, la discrimination de phonèmes s'est avérée plus facilement réalisée sur la base du lieu d'articulation que sur celle du voisement chez les contrôles. Cette différence disparaissait, et s'inversait parfois chez certains patients atteints de lésions cérébrales gauches. Dans cette tâche perceptive, le lieu présente donc un avantage par rapport au voisement, mais cet avantage semble fragile, vulnérable à la pathologie. Lorsque les auteurs comparent les performances pour le lieu et le voisement d'une part, et pour le mode et la sonorité d'autre part, un avantage apparaît seulement chez les patients, au profit des traits dits *articulator-free* (mode et sonorité). Ils soulignent la cohérence de ce résultat avec les modèles établissant une distinction forte entre les traits *articulator-free* et *articulator-bound* : la discrimination des traits de la première catégorie implique la localisation d'indices spectraux importants pour le mode, et qui serviront ensuite de base à la discrimination des traits de la deuxième catégorie, plus vulnérables aux imperfections du signal. Aussi, dans l'ensemble, cette étude montre que le traitement des traits de mode d'articulation est privilégié, résiste bien à la pathologie, alors que l'avantage du lieu sur le voisement est vulnérable. Cela suggère que les traits de mode occupent une place élevée dans la hiérarchie des traits phonologiques et, d'après Gow et Caplan, leur discrimination repose moins que les autres traits sur l'intégration d'une grande quantité d'informations.

4.2.1.3. Hiérarchie des traits et confusions en perception

Des travaux étudiant la perception de phonèmes dans un contexte bruité ont permis d'évaluer une certaine forme de robustesse des différents types de traits. Le signal de parole étant redondant, les auditeurs sont capables de dépasser la dégradation induite par le bruit, mais dans des proportions variables selon la catégorie de traits. Plusieurs éléments concourent ici aussi à soutenir le statut particulièrement important des traits de mode d'articulation.

Une étude sur les confusions dans une épreuve de perception de consonnes dans des syllabes CV présentées dans du bruit a fourni des indices sur ce qui permet de rapprocher les phonèmes. Ces regroupements se feraient essentiellement sur la base du partage du mode d'articulation (Hebgen, 1986). Dans cette étude, la dominance de ce type de trait est remarquable, car elle est relevée aussi bien chez des adultes contrôles que chez des patients atteints de lésions cérébrales affectant les fonctions langagières. Bien que moins fondamental, le partage du voisement ressort tout de même comme un critère fiable, et ceci quel que soit le groupe. Par contre, le partage de traits de lieu d'articulation n'explique les confusions dans aucun groupe. Ce faible impact du lieu d'articulation est interprété comme pouvant être une conséquence du bruit blanc qui masque les stimuli. Les indices acoustiques de ces traits seraient particulièrement vulnérables à ce type de détérioration (Wickelgren, 1969). Cette interprétation est vraisemblable, étant donné que le partage du lieu d'articulation est un critère de rapprochement des consonnes chez ces mêmes individus et pour les mêmes stimuli dans une épreuve de mémorisation à court terme où les stimuli ne sont plus masqués.

Dans une étude plus ancienne, Miller et Nicely (1955) ont aussi montré que les erreurs de perception de consonnes insérées dans des syllabes CV (avec la voyelle /a/) et présentées dans du bruit ne se font pas au hasard pour 16 consonnes de l'anglais.

Ils ne se sont cependant pas interrogés sur l'importance des traits de mode de façon exhaustive. L'analyse de covariance des traits impliqués dans les confusions suggère que la perception de chaque trait étudié (voisement, nasalité, affrication, durée, lieu d'articulation) est indépendante, comme si elle reposait sur 5 canaux distincts. Dès lors, la structure psychologique des phonèmes est interprétée en mettant l'accent sur l'indépendance des traits distinctifs. Dans cette étude, les matrices de confusion révèlent que le voisement et la nasalité sont mieux préservés que le lieu d'articulation. En 1972, Shepard a utilisé sur ces données la technique du MultiDimensional Scaling (MDS) pour étudier les distances psychologiques. Cela lui a permis de représenter les données dans un espace bidimensionnel défini par les axes Voisement et Nasalité. (pour une confirmation de l'efficacité du traitement du voisement par l'être humain, voir Sroka & Braida, 2005). Une autre analyse de confusions entre consonnes perçues, cette fois en position intervocalique, confirme l'importance des traits voisé, nasal et vocalique (Singh & Black, 1966). Enfin, les données de Wang et Bilger (1973), obtenues à partir de syllabes CV ou VC, répliquent en grande partie cet effet. Dans leur étude, le voisement, la nasalité et le trait fricatif apparaissent comme les contrastes qui résistent le mieux au bruit en perception de la parole. Toutefois, leur intelligibilité s'écroule par rapport aux autres traits si les stimuli sont présentés sans masquage par le bruit (Wang & Bilger, 1973). La saillance perceptive des traits varie donc selon les contextes : alors que les indices acoustiques du voisement et de la nasalité résistent au bruit, il est possible de favoriser l'extraction d'autres traits (relevant notamment du lieu d'articulation) en supprimant le bruit. Pour ce qui est du lieu d'articulation, en reprenant les données de différentes études, Wang et Bilger (1973) montrent qu'il est rarement bien extrait, même si son importance augmente dans la partie finale des expériences. Dans leur ensemble, ces données montrent surtout que le voisement résiste mieux au bruit que le lieu, ce qui n'en fait pas forcément un trait dont la représentation serait cognitivement privilégiée.

Plus récemment, Benki (2003) a également évalué les erreurs de perception de phonèmes dans du bruit. Il présentait pour cela des pseudo-mots anglais CVC, dans 4 conditions différentant pour le rapport signal sur bruit. La différence essentielle de ses expériences avec les précédentes est qu'elles proposent une réponse ouverte, et non un choix forcé entre des alternatives, ce qui réduit les risques d'induire des stratégies perceptives (Sommers, Kirk & Pisoni, 1997). Par ailleurs, les participants sont des sujets plus naïfs que dans les autres recherches, concernant la phonétique et la phonologie. Dans ces conditions, les auteurs ont répliqué la grande robustesse du voisement, mais ont aussi plus clairement montré celle du mode, alors que les traits de lieu restent les moins bien perçus dans le bruit. Pour expliquer la préservation du voisement, ils n'évoquent cependant pas une place prédominante de ce type de trait dans une hiérarchie de représentations. Ils évoquent plutôt des explications acoustiques. Les trois types de traits sont sous-tendus par de multiples indices acoustiques. Néanmoins, les caractéristiques temporelles de la configuration d'énergie dans les basses fréquences, au début du signal, constituent des indices fondamentaux pour le voisement d'une consonne (Liberman, Delattre & Cooper, 1958). De même, le mode d'articulation est avant tout déterminé par l'aspect temporel du changement d'intensité entre la consonne et la voyelle, généralement dans les basses fréquences du signal (exception faite de certaines fricatives, Miller & Nicely, 1955). Par contre, la perception du lieu dépend davantage des transitions des formants F_2 et F_3 , dans de plus hautes fréquences (Miller & Nicely, 1955). Or, la détérioration exercée par le bruit qui dégrade ici le signal de parole porterait davantage sur les composantes spectrales que sur les aspects temporels des indices acoustiques, ce qui préserve relativement bien le VOT, par exemple, indice très important pour identifier le voisement (Lisker & Abramson, 1964).

De plus, les contrastes sous-tendus par de basses fréquences, tels que ceux du voisement et du mode, susciteraient une variation plus prononcée de la synchronisation neuronale (*Synchrony capture hypothesis*, Kluender, Lotto & Jenison, 1995), et celle-ci permettrait donc une meilleure perception dans le bruit.

Une autre forme de détérioration du signal a été utilisée pour étudier les erreurs de perception de parole : la suppression d'une partie plus ou moins longue du signal à partir du début (*gating*) (Warner, Smits, McQueen & Cutler, 2005). Les données sont un peu différentes de celles observées à partir d'une détérioration par le bruit. Dans une épreuve d'identification perceptive, les auteurs remarquent que le trait le mieux restitué est le mode d'articulation. Le voisement est significativement moins bien identifié, quelle que soit la taille de la portion de signal supprimée. Dans ces conditions, le lieu d'articulation est mieux restitué que le voisement, hormis dans les cas où la plus grande portion du signal est enlevée (les auditeurs identifient alors aussi mal le lieu que le voisement, et seul le mode échappe un peu à l'altération du signal). Dans l'étude de Warner et al. (2005), deux différences apparaissent donc par rapport aux travaux utilisant une détérioration par le bruit : le voisement est moins bien perçu que le lieu d'articulation, et le lieu d'articulation est presque aussi bien identifié que le mode. Cette différence est peut-être en partie due à la langue étudiée (le néerlandais et non l'anglais). Actuellement, en néerlandais, certaines distinctions de voisement sont en train de disparaître, et le phénomène de dévoisement final est aussi observé dans cette langue. Ce trait devient peut-être moins pertinent dans cette langue, il transmet en tout cas moins d'information que d'autres traits, et il semble que son statut décroisse. Il est difficile de faire la part des choses entre l'effet de la différence de langue et celui de la différence de détérioration opérée dans ces diverses études.

Aussi semble-t-il raisonnable de retenir que le mode apparaît comme le type de trait le mieux restitué en perception de parole, le voisement et le lieu sont moins bien identifiés, mais leur position respective dans l'échelle d'identification n'est pas stable. Enfin, un résultat annexe semble intéressant à l'égard des relations de dépendance entre types de traits. Les réponses observées par Warner et al. (2005) montrent que l'identification du voisement en coda de syllabe CVC est meilleure pour les consonnes fricatives que pour les occlusives. Ce phénomène pourrait être ajouté à la liste des arguments plaçant le voisement en dessous de la catégorie de mode, dans une relation de dépendance, dans la hiérarchie des types de traits.

4.2.1.4. Hiérarchie des traits et détection d'erreurs de prononciation

Dans des épreuves de détection d'erreurs de prononciation, nous avons vu que Cole (1973) ou encore Marslen-Wilson et Welsh (1978) montraient la sensibilité des auditeurs à la quantité de traits incorrects dans un phonème inapproprié. Cole, Jakimik et Cooper (1978) font eux aussi entendre des mots parfois mal prononcés, en anglais, mais effectuent une analyse qualitative des traits modifiés. Leur première expérience nous apprend que la détection des erreurs de voisement varie selon le mode d'articulation du phonème modifié : elles sont mieux identifiées dans des occlusives (70%) que dans des fricatives (38%). Ici encore, il semble possible de parler d'une certaine dépendance du traitement du voisement par rapport à des caractéristiques de mode. Plusieurs explications sont envisagées. Selon les auteurs, il ne pourrait s'agir de la plus grande variabilité des traits acoustiques associés au voisement dans les fricatives. Par contre, le changement de voisement dans une fricative pourrait être mal détecté parce qu'il serait perçu comme une variation normale due à un phénomène de coarticulation, et non à une erreur de prononciation. Le voisement des fricatives aurait en effet tendance à s'assimiler à celui

d'un segment adjacent. Enfin, la difficulté à détecter un changement de voisement dans des consonnes fricatives pourrait aussi s'expliquer par la faible quantité de paires de mots anglais se distinguant par la seule différence de voisement entre des consonnes fricatives. Le changement de voisement entre des fricatives ne serait alors porteur que de peu d'information et les auditeurs anglais les prendraient peu en considération. Nous avons vu qu'en néerlandais le traitement du voisement dépendait aussi de caractéristiques de mode, mais dans cette langue le voisement serait mieux traité pour des consonnes occlusives que pour des fricatives (Warner et al., 2005). Le rapprochement entre ces deux résultats met en exergue la dépendance du traitement du voisement par rapport aux caractéristiques de mode d'articulation, mais au-delà de ce principe général, le détail de la façon dont cette dépendance s'exprime dépend de caractéristiques de la langue.

La dépendance du traitement du voisement par rapport au mode d'articulation suggère une première relation hiérarchique entre deux types de traits. Contrairement à l'affirmation de Peters (1963, p. 1985) selon qui la perception des traits distinctifs (voisement, nasalité, affrication, durée et lieu) se ferait indépendamment pour chaque trait, il semble que le traitement du voisement ne soit pas étranger à celui du mode d'articulation.

Dans des expériences complémentaires en anglais, Cole et al. (1978) relèvent aussi une détection plus fréquente des erreurs de lieu d'articulation (87%) que des erreurs de voisement (78%) dans des mots. Ce résultat s'oppose à celui de Miller et Nicely (1955) qui observaient moins de confusion sur le voisement que sur le lieu d'articulation en perception de syllabes dans du bruit. Ils s'opposent aussi à ceux de Garnes et Bond (1975) qui étudient les erreurs de perception dans une conversation présentée en contexte bruité. Cela suggère que le bruit détériore particulièrement l'information acoustique qui sous-tend le lieu d'articulation, alors que le voisement lui résiste mieux. Les indices acoustiques temporels pour le voisement (VOT) seraient moins affectés par le bruit que les indices spectraux, plus fondamentaux pour identifier le lieu. Dans les conditions d'écoute non bruitées proposées par Cole et al. (1978), ce rapport hiérarchique entre voisement et lieu est inversé. Nous proposons de rapprocher ce résultat de celui de Warner et al. (2005) qui, nous l'avons vu, observaient aussi une meilleure identification du lieu que du voisement dans un signal non détérioré par du bruit, mais altéré par une suppression croissante de signal depuis le début.

Autrement dit, le mode est particulièrement bien traité en perception de la parole et, si les conditions d'écoute ne sont pas bruitées, le lieu semble mieux perçus que le voisement. Toutefois, le contexte bruité renverse la hiérarchie entre les traits de lieu et de voisement en anglais.

4.2.2. Hiérarchie des traits et mémorisation à court terme

Peu de travaux sur la confusion des traits dans des épreuves de mémoire à court terme nous renseignent sur la prépondérance de certains types de traits. Hintzman (1967) a cependant relevé que les confusions les plus fréquentes concernent des items qui partagent les traits de lieu ou de voisement, ce qui souligne encore la grande stabilité du mode d'articulation. Dans une étude un peu plus récente et que nous avons précédemment évoquée parce qu'elle compare les confusions dans une épreuve de perception de parole et dans une tâche de mémorisation à court terme, Hebben (1986) a montré que le partage du lieu d'articulation est un critère important pour déclencher des confusions, mais son importance est secondaire par rapport à celle du partage du mode. Le partage du voisement n'a quant à lui pas d'influence dans cette épreuve. Sur le sujet qui nous occupe ici, les données en mémoire à court terme sont trop peu nombreuses pour constituer des arguments forts. Même si les traits de mode semblent encore une fois prépondérants et si les traits de lieu jouent un

rôle plus déterminant que le voisement, il est important de s'intéresser à d'autres types de situations expérimentales pour appréhender la hiérarchie des types de traits.

4.2.3. Hiérarchie des types de traits et production de parole

Des données issues des travaux sur les erreurs de production suggèrent que les traits n'exercent pas tous une influence équivalente sur les erreurs par substitution de consonnes. Dans le domaine de la production, davantage que dans d'autres domaines d'étude des traitements langagiers, les données proviennent de populations adultes, mais aussi de travaux conduits chez de jeunes enfants et chez des patients.

Chez l'adulte, Shattuck-Hufnagel et Klatt (1979) ont étudié un corpus d'erreurs en anglais et notent que les traits de mode d'articulation et de voisement sont significativement mieux conservés que le lieu d'articulation. De plus, les erreurs par changement de lieu sont les plus nombreuses parmi les erreurs qui n'impliquent qu'un seul trait. Par contre, lorsqu'il s'agit d'échanges entre les traits de phonèmes appartenant à deux mots successifs, c'est le trait de voisement qui fait l'objet des erreurs les plus fréquentes (e.g., *big and fat* devient *pig and vat*) (Fromkin, 1971).

Plus récemment, Rogers et Storkel (1998) ont conduit des expériences pour tester si la vitesse de production de mots successifs lus sur un écran est affectée par le partage de traits de mode, de voisement et de lieu au niveau des initiales des mots CVC. Il ne s'agit plus cette fois du recueil d'erreurs de production dans des discours spontanés, mais d'erreurs enregistrées dans des situations expérimentales contrignant le locuteur à produire très rapidement, dans un contexte où les ressemblances infra-phonémiques des unités successives sont contrôlées. Les données apportent tout d'abord des arguments pour l'intervention de représentations de traits phonologiques à une étape antérieure à celle de la programmation motrice. L'analyse des latences montre aussi que les réponses sont particulièrement ralenties lorsque les stimuli successifs partagent le trait de mode. La condition avec partage du voisement n'est en revanche pas associée à des latences différentes de celles de la condition contrôle. Le trait de mode apparaît donc, encore une fois, comme doté d'un statut particulièrement important dans le système phonologique. Dans ces expériences, l'influence du partage du lieu n'est pas étudiée directement, mais l'ajout d'une ressemblance de lieu est présent dans certaines conditions. Une ressemblance supplémentaire au niveau du lieu d'articulation ne retarde pas davantage les réponses. À travers une série de quatre expériences, les auteurs ont ainsi montré que les performances ne sont pas directement explicables par le nombre de traits partagés, car le type de trait impliqué est très important. Leurs résultats plaident donc en faveur de la validité psychologique des classifications de traits phonologiques. La notion de types de traits répartis en mode, lieu et voisement semble pertinente pour les unités de connaissance mises en jeu dans le traitement du langage.

Pour ce qui est de travaux en acquisition, dans son rapport sur les erreurs de prononciation d'écoliers, Williams (1970) montre que les traits distinctifs varient quant à leur degré de stabilité, et cette variation est en elle-même l'indice de représentations individualisées de ces unités infra-phonémiques. Un des traits les moins vulnérables à la substitution est le trait continu. Il s'agit du maintien d'une caractéristique de mode articulatoire, ce qui est cohérent avec le statut prépondérant de ce type de traits d'après la plupart des données jusqu'ici relatées. Chez l'enfant comme chez l'adulte, les traits de mode semblent particulièrement prégnants. Williams (1970, p. 79) note aussi que le trait le moins stable est le trait coronal. Il s'agit d'un trait de lieu d'articulation, et nous verrons que les travaux sur le jugement explicite de similarité concluent également souvent à la

moindre importance du statut accordé aux traits de cette classe dans l'estimation de la similitude entre phonèmes. Ils notent enfin un point intéressant pour ce qui est de la notion d'indépendance des types de traits. L'analyse des erreurs montre qu'il n'est pas possible de dire si le voisement est un trait stable ou vulnérable aux substitutions, car cela dépend des autres traits présents dans le phonème. Ils observent ainsi que le voisement est vulnérable aux substitutions quand il est porté par un phonème strident, mais il est stable quand ce phonème n'est pas strident. La dépendance présentée par le traitement du voisement par rapport aux caractéristiques de mode d'articulation du phonème suggère une hiérarchie entre ces types de traits, le voisement étant en cela subordonné au mode. Cette dépendance est cohérente avec celle qui a été observée par ailleurs, dans des épreuves de détection d'erreurs de prononciation en anglais et en néerlandais (Warner et al., 2005).

Dans une étude portant sur de jeunes enfants présentant des troubles du langage, McCormack et Dodd (1996) ont analysé les erreurs de production de 99 enfants d'âge préscolaire, en prenant en compte la sévérité de leur déficit langagier. Ils ont montré que la distance entre les productions et les phonèmes cibles augmente, en termes de nombre de traits erronés, dans le même sens que la sévérité du trouble des enfants. De plus, une analyse qualitative des erreurs montre qu'elles préservent moins les traits de lieu que les traits de mode d'articulation, que ce soit chez des enfants présentant des déficits majeurs, un simple retard de langage, ou aucun trouble (groupe contrôle de 24 enfants de 4 ans 3 mois en moyenne).

D'autres études sur le développement d'un système phonologique typique ou atypique chez des enfants atteints de pathologies du langage s'appuient sur le principe du marquage pour expliquer bon nombre d'erreurs de production chez les jeunes enfants. Or, en cas de développement atypique du système phonologique, ce principe de marquage serait particulièrement perturbé pour les traits de lieu, mais plus rarement pour le mode et le voisement (Bernhardt & Stemberger, 2007). Les traits de mode seraient en cela aussi favorisés, alors que le lieu serait plus sensible à la pathologie. Pour un type de trait donné, certaines valeurs de trait ont un statut privilégié, parce qu'elles sont moins complexes, et le trait, qualifié de *non-marqué (unmarked)*, serait utilisé *par défaut*. Par exemple, en anglais, pour le mode d'articulation, les consonnes occlusives, approximantes et nasales seraient moins marquées que les fricatives et les liquides. Pour les traits de lieu, en anglais, le trait coronal serait le lieu non-marqué. Concrètement, cela se traduit par une acquisition plus précoce des consonnes contenant ce trait et une production particulièrement fréquente de telles consonnes chez les jeunes enfants. Les phonèmes de remplacement dans les erreurs de substitution ont aussi souvent des traits non marqués, et ces derniers sont fréquemment la cible de phénomènes d'harmonie consonantique. Les relations de marquage entre les traits sont censées être universelles (les caractéristiques phonologiques considérées comme non marquée sont les plus largement réparties dans les langues du monde) et/ou dépendantes de la facilité de perception ou d'articulation, mais certains chercheurs estiment qu'elles peuvent quand même varier entre les langues, ou au cours du développement de l'enfant (Fikkert, 2007). Des études de cas d'enfants ayant des systèmes phonologiques atypiques montrent que le trait [dorsal] aurait chez eux le statut de trait de lieu non-marqué, et les consonnes vélaires apparaissent alors souvent comme consonnes de remplacement dans les erreurs par substitution. Le bouleversement des rapports entre traits marqués et non-marqués est donc particulièrement présent en cas de pathologie parmi les traits de lieu. Cela souligne une certaine vulnérabilité de ce type de trait à des pathologies du langage.

Dans le cas de troubles neurologiques accompagnés de déficits phonologiques chez des adultes, on note aussi davantage d'erreurs sur les traits marqués que sur les traits

non-marqués. Une étude conduite auprès de 23 patients francophones atteints de diverses formes d'aphasie a analysé les erreurs de répétition de mots et de non-mots, dont certains contiennent des clusters consonantiques où les deux consonnes ont des lieux différents (Béland, Paradis & Bois, 1993). Les erreurs seraient surtout des simplifications, des réponses 'par défaut', dans lesquelles les traits marqués seraient remplacés par des traits non-marqués. Les stimuli dont les clusters contiennent deux traits de lieu marqués posent plus de problèmes aux patients que ceux qui contiennent un trait marqué et un trait non marqué pour le lieu. La vulnérabilité des traits de lieu est donc particulièrement élevée en cas de pathologie du langage, chez l'enfant à développement atypique comme chez l'adulte.

Les traits de voisement semblent aussi présenter une fragilité particulière dans certaines pathologies du langage. Chez des patients atteints d'apraxie verbale, les erreurs de voisement sont les plus répandues (Wertz, LaPointe & Rosenbek, 1991, cité par Rogers et Storkel, 1998). Devant cette tendance à faire des erreurs de voisement, Rogers et Storkel (1998) suggèrent qu'un modèle basé sur des relations d'inhibition latérales devrait faire l'hypothèse de relations inhibitrices particulièrement fortes pour le voisement, afin de contrebalancer les erreurs les plus fréquentes.

4.2.4. Hiérarchie des traits et jugement explicite de similarité

Des expériences métalinguistiques, dans lesquelles les participants doivent directement juger la ressemblance entre des phonèmes, apportent aussi des éléments au sujet des différentes catégories de traits phonologiques.

Une hiérarchie des traits se dégage par exemple d'une tâche d'évaluation explicite de la similarité (échelle en 9 points) entre les membres d'une paire de consonnes (Peters, 1963). Dans cette épreuve métalinguistique, les participants ont effectué des jugements portant sur 496 paires de syllabes, constituées à partir de 28 consonnes qu'ils avaient eux-mêmes produites et dont l'enregistrement leur était diffusé. Ces données ont permis de représenter des regroupements de consonnes dans un espace à deux dimensions. Il s'est avéré possible d'interpréter la structure à partir des trois types de traits : le mode, le lieu et l'activité laryngale (voisé vs. non-voisé). Les groupements sont essentiellement motivés par le partage du mode d'articulation, type de trait qui apparaît encore une fois au sommet de la hiérarchie. Cette dominance est renforcée chez les participants dotés de connaissances académiques en phonétique. D'après l'analyse de l'auteur, tout se passe comme si le lieu et le voisement participaient à une même dimension et aucune relation hiérarchique claire n'apparaît entre ces deux types de traits. Le lieu d'articulation apparaît comme le type de trait prédominant chez deux participants sur dix, mais il se trouve que ce sont justement deux personnes ayant suivi des cours en phonétique. Pour Peters, la distance psychologique entre les consonnes est donc avant tout déterminée par le mode, et secondairement par le voisement et le lieu d'articulation. Williams (1970) note aussi que le trait le moins stable est le trait coronal, qui est un trait de lieu d'articulation ; l'auteur conclut à la moindre importance du statut accordé aux traits de cette classe dans l'estimation de la similitude entre phonèmes.

L'absence d'une claire hiérarchie entre le lieu d'articulation et le voisement ressort également des résultats d'une autre tâche métalinguistique, dans laquelle les participants devaient rapprocher 2 syllabes sur 3, selon leur similarité phonologique (Perecman & Kellar, 1981). Pour réaliser l'appariement, les participants pouvaient entendre autant qu'ils le souhaitaient chacune des trois syllabes, pour lesquelles ils pouvaient aussi s'appuyer sur une présentation écrite. Cette épreuve mettait systématiquement en concurrence le partage d'un trait de lieu et le partage d'un trait de voisement. Dans cette étude, les adultes sans pathologie ont réalisé les appariements aussi bien sur la base de la ressemblance de lieu

que sur la base de la ressemblance de voisement, ce qui confirme encore l'absence de relation hiérarchique stable entre ces deux types de traits.

Plus récemment, Bailey et Hahn (2005) ont également comparé l'influence des ressemblances de lieu, de mode et de voisement entre des phonèmes sur l'évaluation explicite de leur similarité. Nous avons vu que leur travail avait permis de mettre en avant les qualités prédictives d'une mesure de similarité basée sur ces trois types de traits. Une analyse post-hoc de leurs données révèle l'importance particulière de la catégorie de mode d'articulation. Lui accorder davantage de poids qu'aux traits de lieu ou de voisement accroît en effet la prédictibilité des mesures de similarité dans des tâches de jugement de ressemblance entre consonnes. Les auteurs rejoignent ici la conclusion de Peters (1963), mais aussi celle de Carter (1987) et de Denes (1963). Selon eux, la plus grande quantité d'information qui permet de distinguer des mots est sous-tendue par le mode d'articulation.

5. Représentation des traits phonologiques chez l'enfant

Pour apprendre un nouveau mot, il faut avant tout reconnaître qu'il est différent de ceux que l'on connaît et qu'il ne s'agit pas d'une variation allophonique acceptable d'une représentation lexicale déjà stockée en mémoire. Le traitement des mots familiers et l'apprentissage de mots nouveaux sont donc l'un et l'autre étroitement liés aux connaissances phonologiques. La connaissance précoce de la structure phonologique propre à une langue est un atout important pour améliorer la construction du lexique mental. Considérer un mot comme nouveau nécessite de distinguer les caractéristiques acoustiques non pertinentes pour opposer les mots (modulations de l'intonation sous l'effet de l'émotion, durée des voyelles pour certaines langues) de celles qui correspondent à de véritables traits phonologiques, susceptibles d'encoder les différences entre les mots.

5.1. Sensibilité aux traits phonétiques chez les bébés

Dès les premiers jours de leur vie, les comportements des bébés humains fournissent les indices d'une étonnante capacité à distinguer certains contrastes phonétiques (Bertoni, Bijeljac-Babic, Jusczyk, Kennedy & Mehler, 1988). Des expériences explorant les variations d'amplitude de succion non-nutritive chez des bébés de 2 mois ont aussi démontré la précocité de la discrimination de contrastes phonétiques lors du traitement de séries de syllabes CV ou VC (Jusczyk, 1977). Le paradigme d'habituation a également permis de montrer que des enfants de moins de 4 mois sont sensibles à la variation de caractéristiques qui définissent les catégories de voisement (Eimas, Siqueland, Jusczyk & Vigorito, 1971 ; Miller & Eimas, 1983), de mode d'articulation (Eimas & Miller, 1980) et de lieu d'articulation (Eimas, 1974). Que les traits de lieu d'articulation qui sous-tendent la distinction soit pertinents pour sa langue ou pas, l'enfant entre 6 et 8 mois s'avère capable de les discriminer (Werker & Tees, 1984). Il n'est pas encore dépendant de l'expérience pour les percevoir.

Autour de 7 mois, les enfants vont plus loin en mettant en œuvre cette grande sensibilité dans le traitement d'unités lexicales perçues. Jusczyk et Aslin (1995) ont ainsi montré une sensibilité très précoce à la variation d'un seul trait entre un mot auquel l'enfant a été familiarisé et un mot présenté ensuite, à l'intérieur d'une phrase. A 7 mois-et-demi, les

bébés ont porté beaucoup d'attention aux phrases comportant une exacte réplique du mot auquel ils avaient été habitués, mais s'intéressaient moins à des phrases contenant ce mot modifié par un ou deux traits. Ils sont donc alors capables de reconnaître la forme phonologique des mots, pré-requis important pour l'apprentissage des mots qui permettra ensuite d'aller plus loin, en combinant son et signification (Fikkert, 2007). Ils n'ont cependant pas encore cette compétence à 6 mois, alors qu'ils sont déjà capables de discriminer tous les traits phonétiques susceptibles d'exister dans les langues à travers le monde. Vers 7 mois, un progrès considérable se produirait donc dans les capacités du bébé à élaborer des représentations très détaillées des mots entendus, au point de pouvoir les utiliser avec efficacité pour le traitement de mots insérés dans des phrases.

Cependant, il est probable que les corrélats auditifs de ces contrastes phonétiques expliquent ces performances précoce, et leur traitement ne serait pas encore à proprement parlé linguistique. Les capacités de discrimination des sons de parole semblent alors universelles et il faudra attendre que les petits accumulent davantage d'expérience avec leur langue maternelle pour qu'elles deviennent spécifiques à cette langue. A 6 mois, les enfants japonais discriminent par exemple des consonnes comme [r] et [l] sur la base de traits qui ne sont pas pertinents en japonais (Kuhl, Stevens, Hayashi, Deguchi, Kiritani & Iverson, 2006) ; à 4 mois, de petits espagnols discriminent les voyelles [e] et [ɛ], contraste pertinent en catalan mais pas en espagnol (Bosch & Sebastian-Gallés, 2003). Par contre, vers 9-10 mois, ces compétences inadaptées à la langue maternelle auront disparu chez ces enfants. Werker et Tees (1984) ont montré leur disparition progressive entre 8, 10 et 12 mois, à travers une étude transversale et une étude longitudinale : à partir de 10-12 mois, des expériences linguistiques spécifiques deviennent la condition pour que l'enfant maintienne sa capacité de discrimination phonétique, qui devient alors phonologique.

Une autre limite permet de dire que les enfants de moins de 9 mois ne traitent pas encore les caractéristiques phonétiques comme des unités linguistiques : ils perçoivent aussi de manière catégorielle des stimuli non-verbaux. C'est le cas, par exemple, pour des stimuli non-linguistiques reproduisant les caractéristiques acoustiques du VOT (*voiced-onset-time*), un indice majeur de la valeur du trait de voisement. La parole n'est donc pas d'emblée perçue au niveau phonémique (Jusczyk, Pisoni, Walley & Murray, 1980). L'observation de performances similaires par des animaux conduit au même type de conclusion (Kuhl & Miller, 1975 ; Kuhl & Padden, 1982 ; Kuhl & Padden, 1983).

Un autre argument empêche d'affirmer que des bébés de moins de 9 mois réalisent un traitement linguistique. A 2 mois, ils ne sont pas encore capables de traiter des segments phonétiques différents du point de vue acoustique comme les membres d'une même catégorie phonémique, par exemple différents exemples de /b/ au début de syllabes CV (Jusczyk & Derrah, 1987 ; Bertoncini, Bijeljac-Babis, Jusczyk, Kennedy & Mehler, 1988), ce qui limite la possibilité de conclure à une véritable perception catégorielle des phonèmes, selon les critères habituellement retenus.

Les bébés naissent donc avec des sensibilités perceptives pré-linguistiques et des préférences qui constituent d'excellents précurseurs les guidant vers l'acquisition du langage (Miller & Eimas, 1983), mais les connaissances phonologiques propres à une langue sont le fruit de l'expérience.

5.2. Sensibilité aux traits phonologiques chez les très jeunes enfants

A la fin de la première année, les enfants n'accordent plus le même poids à des variations non-linguistiques comme la hauteur, le débit, le sexe du locuteur (Houston & Jusczyk, 2000 ;

Kuhl, 1983), ou ses émotions (Singh, Morgan & White, 2004). Ils donnent également moins de poids aux contrastes phonétiques non pertinents pour leur langue (Werker & Tees, 1984), vers 9-10 mois pour les consonnes (Best, Lafleur & Roberts, 1995 ; Pegg & Werker, 1997), entre 6 et 8 mois pour les voyelles (Kuhl, Williams, Lacerda, Stevens & Lindblom, 1992 ; Polka & Werner, 1994). Pour certains contrastes peu saillants cela prendra un peu plus de temps, (Polka, Colantoni & Sundara, 2001 ; Sundara, Polka & Genesee, 2006).

Ce développement des compétences pour la structure phonologique spécifique à la langue serait le produit de l'expérience croissante (Anderson, Morgan & White, 2003 ; Kuhl, Williams, Lacerda, Stevens & Lindblom, 1992 ; Werker & Tees, 1984). A partir de la fin de leur première année, les enfants exploiteraient les propriétés statistiques de leur langue. Proposée à des enfants de 8 mois, une exposition intensive à une distribution bimodale d'exemplaires de consonnes opposées quant au voisement (e.g., [da]-[ta]), contraste phonétique initialement difficile, facilite ensuite la discrimination entre deux autres consonnes opposées par le même trait (e.g., [ga]-[ka]) (Maye, Weiss & Aslin, 2008). Une telle familiarisation peut ainsi favoriser chez ces jeunes enfants l'extraction du trait phonologique, immédiatement généralisé. Dès cet âge, les enfants peuvent donc encoder les sons de parole à un niveau abstrait. Cette compétence est associée à l'enfance, car l'exposition à une distribution bimodale pour le voisement, sur la base d'une opposition entre seulement deux consonnes, n'est pas généralisée à d'autres couples de consonnes par des adultes (Maye & Gerken, 2001).

La nature abstraite des représentations phonologiques des enfants à partir de 9 mois apparaît également à travers leur sensibilité au partage du mode d'articulation par les consonnes initiales d'une série de syllabes CVC, bien que les consonnes diffèrent entre les syllabes (Jusczyk, Goodman & Baumann, 1999). Leurs représentations des sons de parole subiraient alors une réorganisation importante par laquelle de véritables catégories de traits phonologiques et de phonèmes s'élaborent. Notons que ce bouleversement est contemporain d'un début de reconnaissance des mots, que les chercheurs situent généralement autour vers 10-12 mois (Benedict, 1979 ; Mills, Coffey & Neville, 1993) avec, en français, la capacité à reconnaître des mots familiers en dehors d'indices venant de l'intonation à partir de 10 mois et demi (Hallé & Boysson-Bardies, 1994). Il s'agit alors d'une véritable représentation linguistique (et non pas acoustique) des mots, puisque les enfants peuvent les reconnaître bien qu'ils soient prononcés par d'autres voix ou avec d'autres intonations que dans la phase d'apprentissage. Pour certains auteurs, vers 9-10 mois, les enfants analysent finement le signal acoustique pour accorder un statut particulier à certains traits plutôt qu'à d'autres en fonction de leur pertinence linguistique. Jusczyk et Aslin (1995) ont montré chez des enfants encore plus jeunes (8 mois) une certaine sensibilité à la variation d'un trait unique dans une situation impliquant un véritable traitement de la parole. Après avoir été familiarisés avec l'écoute de plusieurs formes du mot 'dog', les enfants ont manifesté une préférence pour des morceaux de phrases contenant ce mot. Cette préférence n'apparaît pas si l'enfant a été auparavant familiarisé avec la répétition de 'bog', qui diffère de 'dog' par un seul trait. Ce résultat, relevé chez des enfants particulièrement jeunes dans une situation de type lexical reste cependant un peu isolé.

La nature du code utilisé dans les activités lexicales de l'enfant vers un an est cependant débattue. Selon certains auteurs, vers 11 mois, lorsque les activités référentielles deviennent possibles avec les mots, les traitements analytiques seraient en effet transitoirement remplacés par un traitement plus global, donnant lieu à des représentations phonologiques lexicales sous-spécifiées. L'émergence de la signification des mots et la mise en place d'un lexique de réception s'accompagnerait donc d'une

certaine régression quant à la finesse des traitements phonologiques. Dépasser ce mode de traitement global et lui préférer une analyse détaillée des mots demanderait du temps. Cette préférence n'apparaîtrait pas avant 18-20 mois selon Hallé et Boysson-Bardies (1996), et ne deviendrait générale qu'à partir de 5 ans pour certains auteurs. Cette préférence pourrait aussi être dépendante de la taille du lexique mental.

5.3. Représentations phonologiques en période pré-scolaire

5.3.1. Représentations phonologiques lexicales détaillées chez l'enfant ?

Un décalage a été décrit entre les importantes capacités de discrimination perceptive des bébés et les faibles performances des enfants d'âge pré-scolaire, pourtant plus âgés, lorsqu'il s'agit de se baser sur des connaissances phonologiques fines pour reconnaître des mots. L'utilisation de catégories phonologiques détaillées ne semble pas aller de soi chez le jeune enfant dans des situations expérimentales de niveau lexical. Chez des enfants francophones de 11 mois, avec la technique du regard préférentiel, Hallé et Boysson-Bardies (1996) ont montré que les représentations lexicales de mots familiers sont sous-spécifiées. En traitant l'information phonologique sur un 'mode lexical', ces enfants admettent des changements portant sur le voisement ou sur le mode d'articulation des consonnes initiales (sans toutefois admettre la suppression complète de la consonne initiale), qui ne les empêchent pas de reconnaître les mots. Pourtant, à cet âge, ils perçoivent les contrastes phonémiques lorsqu'ils sont testés à partir de syllabes sans signification. On peut ainsi observer chez de très jeunes enfants un phénomène de déshabituuation lorsqu'une répétition d'une même syllabe (e.g. /ba/) est interrompue par une série d'une nouvelle syllabe (e.g., /da/), sans que cela s'accompagne de la capacité à catégoriser correctement des objets dont les noms constituent une paire minimale basée sur cette opposition. Par exemple, des enfants de 22 à 36 mois se montrent capables de produire correctement un contraste, en imitant la production d'un adulte (ce qui montre qu'ils perçoivent ce contraste), sans parvenir pourtant à utiliser celui-ci correctement pour assigner des sens différents à deux mots (Eilers & Oller, 1976).

Un traitement perceptif correct des traits ne s'accompagne donc pas immédiatement d'une utilisation performante de ces traits pour opposer les significations de mots distincts. L'usage proprement linguistique et lexical de représentations phonologiques détaillées ne va donc pas de soi pour un jeune enfant.

Cette observation a conduit à mettre en avant l'importance, indéniable, d'unités phonologiques de grande taille comme les syllabes pour les tout-petits (Bijeljac-Babic, Bertoncini & Mehler, 1993 ; Eimas, 1994). Elle a aussi donné lieu à l'hypothèse d'une représentation *holistique* des mots dans le lexique des jeunes enfants. La représentation lexicale serait essentiellement constituée de la structure prosodique, de la forme acoustique globale, ou encore d'un ensemble de traits non organisés en véritables segments avant l'apprentissage de la lecture. L'information sur la position des segments aurait aussi moins d'importance pour les enfants de 5 ans que pour les adultes : les indices extraits au début du mot n'auraient pas pour eux la valeur informative particulièrement forte qui leur est accordée par l'adulte (Walley, 1988). Par exemple, la similarité globale des stimuli suffirait à expliquer les confusions des enfants de 4 ans et demi dans des épreuves de mémorisation, ainsi que leurs réponses dans des tâches de classification, alors que les collégiens répondent en fonction des phonèmes communs (Treiman & Breaux, 1982).

Les représentations phonologiques lexicales des jeunes enfants et des adultes sont alors décrites comme de nature différente.

Une première explication pour cette difficulté phonologique dans les épreuves lexicales est qu'elles imposent l'apprentissage de mots, tâche référentielle qui demande en elle-même tellement de ressources que les enfants détournent leur attention des détails phonologiques (Swingley & Aslin, 2000). Les enfants entreraient alors dans un mode de traitement attentionnel particulier (Hallé & Boysson-Bardies, 1996). Une autre explication, évoquée par ces mêmes auteurs, évoque la fascination des enfants pour les objets présentés visuellement dans ces situations lexicales, attraction qui réduit l'attention pouvant être portée sur une analyse phonologique précise des stimuli. Stager et Werker (1997) ont ainsi montré que des enfants de 14 mois différencient les membres d'une paire minimale, à condition qu'ils n'aient pas sous les yeux un objet nouveau en mouvement. Les détails phonétiques impliqués sont donc potentiellement discriminables, mais le contexte doit s'y prêter.

D'après Gerken, Murphy et Aslin (1995), le décalage apparent entre les capacités de discrimination perceptives et la faible sensibilité des enfants à des détails phonologiques rendus pertinents pour le sens de mots pourrait aussi s'expliquer par d'autres aspects méthodologiques. Les tâches utilisées auprès des bébés (distinguer un nouveau stimulus d'un autre, auquel ils étaient habitués) sont beaucoup plus faciles que celles qui sont proposées après un an : il est alors nécessaire d'apparier un stimulus acoustique à son référent. Non seulement cela implique un traitement sémantique, non imposé dans les tâches purement perceptives, mais les épreuves elles-mêmes imposent souvent d'autres contraintes cognitives. Pour White et Morgan (2008), les erreurs des enfants pourraient s'expliquer par d'importantes contraintes relatives aux tâches utilisées, notamment en termes de mémoire de travail et de capacités d'inhibition. D'autres auteurs évoquent aussi une influence négative de la faible familiarité du matériel utilisé (Fennell & Werker, 2003 ; Swingley & Aslin, 2000). Par exemple, dans l'expérience de Eilers et Oller (1976), des enfants de 22 à 36 mois apprennent que le pseudo-mot *tig* désigne un nouveau jouet, opposé ici à *pig* (mot familier). Les erreurs de discrimination perceptives s'élèvent à 36%, mais il se pourrait que cette situation expérimentale, centrée sur l'apprentissage d'un mot nouveau et demandant d'inhiber un nom et un objet familiers perturbe les enfants. Dans des épreuves de sélection d'image, Barton (1978, cité par Swingley & Aslin, 2000) a aussi montré que les enfants de 27 à 35 mois parviennent à différencier les membres d'une paire minimale de mots (e.g., '*bear*'/'*pear*'), mais les performances chutent s'il ne s'agit pas de mots familiers mais de mots appris au moment de l'expérience. De même, les expériences de Garnica (1973) montrent que certains contrastes phonémiques ne sont pas traités de manière stable s'ils doivent être mis en lien avec des mots récemment appris.

Lorsque les tâches lexicales sont peu complexes quant à la sélection de la réponse (utilisation de techniques d'habituation, ou de regard préférentiel) et quand la charge mnésique est faible, tout en impliquant des processus sémantiques sur un matériel familier, les réponses de jeunes enfants peuvent témoigner de représentations de mots remarquablement détaillées du point de vue phonologique. Par exemple, Gerken et ses collègues (1995) utilisent une épreuve où l'enfant doit comparer différents stimuli auditifs à la représentation mentale d'une cible qui reste toujours la même (le mot familier *little*), ce qui impose une faible charge en mémoire. Ils ont montré que, contrairement à l'hypothèse holistique, les enfants de 3 à 4 ans commettent plus d'erreurs si le stimulus diffère de la cible par deux traits appartenant à un même segment plutôt que par deux traits répartis sur des segments différents. Les traits phonologiques semblent donc dès cet âge liés de façon

précise aux phonèmes dans les représentations lexicales, d'une manière qui ne diffère pas fondamentalement de celle des adultes. Ils montrent aussi qu'à cet âge une différence d'un seul trait peut affecter l'accès à un mot, ce qui confirme au niveau des représentations lexicales un effet précédemment observé chez des enfants du même âge avec des paires de pseudo-mots trisyllabiques (Graham & House, 1970). En s'intéressant au développement encore plus précoce, à partir d'une analyse de la direction des regards, Swingley, Pinto et Fernald (1999) ont montré que des enfants de 2 ans différencient d'autant plus rapidement deux mots perçus, que la durée des segments qui se recouvrent au début des stimuli est importante. Swingley et Aslin (2000) ont également montré que des enfants de 18 à 23 mois regardent moins un objet cible (parmi deux présentés) si son nom est mal prononcé, à un trait phonologique près, (« *where's the gall ?* », plutôt que « *where's the ball ?* »), puis répliquent ces résultats avec des enfants de 14-15 mois (Swingley & Aslin, 2002). Les représentations lexicales précoces ne seraient donc pas totalement sous-spécifiées, y compris dans des situations référentielles, à condition que différents paramètres de l'expérience soient adaptés à un ensemble de compétences cognitives des tout-petits. Dans une épreuve d'apprentissage de mots nouveaux où la sensibilité au changement est mesurée avec le paradigme d'habituation, Werker, Fennell, Corcoran et Stager (2002) confirment la sensibilité des enfants de 17 et de 20 mois à une modification impliquant un trait unique, mais ne l'observent pas à 14 mois. Enfin, la quantification des regards posés sur l'objet cible plutôt que sur un objet concurrent lors de l'écoute du nom de la cible confirme que les enfants de 18 à 24 mois sont sensibles à la prononciation incorrecte d'un trait unique dans la consonne initiale du mot (Bailey & Plunkett, 2002). Cet effet a ensuite été confirmé sur la voyelle initiale (Mani & Plunkett, 2007). Ainsi, dès la deuxième année de vie, mais sans doute plus systématiquement vers 18 mois, les enfants s'avèrent sensibles à une erreur de prononciation portant sur un seul trait de l'initiale d'un mot, ce qui témoigne de représentations lexicales détaillées.

A ce jour, trois grandes hypothèses coexistent au sujet de la nature des connaissances phonologiques lexicales chez le jeune enfant et sur ce qui détermine son développement.

Selon *l'hypothèse de la familiarité* la représentation phonologique d'un mot deviendrait de plus en plus détaillée du point de vue des traits simplement grâce à la répétition des expériences avec ce mot.

Selon *l'hypothèse développementale avec étape holistique*, c'est l'augmentation du vocabulaire de l'enfant qui imposerait une représentation de plus en plus précise des mots afin de les différencier, dans un voisinage phonologique de plus en plus dense et complexe. D'abord holistique, sans doute organisée autour des syllabes et de la prosodie, la représentation des mots deviendrait ensuite segmentale/phonémique pour éviter les confusions lexicales : les phonèmes, mais aussi les traits distinctifs, ne seraient représentés qu'assez tardivement (Charles-Luce & Luce, 1995 ; Metsala, 1999). Ainsi, le développement de la conscience phonémique, dont on connaît les liens importants avec la réussite de l'apprentissage de la lecture, ne s'expliquerait pas seulement par l'amélioration des capacités méta-cognitives des enfants, mais aussi par des changements dans la nature des unités de représentation phonologique. L'âge de l'enfant et la taille de son vocabulaire seraient les facteurs les plus déterminants pour la capacité à isoler un phonème dans un mot (pour une étude chez des enfants de 4 à 7 ans, voir Metsala, 1999), ou pour la sensibilité à des détériorations de la forme phonologique au niveau des traits.

En prenant en compte à la fois l'âge des enfants, la taille de leur vocabulaire et la familiarité des mots, Bailey et Plunkett (2002) ont voulu confronter ces deux premières hypothèses au sujet de la précision phonologique des mots dans le lexique des jeunes

enfants. Ils montrent que, chez des enfants de 18 à 24 mois, la sensibilité au changement d'un trait phonologique est tout aussi forte, quelle que soit la taille du vocabulaire (mots compris, mais pas nécessairement produits), la taille du voisinage lexical du mot testé, ou la récence de l'apprentissage du mot. De même, Swingley et Aslin (2000) ne montrent pas de corrélation entre la sensibilité au changement phonologique et la taille du vocabulaire des enfants de 18-24 mois. Enfin, pour Dollaghan (1994) qui s'est intéressé au vocabulaire des enfants entre 1 et 3 ans, même le lexique le plus précoce contiendrait déjà suffisamment de mots similaires les uns aux autres pour que des stratégies holistiques soient inefficaces pour l'enrichissement du vocabulaire. Coady et Aslin (2003) ont confirmé que le lexique précoce contient un grand nombre de mots pouvant aisément susciter des confusions, et cette densité précoce du voisinage lexical nécessiterait déjà une grande finesse de représentation des unités. Les auteurs de ces recherches n'apportent donc des arguments ni à l'une ni à l'autre des deux hypothèses et concluent à une étonnante précocité de la précision des représentations phonologiques des mots chez les enfants. Ces résultats sont en accord avec une troisième hypothèse : *l'hypothèse de la continuité*.

Notons toutefois que l'effet de la taille du vocabulaire sur la sensibilité au changement d'un trait phonologique a été observé dans un groupe d'enfants de 17 mois, mais pas à 14 mois ni à 20 mois (Werker et al., 2002). Cet effet transitoire soutient alors l'hypothèse développementale, mais seulement pour une tranche d'âge très courte, au-delà de laquelle (vers 18 mois) la taille du vocabulaire aurait atteint un seuil après lequel l'encodage phonologique serait déjà très détaillé.

Encore aujourd'hui, le débat persiste quant au niveau de détail auquel les premières représentations lexicales des enfants sont structurées (Zamuner, 2009). Il est essentiellement illustré par l'opposition entre deux théories : la théorie LMR (*Lexical Restructuring Model*), associée à l'hypothèse développementale avec étape holistique, et PRIMIR (*Processing Rich Information from Multidimensional Interaction Representations*, Werker & Curtin, 2005), qui reprend l'hypothèse de la continuité. Le point commun entre ces théories est de reconnaître que les représentations lexicales se restructurent au cours de l'enfance et évoluent vers des représentations phonémiques. Toutefois, la première décrit le passage de représentations holistiques vers des représentations phonémiques détaillées au niveau des traits, alors que la seconde estime que les représentations précoce sont déjà très détaillées et évoluent vers des représentations phonémiques sans passer par une étape holistique.

D'après LMR, les premières représentations lexicales sont holistiques et ne deviendront plus détaillées que sous l'impulsion d'un vocabulaire de taille suffisante. Cette taille critique se situe pour certains chercheurs entre 50 et 100 mots ; elle est le plus souvent décrite autour de 150-200 mots ; pour d'autres, elle correspond à la taille du vocabulaire d'un enfant de 8 ans (pour une revue, Vogel Sosa & Stoel-Gammon, 2006). Quoi qu'il en soit, selon ce modèle, l'organisation du lexique des jeunes enfants en groupes de voisins lexicaux serait qualitativement différente de celle des adultes : elle ne serait déterminée ni par des détails phonétiques très fins, ni par la position de ces détails car les représentations holistiques ne tiendraient pas compte de ces aspects.

Pour PRIMIR, au contraire, les détails phonétiques sont présents dès les premières représentations de mots. Ce modèle décrit un développement en trois étapes. Avant le développement du lexique, les compétences perceptives de l'enfant lui permettraient d'organiser les sons et de se représenter leur structure (développement d'une première dimension appelée *General Perceptual Plane*). Des catégories phonétiques spécifiques au langage se mettraient alors déjà en place. Elles seraient cependant très dépendantes du

contexte, ce qui ne permet pas encore de les considérer comme vraiment abstraites, au même titre que des contrastes phonologiques. Grâce à la mise en place de cette première dimension, les connaissances de l'enfant pourraient se développer sur un deuxième plan : celui des mots (*Word Form Plane*). Dans ce lexique naissant, une structure émergerait à travers les regroupements de voisins lexicaux, qui partagent des traits phonétiques. La densité du voisinage permettrait ensuite d'opérer des généralisations phonologiques à partir des mots, ce qui ferait émerger des représentations phonémiques (*Phonemic Plane*). Comme dans le modèle LMR, les représentations de la forme sonore des mots se restructuraient pendant l'enfance, mais contrairement à LMR, PRIMIR dit que les premières représentations lexicales ne sont pas holistiques et contiennent déjà des détails phonétiques.

Ce modèle prédit aussi que la composition du lexique précoce de l'enfant est en partie déterminée par les caractéristiques des traitements qu'il peut réaliser très tôt sur le plan perceptif. Or, sur ce plan, les résultats de plusieurs recherches soutiennent que les bébés sont plus sensibles aux contrastes phonétiques situés au début des mots. Jusczyk, Goodman et Baumann (1999) ont montré que la sensibilité des enfants de 9 mois à la ressemblance phonétique est plus forte au début qu'à la fin des mots. Zamuner (2009) a aussi observé que des enfants de 10 mois discriminent certains contrastes à condition qu'ils se situent au début des mots, et d'après Svingley (2005), l'encodage du début des mots est plus détaillé que celui de la fin des mots chez des enfants de 11 mois. Puisque le développement sur le plan perceptif déterminerait le développement lexical et la structure du voisinage lexical, le modèle prédit que le voisinage dans le lexique précoce devrait être plus dense en prenant en compte le début des mots plutôt que leur terminaison. La structure du voisinage lexical chez le jeune enfant serait alors de même nature que celle de l'adulte, ce qui est contraire à la prédiction du modèle LMR. Selon PRIMIR, les jeunes enfants acquièreraient plus facilement des mots qui contrastent les uns avec les autres au niveau de l'initiale, car l'information perceptive au début des mots serait plus riche et représentée plus en détail. Dans le vocabulaire adulte, la densité du voisinage suit cette règle, les voisinages les plus denses rassemblant des mots qui riment, en anglais comme en allemand ou en français (Goswami, 2002). L'étude récente de Zamuner (2009) chez des enfants anglophones de 1 an 4 mois à 2 ans 6 mois a confirmé cette prédiction : les voisinages lexicaux les plus denses rassemblent des mots qui riment. Il n'y aurait donc pas de différence qualitative entre l'organisation du lexique précoce et du lexique adulte, ce qui s'oppose à la théorie d'un passage entre des représentations lexicales holistiques vers des représentations plus détaillées au cours de la petite enfance. Le très jeune enfant disposerait déjà de représentations phonétiques, certes très dépendantes du contexte, mais suffisamment détaillées pour permettre le développement de représentations de mots d'une qualité proche de celles des plus grands. Ces résultats soutiennent donc l'hypothèse de la continuité entre les compétences précoces des enfants en perception de la parole et l'acquisition du lexique.

Mais dans quelle mesure les catégories phonétiques précoces sont-elles comparables à des représentations phonologiques abstraites au niveau des traits, telles que chez les adultes ? En quoi diffèrent-elles ?

5.3.2. Effet de la similarité phonologique graduelle chez l'enfant

Il est possible de douter du caractère abstrait des catégories phonétiques enfantines. En effet, si des enfants testés entre 14 et 23 mois sont sensibles à une erreur de prononciation n'impliquant qu'un seul trait, certains travaux montrent que leur réaction n'est cependant pas

accrue lorsque l'erreur porte sur trois traits plutôt qu'un seul, contrairement aux réactions modulées graduellement chez les adultes (Bailey & Plunkett, 2002 ; Swingley & Aslin, 2002).

Pourtant, des expériences récentes apportent des arguments favorables à une sensibilité du jeune enfant à la détérioration d'un nombre croissant de traits. L'originalité de la recherche de White et Morgan (2008) est de proposer à l'enfant une tâche sémantique à partir de paires d'objets, l'un familier, l'autre non-familier, dans un paradigme de regard préférentiel. Le nom de l'objet familier est correct, ou comporte une erreur impliquant un, deux ou trois traits. Les résultats répliquent tout d'abord à sensibilité des enfants à une détérioration impliquant un seul trait. En effet, les enfants de 19 mois regardent moins l'objet familier s'il est désigné par un nom comportant un trait phonologique incorrect que si le mot est parfaitement prononcé. Cette étude est cependant la première à montrer que la durée de fixation décroît linéairement avec le nombre de traits incorrects (i.e., 1, 2 ou 3 traits différents, dans les catégories mode, lieu et voisement). La présentation d'un objet non-familier (et non pas familier comme dans les expériences antérieures), en présence de l'objet connu mais mal nommé, offre sans doute un contexte plus proche de celui du jeune enfant apprenant les noms de nouveaux objets. L'objet non-familier, dont le nom n'est pas encore connu, pourrait plus facilement attirer l'attention de l'enfant à l'écoute d'un nom imparfait pour l'objet connu. Les enfants de cet âge disposeraient donc déjà, à un niveau infra-phonémique (celui des traits), des représentations phonologiques aussi raffinées que celles des adultes. Certains détails du dispositif expérimental (ici, la non-familiarité de l'objet concurrent) sont cruciaux pour mettre à jour cette compétence. Chez ces jeunes enfants, les traits joueraient donc déjà un rôle dans l'organisation phonologique du lexique mental. Enfin, chez des enfants plus grands mais d'âge pré-scolaire (3 ans à 4 ans et demi), Graham et House (1970) ont montré que la détection d'une différence entre deux consonnes est mieux réussie lorsqu'elle implique deux traits plutôt qu'un seul. Toutefois, au-delà de deux traits différents (jusqu'à 6 traits), le pourcentage d'erreurs ne varie plus significativement, ce qui ne permet pas vraiment de parler d'un effet graduel du nombre de traits (peut-être à cause d'un effet plafond).

Pour savoir si les catégories phonétiques initialement extraites par les jeunes enfants sont véritablement des représentations phonologiques abstraites, il convient de tester si elles représentent vraiment des traits distinctifs. Si c'est le cas, cela veut dire que l'enfant qui apprend que /d/ et /t/ sont des unités distinctes de sa langue, considère aussi que le voisement a un rôle distinctif dans cette langue pour opposer d'autres phonèmes ayant un autre lieu d'articulation (e.g., /g/ et /k/). Nous avons déjà signalé qu'à partir de la fin de leur première année, les enfants exploitent les propriétés statistiques de leur langue et l'exposition intensive à une distribution bimodale d'exemplaires de consonnes opposées quant au voisement (e.g., [da]-[ta]) facilite ensuite la discrimination entre deux autres consonnes opposées par le même trait (e.g., [ga]-[ka]) (Maye, Weiss & Aslin, 2008). Une telle familiarisation peut ainsi favoriser chez ces jeunes enfants l'extraction du trait phonologique, immédiatement généralisé et apparemment abstrait. Selon Maye et Gerken (2001), cette compétence est associée à la toute petite enfance, car l'exposition à une distribution bimodale pour le voisement à partir de deux consonnes n'est pas généralisée à d'autres couples de consonnes par des adultes (Maye & Gerken, 2001). Toutefois, d'autres travaux ont montré qu'après avoir appris un nouveau contraste dans un contexte restreint, des adultes généralisent ce qu'ils viennent d'apprendre. Ces expériences ne concernent pas des enfants, mais étudient tout de même l'acquisition de catégories phonologiques. McClaskey, Pisoni et Carrell (1983) ont ainsi entraîné des adultes anglais à distinguer trois valeurs de voisement, alors que leur langue maternelle n'en comporte que deux. Les participants ont immédiatement généralisé ces trois catégories à des consonnes

ayant un autre lieu d'articulation que celles de l'apprentissage. L'effet a été répliqué avec l'apprentissage de tons en chinois mandarin (Wang et al., 1999). Des données en potentiels évoqués confirment de telles généralisations : la MisMatch Negativity (MMN) témoigne de la capacité à discriminer les nouvelles catégories, y compris sur des consonnes pour lesquelles il n'y a pas eu d'entraînement (Tremblay, Kraus, Carrell & McGee, 1997). Cette généralisation nécessite cependant, chez l'adulte, mais apparemment pas chez l'enfant, un enseignement explicite sur le nombre de distinctions phonétiques qui doivent être apprises. La simple exposition à des exemples ne suffit pas à l'adulte pour généraliser ce qu'il apprend et donc à élaborer de véritables représentations de traits phonologiques (Maye & Gerken, 2001). La façon dont les représentations phonologiques abstraites se développent, en particulier à un niveau infra-phonémique, n'est donc pas encore élucidée.

5.3.3. Effets de similarité phonologique et types de traits

L'hypothèse jakobsonienne parlait d'un développement séquentiel des oppositions phonologiques. Pour ce qui est d'une différence de sensibilité des enfants à des changements opérés sur différents types de traits, il existe cependant encore assez peu de données.

5.3.3.1. Une préférence précoce pour le mode

Une distinction a tout de même été observée entre la sensibilité de bébés de 9 mois au partage des traits de mode et des traits de lieu d'articulation (Jusczyk, Goodman & Baumann, 1999). Les auteurs ont évalué le temps passé par les bébés à tourner leur tête du côté où ils entendaient des séries de stimuli, qui pouvaient partager ou non une caractéristique phonologique. Ils ont ainsi relevé une préférence des bébés pour des séries où les syllabes commençaient par des consonnes différentes (des occlusives sonores) qui partagent le mode d'articulation, alors que le partage du lieu d'articulation ne créait pas d'attraction particulière à cet âge. Les auteurs ont interprété cette capacité (et préférence) précoce par les caractéristiques acoustiques des indices associés à ces catégories de traits, en reprenant les remarques, déjà évoquées ici, de Stevens (1996). Selon lui, les indices acoustiques du mode sont particulièrement clairs et l'identification du lieu d'articulation dépendrait de l'identification préalable du mode. Chez des enfants plus grands, mais d'âge pré-scolaire (entre 3 ans 7 mois et 5 ans 11 mois), Storkel (2002) a utilisé une épreuve de choix forcé pour induire une classification de mots nous renseignant sur l'organisation du voisinage lexical. Lorsque ce voisinage n'est pas très dense, l'auteur montre que les enfants rapprochent les mots non seulement selon la ressemblance des consonnes initiales, mais aussi en fonction de la similarité de mode d'articulation pour la rime.

Une telle préférence pour les traits de mode n'a cependant pas été observée chez des enfants un peu plus âgés, testés il est vrai avec un dispositif expérimental plus complexe et impliquant une activité d'apprentissage lexical. En effet, White et Morgan (2008) sont les premiers à avoir montré chez des enfants de 19 mois une sensibilité graduelle au nombre de traits incorrects dans un mot pour considérer qu'il désigne ou non son référent. Toutefois, ils ne relèvent aucune différence d'effet en fonction du type de trait incorrect : pour les enfants de 19 mois, une erreur de mode, de lieu ou de voisement a le même poids, et ceci quel que soit le lieu d'articulation du nom dans sa version correcte. Les auteurs reconnaissent toutefois qu'il ne s'agit que d'une remarque *a posteriori*, car le matériel n'était pas directement destiné à tester une hypothèse à ce propos, et le choix des mots était extrêmement contraint par la nécessaire familiarité des mots pour les jeunes enfants.

Par ailleurs, selon Carter (1987), les traits de mode d'articulation seraient moins variables que les autres, aussi bien de manière intra-individuelle qu'inter-individuelle, ce qui pourrait ne pas être étranger à leur intelligibilité. Ils constituerait des indices de reconnaissance privilégiés (notamment par rapport au lieu d'articulation), à la fois fiables dans l'information d'entrée et contraignants pour le processus de reconnaissance de mot.

Accorder un statut important au mode d'articulation plutôt qu'à d'autres types de traits pourrait être un choix tout à fait approprié pour les enfants, et explicable par les caractéristiques de la langue, ici l'anglais. Le maintien de ce trait pourrait réduire l'ambiguïté quant à l'identité du phonème mais aussi du mot, augmentant ainsi la quantité d'information transmise et la qualité de la communication. Logan (1992) montre en effet que le voisinage lexical des mots des enfants entre 1 et 5 ans est peu fourni s'il est calculé à partir du partage du mode d'articulation plutôt qu'à partir d'autres types de traits. Cet effet est particulièrement net entre 1 et 3 ans, tranche d'âge normalement marquée par un rapide enrichissement lexical. Bien traiter le mode permet alors de reconnaître un mot à partir d'un voisinage peu dense, ce qui réduit les risques de confusion. C'est pourquoi une place prépondérante du mode d'articulation dans les représentations lexicales, au moins à cet âge, pourrait être tout à fait économique.

5.3.3.2. Difficultés de l'enfant pour le voisement

Pour des enfants plus âgés, les travaux de Treiman (1985, Expérience 2) montrent que les difficultés à distinguer un stimulus et une cible tendent à s'accroître s'ils diffèrent par un faible nombre de traits, sans que cet effet soit cependant significatif. Une analyse post hoc montre que la différence la moins bien perçue par les enfants est celle qui porte sur le trait de voisement. Cet effet est confirmé (Expérience 3) chez des enfants de 4 ans et 8 mois et de 5 ans-et-demi. Plus récemment, Treiman et ses collègues ont montré qu'une tâche de reconnaissance de consonnes occlusives est moins bien réussie par des enfants de 5 ans lorsque la différence devant motiver le rejet de l'item portait seulement sur le voisement, plutôt que sur le lieu ou le voisement et le lieu (Treiman, Broderick, Tincoff & Rodriguez, 1998, Expérience 1). Le résultat a été confirmé sur des fricatives (Expériences 2 et 3).

Sans parler d'une difficulté générale de discrimination pour le trait de voisement, Aslin, Pisoni, Hennessy et Perrey (1981) signalent tout de même une difficulté particulière des enfants avec celui-ci lorsqu'il oppose des occlusives bilabiales ([b] et [p]) en français comme en espagnol. Cette difficulté des enfants à traiter des différences de voisement a par ailleurs été repérée dans des épreuves de mémoire à court terme, avec notamment beaucoup de confusions entre /ga/ et /ka/ (Eimas, 1975). Des données recueillies dans une épreuve de choix forcé (même / différent) chez des enfants de 3 ans à 4 ans-et-demi montrent que la hiérarchie des traits pour ce qui est de leur intelligibilité varie cependant au cours du développement chez de petits anglophones : pour les consonnes, Graham et House (1970) montrent que le voisement et la nasalité ne sont pas les traits les mieux perçus par ces enfants, contrairement à ce qu'on observe chez les adultes. Shvachkkin (1966, cité par Graham & House, 1970) avait également montré que les enfants apprennent à distinguer les consonnes plus ou moins facilement selon les traits qui les opposent, l'opposition voisé / non-voisé étant une de celles les plus tardivement acquises. Notons par contre la stabilité de la forte intelligibilité du trait fricatif au fil du développement.

Plus récemment, en espagnol, Ortiz et al. (2007) ont comparé les performances d'un groupe d'enfants dyslexiques hispanophones avec deux groupes contrôles, l'un pour l'âge, l'autre pour le niveau de lecture : leur étude fournit donc aussi des informations sur le développement normal quant à la discrimination de lieu (e.g., /pa/-/ta/), de voisement (e.g., /

pa/-/ba/) et de mode (e.g., /ba/-/ma/). Tous les groupes s'avèrent moins précis dans leurs réponses pour le voisement que pour le lieu d'une part, et pour le voisement que pour le mode d'autre part. Ces résultats sont donc cohérents avec ceux que nous venons d'évoquer et qui soulignent les difficultés perceptives des enfants avec le voisement. Entre les groupes contrôles pour le niveau de lecture (7 ans-et-demi) et pour l'âge (10 ans), on enregistre des progrès seulement pour le mode (passage d'une discrimination de 58% à 70%) et le lieu (passage de 65% à 80% de discrimination) et pas pour le voisement (passage de 45% à 44%). Concernant la vitesse de réponse, tous les groupes sont plus lents pour le lieu que pour le voisement et le mode. En bref, le lieu est plutôt bien discriminé, mais avec lenteur. Les décisions pour le voisement sont rapides, mais ce sont aussi les moins exactes : il y a des phénomènes complexes d'échange rapidité-exactitude pour le traitement du voisement et du lieu en espagnol, ce qui ne permet pas de parler d'une relation hiérarchique claire entre les deux types de traits. En revanche, le traitement du mode est un peu moins exact que celui du lieu, mais davantage que celui du voisement, et il est très rapide (autant que celui du voisement, et plus que celui du lieu), ce qui le place en bonne position, de manière générale, dans la hiérarchie de ces trois types de traits, pour ce qui est de la discrimination chez l'enfant. Sa prédominance est néanmoins moins évidente qu'elle ne le sera chez l'adulte, et ce statut privilégié du mode se consolide avec le temps.

Lorsqu'il s'agit d'épeler des mots, Treiman (1993) a aussi montré que des enfants au début de l'apprentissage de la lecture font beaucoup d'erreurs portant sur le voisement des consonnes, alors que les consonnes erronées produites sont en général correctes du point de vue du mode d'articulation et du lieu. Les erreurs de voisement vont d'ailleurs persister chez des enfants plus âgés présentant des difficultés avec l'apprentissage de la lecture (Kibbel & Miles, 1994). Lorsque Rack, Hulme, Snowling et Wightman (1994) ont tenté d'apprendre à des enfants de 5 ans à lire à haute voix des non-mots tels que « dbl » en les prononçant comme le mot « table » (différence de voisement pour l'initiale), cette tâche s'est avérée plus facile que si le non-mot proposé était « plb » (différence de lieu pour l'initiale). Cela souligne encore la faible fiabilité des oppositions basées sur le voisement chez les enfants.

L'ensemble de ces résultats suggère que le voisement est un trait moins saillant que le lieu pour les enfants, sa place pourrait être moins importante que celle d'autres traits dans leur système de représentations phonologiques. Treiman et al. (1998) interprètent ces données en reprenant la distinction proposée par Clements et Hume (1985) et que nous avons évoquée plus haut, entre des traits de type laryngés (voisement et aspiration) d'une part, et des traits rassemblés sous le nœud de la cavité orale (traits de lieu et de mode d'articulation). Cette dernière catégorie rassemblerait des traits phonologiques plus saillants pour les enfants avant l'apprentissage de la lecture et poserait moins de problème au début de cet apprentissage.

5.3.3.3. Vulnérabilité du lieu d'articulation dans les systèmes phonologiques atypiques

L'étude de certaines pathologies du développement du langage nous apprend que la hiérarchie des types de traits est perturbée chez des enfants atteints de troubles phonologiques. Une recherche portant sur les erreurs de production d'enfants atteints d'une dyspraxie verbale révèle que les traits les plus fréquemment incorrects relèvent du lieu d'articulation, plutôt que du mode ou du voisement (Thoonen, Maassen, Gabreëls & Schreuder, 1994). La même vulnérabilité des traits de lieu est observée chez des enfants américains parlant anglais et souffrant de troubles phonologiques importants, mais sans

apraxie verbale ni véritable déficit en réception (Forrest & Morrisette, 1999). Dans une épreuve de production de noms à partir d'images, ils ont commis beaucoup d'erreurs et le type de trait le moins bien maintenu est le lieu. De plus, le trait de voisement est le mieux retenu dans les productions de ces patients, ce qui permet de décrire chez eux la hiérarchie suivante : le voisement est le mieux maintenu, viennent ensuite les traits de mode, puis ceux de lieu d'articulation. De plus, parmi ces patients, ceux dont les connaissances phonologiques sont les mieux développées sont aussi ceux qui maintiennent moins les traits de lieu, au profit des traits de mode. Les auteurs concluent que le développement phonologique des enfants pourrait bien être marqué par une modification progressive de la hiérarchie entre les trois types de traits, l'évolution vers un système phonologique sophistiqué étant associée à une représentation de plus en plus forte des traits de mode, avec un poids de moins en moins important pour les traits de lieu, alors que la production du voisement resterait plutôt stable au fil de l'acquisition.

5.3.3.4. Inversion de la hiérarchie voisement / mode dans les productions enfantines

Nous avons vu qu'en perception de la parole, les enfants se caractérisent par des difficultés pour le voisement, que l'on ne retrouvera plus chez l'adulte. En production de la parole, la hiérarchie des traits n'est pas non plus la même chez les enfants et les adultes. Elle semble marquée chez l'enfant par une meilleure efficacité pour le voisement que pour le mode, ce qui peut paraître paradoxal étant donné les difficultés des enfants pour la perception du voisement.

Dans une recherche sur les erreurs de production d'enfants de 1 an 7 mois à 6 ans, Jaeger (1992) a observé une majorité d'erreurs impliquant une substitution ou un échange de phonèmes, ce qui suppose une organisation segmentale des représentations phonologiques de ces enfants. Dans des travaux antérieurs, ils avaient déjà observé que les erreurs des enfants portant sur un seul trait permettaient de placer les traits sur une échelle qui n'est pas la même que celle des adultes. La structure du système phonologique subirait ainsi des changements au fil du développement. A partir d'un corpus de 366 erreurs de substitution pour des consonnes, ils montrent l'importance de la similarité en termes de traits phonétiques partagés. Ils observent que les erreurs les plus fréquentes impliquent un seul trait (61% des erreurs à 1 an, 46% à 2 ans, 56% à 3 ans, 53% à 4 ans et 60% à 5 ans), et la moyenne du nombre de traits impliqués dans les erreurs est statistiquement inférieure à ce qu'aurait pu déterminer le hasard. Nous avions vu que, chez les adultes, les erreurs par substitution de phonèmes impliquaient généralement peu de traits. Jaeger (1992) note que ce phénomène est encore plus net chez les enfants. Pour ce qui est de la hiérarchie des types de traits, sur l'ensemble des enfants, les traits les plus impliqués dans les erreurs sont les traits de lieu (75% des erreurs), puis viennent les erreurs impliquant les traits de mode, continu (33%) et fricatif (27%), viennent ensuite les erreurs de voisement (20%) et enfin les erreurs sur le trait nasal (14%). Chez ces jeunes enfants, les traits de lieu semblent ici les plus vulnérables. L'auteur rapproche ses données de celles obtenues par Van den Broecke et Goldstein (1980) dans une étude similaire chez des adultes. L'échelle allant des traits suscitant le moins d'erreurs à ceux qui en provoquent le plus est Voisement > Mode > Lieu pour les enfants, mais elle est Mode > Voisement > Lieu pour les adultes. Le statut particulièrement robuste des traits de mode chez l'adulte semble donc s'établir au cours de l'enfance. Jaeger (1992) suggère que le voisement est un principe d'organisation phonétique plus important chez l'enfant que chez l'adulte, qui lui préférera le mode d'articulation. Dans son étude à propos du phénomène de 'langue qui a fourché', cet auteur a également montré que les substitutions de lieu étaient les erreurs les plus

fréquentes à la fois chez les adultes et chez les enfants de 1 an 7 mois à 6 ans ; mais les enfants ont fait moins d'erreurs de voisement que les adultes ce qui suggère, ici encore, un rôle plus important du voisement en tant que critère d'organisation chez les enfants.

En bref, les enfants de quelques mois présentent déjà une forte sensibilité à des variations impliquant des traits phonologiques, mais celle-ci ne s'apparente à une compétence linguistique que dans la deuxième partie de la première année. A partir de leur deuxième année, les enfants sont sensibles à des erreurs de prononciation de mots portant sur un seul trait phonologique et leurs réactions s'accroissent avec le nombre de traits déviants, pour peu qu'ils soient testés avec des dispositifs expérimentaux adaptés aux jeunes enfants. L'établissement de représentations phonologiques détaillées au niveau infra-phonémique se manifeste en particulier dans des situations apparentées à l'apprentissage lexical. L'organisation des traits phonologiques en types de traits hiérarchisés, difficile à cerner chez l'adulte, est encore plus mal connue chez l'enfant. Les données sont encore parcellaires et éparses à ce sujet. Le développement de cette hiérarchie semble complexe, il ne se fait apparemment pas tout à fait au même rythme pour la perception et pour la production. Le développement d'un système phonologique efficace semble néanmoins marqué par une tendance à accorder une importance majeure au mode d'articulation, la relation hiérarchique entre le voisement et le lieu d'articulation étant moins stable, comme c'est également le cas à travers les études chez l'adulte.

5.4. Aspects tardifs du développement de l'organisation phonologique des enfants

Certains travaux montrent que des enfants relativement âgés, jusqu'à 8 ans, commettent encore des erreurs dans des épreuves de discrimination phonémique, que celles-ci proposent des tâches de sélection d'image ou de jugement de similarité phonologique (pour des enfants de 2 ans, Eilers & Oller, 1976 ; Stager & Werker, 1997).

Nous avons vu que des procédures expérimentales parfois mal adaptées aux capacités mnésiques ou attentionnelles des enfants pouvaient en partie expliquer des difficultés apparentes à utiliser des représentations phonologiques détaillées, en particulier chez les enfants avant 2 ans. Pour ce qui est des enfants plus grands, mais d'âge pré-scolaire, l'immaturité des capacités métaphonologiques avant l'apprentissage de la lecture pourrait aussi expliquer en partie leurs difficultés dans des épreuves visant à apprécier l'organisation de leurs représentations phonologiques. La catégorisation perceptive étonnamment faible relevée chez les enfants dans les épreuves d'identification et de discrimination classiquement proposées aux adultes pourrait en partie s'expliquer par une difficulté à comprendre des consignes impliquant une manipulation délibérée des phonèmes, et une faible habitude de focaliser consciemment leur attention sur de telles unités, avant d'être confrontés à l'apprentissage de la lecture. Il est en tout cas difficile de recueillir les indices d'une perception catégorielle des phonèmes chez de jeunes enfants.

Par exemple, Bogliotti, Messaoud-Galus et Serniclaes (2002) ont utilisé un continuum /do/-/to/, en faisant varier le VOT de syllabes naturelles de -50 ms à +50 ms. Dans une tâche d'identification, les enfants de 10 ans réussissent la tâche et seuls les stimuli les plus ambigus (situés à la frontière catégorielle) ne permettent pas de réponse tranchée. Par contre, les enfants de 5 ans ne parviennent pas à faire la différence entre /do/ et /to/, et répondent /to/ dans 60% des cas, quel que soit le stimulus. De même, dans une tâche de discrimination portant sur le même matériel, seuls les enfants de 10 ans présentent un pic de discrimination pour les stimuli situés à la frontière phonologique en français, alors

que les enfants de 5 ans répondent au hasard. Dans cette étude, les réponses des enfants pré-lecteurs ne reflètent donc pas de véritable traitement catégoriel des phonèmes. Pour les auteurs, cela suggère que les enfants ne perdent pas vraiment la capacité à traiter des différences phonétiques fines dans la première année de leur vie, mais modifient leur mode de traitement qui devient linguistique. La mise en place de compétences phonologiques, spécialisées dans le traitement des frontières présentes dans la langue maternelle, ne ferait pas totalement disparaître le niveau de traitement phonétique se rapportant aux frontières auditives naturelles. Toutefois, il est vraisemblable que l'apprentissage réussi de la lecture est associé à une modification de l'équilibre entre ces deux compétences, au profit de traitements phonologiques précis des phonèmes de la langue. Cela serait en tout cas cohérent avec les données de Nittrouer et Miller (1997) : les enfants de 7 ans réalisent la catégorisation de phonèmes d'une manière plus proche de celle des adultes que les enfants de 4 ans.

En ce qui concerne la période qui suit le début de l'apprentissage de la lecture, les différences entre les profils de performances des enfants (ou adolescents) et des adultes peuvent moins largement s'expliquer par une difficulté à manipuler délibérément les représentations phonologiques (capacités métaphonologiques), puisque ces compétences se développent en association avec l'entrée dans l'écrit. Pourtant, quelques données montrent que l'organisation détaillée des représentations phonologiques évolue encore jusqu'au milieu de la deuxième décennie d'un individu, même en dehors de toute difficulté d'apprentissage de la lecture. Certains travaux montrent en effet qu'une frontière catégorielle marquée n'est pas systématiquement observée chez les enfants. Dans une étude portant sur des participants de 6 à 12 ans et demi, Hazan et Barrett (2000) ont observé que la tâche d'identification de phonème, réalisée à travers un choix forcé entre deux réponses, est de mieux en mieux réussie entre ces deux âges. Cependant, les réponses des enfants de 12 ans et demi ne reflètent pas encore des catégories phonémiques aussi stables que celles des adultes, aussi bien lorsque la différence repose sur un contraste de lieu d'articulation (/d/-/g/, /s/-/ʃ/), que sur le voisement (/g/-/k/, /s/-/z/). En français, Simon et Fourcin (1978) ont également observé, entre 2 et 14 ans, une amélioration de la catégorisation de stimuli dont le VOT varie de manière continue. D'après leur étude, les enfants anglophones ne donneraient des réponses témoignant d'une perception catégorielle des phonèmes que vers 5-6 ans, et les enfants francophones seulement 2 ans plus tard. Serniclaes et al. (2004) ont aussi montré un effet de l'âge sur la perception catégorielle chez des enfants dotés d'un niveau de lecture normal. Le développement d'une compétence à catégoriser les phonèmes sur un mode adulte semble particulièrement long, puisque Flege et Eefting (1986) ont montré des différences significatives quant à la netteté des frontières catégorielles de phonèmes entre 9 ans et 17 ans, mais aussi entre 17 ans et l'âge adulte.

De plus, lorsqu'elle existe chez l'enfant, la réponse catégorielle ne se fait pas selon des critères identiques à ceux des adultes. Flege et Eefting (1986) montrent ainsi que, en anglais comme en espagnol, la frontière catégorielle pour les enfants de 8 à 10 ans correspond à une durée de VOT plus courte que pour les adultes et cette différence existe encore à 17 ans. Williams (1979) observe aussi ce changement progressif du VOT correspondant à la frontière catégorielle, entre 8 et 16 ans.

La perception catégorielle des phonèmes par les enfants est souvent étudiée à propos du voisement, et il se peut que l'immaturité de la configuration de leurs résultats soit particulièrement marquée pour ce type de trait. Dans une recherche conduite auprès d'enfants de 3, 5 et 7 ans, Nittrouer (1992) montre qu'ils se distinguent des adultes en

accordant un poids particulièrement fort aux indices acoustiques dynamiques (transitions de formants), par rapport aux indices spectraux, plus 'statiques'. Les résultats de Nittrouer et Miller (1997) confirment que, contrairement aux adultes, les enfants accordent plus de poids aux transitions formantiques, qu'aux caractéristiques statiques du signal, comme les caractéristiques spectrales associées au bruit de friction (caractéristiques qui n'impliquent pas de changement spectral au cours du temps) pour catégoriser les consonnes fricatives /s/ et /ʃ/. Cette préférence va s'atténuer entre 4 et 7 ans. Par ailleurs, les enfants ne modulent pas encore cette préférence en fonction du contexte vocalique, comme le feront les adultes. Ainsi, chez les enfants de 4 et 7 ans, le traitement catégoriel des consonnes n'est pas encore influencé par une connaissance précise de la façon dont l'environnement module la quantité d'information apportée par les différents types d'indices acoustiques.

Au cours de l'enfance, les réponses semblent devenir de plus en plus catégorielles, de manière générale. Ce développement serait cependant particulièrement lent pour certains contrastes phonologiques dit 'fragiles', parce qu'ils sont peu représentés dans les langues du monde (idée soutenue par Jakobson) et sont peu expérimentés par l'enfant, et/ou parce que leurs indices acoustiques sont moins saillants que ceux des contrastes 'robustes' (Burnham, 1986). Une connaissance véritablement linguistique serait acquise plus tôt par les enfants pour les phonèmes les plus fréquents (Anderson, Morgan & White, 2003), car cette acquisition dépendrait d'un apprentissage statistique (Maye et al., 2008). Selon l'hypothèse développée par Flege, les principales propriétés acoustiques des exemplaires typiques des catégories phonémiques, ainsi que le poids qu'il convient d'accorder à chacun de ces indices, prendrait du temps à se développer pendant les années d'âge scolaire (Walley & Flege, 1999).

L'incapacité à se baser sur les seuls traits nécessaires à l'identification des phonèmes pourrait aussi caractériser le traitement phonologique des enfants et expliquer leurs difficultés dans les tâches de perception catégorielle. Une expérience de catégorisation phonémique pour des couples de consonnes occlusives ou des couples de fricatives se différenciant par le lieu ou le voisement a permis à Hazan et Barrett (2000) de comparer les réponses d'enfants de 6 à 12 ans à celles d'adultes. Les tests d'identification imposaient un choix forcé entre deux réponses. Ils ont tout d'abord montré que le changement dans le choix de catégorie phonémique est véritablement abrupt sur le continuum des stimuli seulement après 10 ans, ce qui est cohérent notamment avec les données de Bogliotti et al. (2002) que nous avons évoquées. De plus, la courbe de réponse des enfants de 12 ans n'est pas encore celle des adultes : les réponses sont encore particulièrement peu cohérentes pour les stimuli les plus ambigus. Enfin, les expérimentateurs ont détérioré certains indices acoustiques, un à un, dans les stimuli présentés. Pour le voisement comme pour le lieu d'articulation, différents indices peuvent contribuer à l'identification du trait. La suppression d'un seul d'entre eux n'empêche donc pas de réaliser la tâche. Toutefois, les enfants de 6 à 12 ans sont beaucoup plus perturbés que les adultes par la réduction des indices disponibles et leurs réponses perdent leur cohérence si ces indices sont limités. Cela suggère que les stratégies perceptives des enfants sont moins flexibles que celles des adultes, et les auteurs pensent que leur vulnérabilité à la suppression de certains indices montre qu'ils se basent davantage que les adultes sur des ensembles intégrés de traits. Cela pourrait contribuer à expliquer par exemple leur plus grande vulnérabilité au bruit dans les tâches de perception de la parole (Elliot, 1979). Les enfants restent longtemps plus vulnérables au bruit que les adultes pour l'identification des consonnes dans des pseudo-mots, et il faut attendre l'âge de 15 ans pour observer des performances qui ne se distinguent plus de celles des adultes (Johnson, 2000). Le bruit laisserait passer certains traits, qui suffiraient aux adultes mais romprait l'unité des indices, importante pour les enfants.

Cette faiblesse de cohérence dans l'identification de phonèmes chez les enfants peut être rapprochée de leurs faibles compétences dans des activités verbales impliquant des connaissances phonologiques fiables. Ainsi, les productions verbales des enfants témoignent d'une variabilité intra-individuelle plus forte que celle des adultes, entre 5 et 14 ans, tant du point de vue des aspects temporels que des aspects spectraux, sans doute en lien avec le développement du tractus vocal (Lee, Potamianos & Narayanan, 1999), mais aussi avec la relative imprécision de leurs représentations phonologiques.

Dans nos précédentes expériences, les effets de similarité phonétique en lecture ont été évalués en manipulant seulement la ressemblance de voisement, et nous proposons ici dans cette thèse des expériences manipulant la ressemblance phonétique avec d'autres catégories de traits phonétiques, comme le mode et le lieu (chapitre 3, parties 4 et 5), permettant de faire émerger une certaine organisation hiérarchique des catégories de traits phonétiques. En effet, une autre partie de notre travail expérimental consiste à étudier la pertinence de la notion de catégories de traits et sa hiérarchie dans des tâches impliquant d'autres contraintes, métalinguistiques.

6. Troubles phonologiques et phonétiques chez les enfants dyslexiques

6.1. Définition de la dyslexie développementale

La dyslexie développementale est définie comme un trouble durable de l'apprentissage du langage écrit, en dépit de capacités intellectuelles normales, d'une absence de troubles psychiatriques ou neurologiques, d'un milieu socio-culturel normalement stimulant et d'une scolarisation adéquate. Ce trouble, diagnostiqué à partir d'un retard de lecture de 18 à 24 mois après l'entrée en CP, reflète un dysfonctionnement du système cognitif responsable de la lecture. La dyslexie concerne 8 à 10% des enfants scolarisés et persiste durant toute la vie de l'individu, ce malgré une motivation normale.

Les dyslexies développementales doivent être distinguées des dyslexies acquises qui sont la conséquence de lésions cérébrales. Néanmoins, les zones cérébrales lésées induisant une perte des capacités de lecture chez l'adulte pourraient être les mêmes que celles faisant l'objet de malformations ou de dysfonctionnements chez l'enfant. La plupart des dyslexiques commettent souvent les mêmes types d'erreurs : ils confondent les lettres morphologiquement similaires (telles que p et q, b et d) et font des erreurs visuelles au niveau des mots. Ils ont des difficultés à apprêhender les mots dans leur globalité et utilisent donc souvent une stratégie de devinement. Ils connaissent également des difficultés avec les règles grapho-phonémiques (notamment pour les clusters de lettres complexes) les amenant souvent à inverser des lettres, voire même des syllabes. La dyslexie est parfois accompagnée d'autres troubles tels que des troubles du langage oral (dysphasie), du langage écrit (dysorthographie), de la mémoire immédiate, de la coordination motrice, ou encore des traitements visuo-spatiaux. Peuvent également s'ajouter une dyscalculie ou un trouble attentionnel avec ou sans hyperactivité.

6.2. Les grandes formes de dyslexie développementale

Comme nous l'avons décrit plus haut, d'après le modèle de la double voie (Coltheart, 1978), les lecteurs experts utilisent deux procédures : la voie lexicale (par adressage) et la voie extra-lexicale (par assemblage). La procédure lexicale, automatique, implique d'utiliser la représentation orthographique d'un mot pour récupérer les représentations phonologiques (et sémantiques) associées stockées dans le lexique mental. En revanche, la procédure extra-lexicale utilise les connaissances concernant la correspondance entre les unités orthographiques et phonologiques infra-lexicales, connaissances souvent décrites comme des règles de conversion graphèmes-phonèmes.

Deux types de dyslexie sont ainsi distinguées : l'une phonologique et l'autre de surface. Les dyslexiques phonologiques présentent des difficultés à apprendre les règles de conversion graphèmes-phonèmes, ce qui se traduit par un déficit de la voie extra-lexicale. Ils parviennent à lire les mots familiers, mais ont d'importantes difficultés pour les pseudo-mots et présentent des déficits en conscience phonologique, c'est-à-dire pour manipuler et segmenter les phonèmes. Ils souffrent également de dysorthographie et commettent peu d'erreurs phonologiquement plausibles.

Les dyslexiques de surface montrent quant à eux une détérioration de la voie lexicale. Ils sont donc capables de lire les mots réguliers ou les pseudo-mots, mais présentent de grandes difficultés pour les mots irréguliers. Ils commettent par ailleurs beaucoup d'erreurs sur les petits mots (e.g., qui, que), et souffrent d'une forte dysorthographie accompagnée, à l'inverse des dyslexiques phonologiques, de nombreuses erreurs phonologiquement plausibles. Souvent, leurs troubles sont interprétés comme des déficits plutôt visuels avec d'importantes difficultés à avoir une vision globale des mots, ou comme des troubles attentionnels.

Cependant, peu de dyslexiques correspondent strictement à la description de ces deux catégories (phonologique ou de surface) : les formes mixtes représentent plus de 60% des cas. Il faut de plus noter que les difficultés des dyslexiques pour une même forme (phonologique, de surface ou mixte) montrent eux-mêmes une très grande variabilité (Joanisse, Manis, Keating & Seidenberg, 2000).

Le modèle de la double voie de Coltheart n'est pas le seul à pouvoir rendre compte des différentes formes de dyslexie. Le modèle de la double voie révisée (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001) ou des modèles à voie unique comme le modèle interactif de résonance de Bosman et Van Orden (1998) permettent également de simuler ces grands types de dyslexies.

6.3. Hypothèses sur les mécanismes cognitifs responsables de la dyslexie développementale

Les difficultés rencontrées par les enfants dyslexiques ont été mises en lien avec des déficits fondamentaux, relevant soit des traitements sensoriels (vision ou audition), soit des mécanismes attentionnels, soit des représentations et des traitements phonologiques. Ainsi, ces quinze dernières années, les recherches neuroscientifiques ont exploré cinq théories différentes pour tenter d'expliquer les mécanismes défectueux en dyslexie : la théorie du déficit visuel, celle du déficit du traitement temporel, celle du déficit phonologique, celle du déficit visuo-attentionnel, et enfin l'hypothèse cérébelleuse.

6.3.1. Théorie du déficit phonologique

6.3.1.1. Fondements de la théorie phonologique de la dyslexie

Le fondement de la théorie phonologique est que la lecture est avant tout une activité langagièrre. Cette théorie part également du constat que la langue écrite, qui s'est mise en place après la langue orale dans la phylogénèse se met également en place après la langue orale dans l'ontogenèse. Il n'est donc pas surprenant que l'enfant s'appuie d'abord sur ce qu'il connaît – son langage oral – pour apprendre à lire, ce d'autant plus que, dans une écriture alphabétique, le recours au décodage grapho-phonémique est peu coûteux pour la mémoire : il suffit en effet de mémoriser un nombre limité d'associations régulières entre graphèmes et phonèmes, plus quelques exceptions, pour lire. De nombreux enfants apprennent à lire en recourant à un tel système, y compris en chinois.

Dans une écriture alphabétique, l'identification des mots écrits peut être réalisée soit par le décodage, qui s'appuie sur les correspondances grapho-phonémiques, soit par la procédure lexicale, qui s'appuie sur les représentations de mots. La procédure lexicale n'est pas une procédure visuelle globale, ni une procédure purement visuelle. En effet, cette procédure ne s'appuie pas sur la silhouette des mots écrits (leur forme globale) mais qui consiste à identifier toutes les lettres en parallèle et à coder leur emplacement relatif. Elle permet au lecteur expert d'avoir accès au code orthographique du mot, mais aussi à son code phonologique et sémantique. Le décodage quant à lui ne renvoie pas seulement à la lecture laborieuse du débutant : le lecteur expert peut en effet identifier en quelques centaines de millisecondes des mots qu'il ne connaît pas encore sous leur forme orthographique (les noms des rues, des stations de bus ou de métro...). Ce qui caractérise l'enfant dyslexique, c'est justement une sévère difficulté de mise en oeuvre – et d'automatisation – du décodage. En effet, le dyslexique a souvent des difficultés pour mettre en relation les graphèmes avec les phonèmes. Après avoir montré que ce déficit est fiable, nous examinerons les explications proposées par la théorie phonologique, tout en tenant compte le plus possible des explications alternatives (pour une synthèse en français, Sprenger-Charolles & Colé, 2003).

6.3.1.2. Déficit de la procédure d'assemblage : un trouble largement répandu chez les dyslexiques

Les études portant sur le déficit de la procédure d'assemblage indiquent que les performances de groupes de dyslexiques sont particulièrement déficitaires en lecture de pseudo-mots, c'est-à-dire quand les stimuli ne peuvent être lus qu'en s'appuyant sur les règles de correspondances grapho-phonémiques, ce qui implique de bonnes compétences phonologiques. Un déficit de cette procédure de lecture a été relevé dans pratiquement toutes les études examinées, y compris lorsque les enfants dyslexiques sont comparés à des enfants contrôle plus jeunes qu'eux, mais de même niveau de lecture (voir les revues de Rack et al., 1992 et de Van IJzendoorn & Bus, 1994). Ce n'est pas le cas pour le déficit de la procédure lexicale de lecture (voir la méta-analyse de Metsala et al., 1998).

Selon la langue, le déficit de la procédure d'assemblage peut néanmoins s'exprimer différemment. Il est plus notable quand les dyslexiques sont confrontés à une langue dont l'écriture est peu transparente au niveau des relations grapho-phonémiques (par exemple, en anglais comparativement au français, à l'allemand, ou à l'italien : Lindgren et al., 1985 ; Landerl et al., 1997 ; Paulesu et al., 2001). Enfin, dans les langues qui ont une orthographe transparente, ce déficit se manifeste principalement par la lenteur de la lecture de pseudo-mots (en français : Casalis, 1995 ; Sprenger-Charolles et al., 2000 ; Casalis, 2003 ; Grainger et al., 2003 ; en allemand : Wimmer, 1993 ; Wimmer, 1995 ; Landerl et al., 1997 ; Ziegler et al., 2003 ; en espagnol : Jimenez-Gonzalez & Valle, 2000) et non par la précision de la réponse

comme en anglais (Landerl et al., 1997 ; Ziegler et al., 2003). Ces résultats signalent que, lorsque l'orthographe est transparente par rapport à la langue orale, les dyslexiques arrivent à associer les graphèmes aux phonèmes correspondants, cette opération étant toutefois coûteuse en temps, ce qui témoigne du fait qu'il ne s'agit pas d'un automatisme chez eux, à la différence de ce qui est relevé chez les lecteurs experts.

Ces différentes données montrent bien la constance du déficit de la procédure phonologique de lecture des dyslexiques, mais ne permettent toutefois pas de se prononcer sur la proportion des individus qui, à l'intérieur d'un groupe de dyslexiques, souffrent vraiment d'un tel déficit. Les études qui ont évalué la prévalence de ce type de déficit l'ont en général fait en partant des profils de dyslexie. Dans ce domaine, on distingue traditionnellement les dyslexiques phonologiques, qui souffrent d'un déficit spécifique de la voie phonologique, les dyslexiques de surface, qui souffrent essentiellement de difficultés de mémorisation et d'utilisation de la forme orthographique des mots (la voie lexicale), et les profils mixtes, qui ont un double déficit.

Comme l'indiquent les études de cas multiples, les habiletés phonologiques de lecture des dyslexiques phonologiques sont généralement plus faibles que celles d'enfants plus jeunes mais de même niveau de lecture. Ce n'est pas le cas pour les habiletés lexicales de lecture des dyslexiques de surface (en anglais : Castles et Coltheart, 1993 ; Manis et al., 1996 ; Stanovich et al., 1997 ; en français : Génard et al., 1998 ; Sprenger-Charolles et al., 2000). D'après la méta-analyse de Bryant et Impey (1986), ces résultats reproduisent ceux relevés dans les études de cas uniques de dyslexiques phonologiques (Snowling et al., 1986 ; Temple & Marshall, 1983 ; Valdois et al., 2003). Cela suggère que la trajectoire développementale des dyslexiques phonologiques est qualitativement déviant (ils ne souffrent pas d'un simple retard d'apprentissage), alors que celle des dyslexiques de surface ne l'est pas nécessairement.

Des déficits phonologiques ont même très souvent été rapportés dans les études de cas uniques de dyslexie de surface (par exemple, Coltheart et al., 1983, selon l'analyse de Bryant & Impey, 1986 ; Valdois et al., 2003), comme dans la plupart des études de cas multiples (par exemple, Seymour, 1986 ; Sprenger-Charolles et al., 2000 ; Jimenez-Gonzalez & Ramirez-Santana, 2002 ; Zabell & Everatt, 2002). Dans de tels cas, les déficits phonologiques ne sont pas majeurs, mais sont tout de même relevés principalement en lecture de pseudo-mots, ainsi que dans des tâches d'analyse ou de mémoire phonologique et de dénomination rapide. Il est donc difficile de soutenir que les compétences phonologiques des dyslexiques de surface sont totalement préservées. Enfin, la seule étude dans laquelle les performances des dyslexiques ayant un profil mixte (et donc un double déficit) ont été finement examinées (Stanovich et al., 1997), signale que les capacités phonologiques de ces dyslexiques sont aussi fortement détériorées que celles des dyslexiques phonologiques.

Dans l'ensemble, le déficit de la procédure phonologique de lecture est robuste et prévalent. Il correspondrait à une déviance développementale et non à un simple retard d'apprentissage.

6.3.1.3. Déficit d'analyse phonologique et/ou déficit d'accès au lexique phonologique

La théorie phonologique « classique » explique les difficultés sévères rencontrées par les dyslexiques en lecture de mots nouveaux par la faiblesse de leurs habiletés phonologiques en dehors de la lecture, entre autres, en analyse phonémique de la parole et en mémoire

à court terme phonologique. Ainsi, les dyslexiques sont particulièrement déficitaires dans des tâches de perception de parole lorsqu'il s'agit de supprimer soit le premier phonème, soit l'attaque d'une syllabe (Bruck & Treiman, 1990). L'étude de Bruck et Treiman porte ainsi sur un aspect particulier de la phonologie anglaise assez problématique pour les enfants : les clusters comme /fl/ et /sp/ apparaissant en début de mots. D'après eux, ces clusters, bien qu'ils contiennent deux phonèmes, fonctionnent comme des unités individuelles, et les enfants dyslexiques ont du mal à accéder aux phonèmes individuels dans les épreuves de conscience phonologique, et à se les représenter en épellation. Temple et ses collaborateurs (2001) ont aussi montré que les enfants dyslexiques étaient particulièrement peu performants pour effectuer des jugements phonologiques (jugements de rimes) comparés aux enfants normo-lecteurs. Aujourd'hui, la plupart des auteurs s'accordent pour dire que, chez les dyslexiques, la conscience phonologique, pré-requis à l'apprentissage de la lecture, est affaiblie, constituant ainsi le déficit essentiel de la dyslexie.

L'entraînement à la conscience phonologique est cependant possible, et faciliterait l'apprentissage de la lecture. A ce propos, Lundberg et ses collaborateurs (1988) ont clairement démontré que les enfants précédemment entraînés à des exercices de métaphonologie amélioraient à terme leurs compétences en lecture. Des déficits dans ces deux domaines d'analyse et de mémoire phonologique peuvent entraver la mise en place du décodage vu que, pour utiliser cette procédure, il faut d'abord mettre en correspondance les unités infra-lexicales de l'écrit (les graphèmes), avec les unités correspondantes de l'oral (notamment les phonèmes). Il faut ensuite assembler les unités résultant du décodage pour accéder aux mots. La première opération nécessite des habiletés d'analyse phonémique, la seconde implique la mémoire phonologique à court terme. Un enfant dont le code phonologique serait trop imprécis pour permettre d'extraire les phonèmes et souffrant en plus d'un déficit mnésique devrait difficilement pouvoir utiliser le décodage (Liberman et al., 1982 ; Mann & Liberman, 1984 ; McDougall et al., 1994 ; Scarborough, 1998). Le déficit de lecture des mots nouveaux proviendrait donc d'un trouble cognitif spécifique, de nature phonologique (Snowling, 2000).

Plus récemment, des déficits de précision, et surtout un ralentissement de l'accès au lexique a été décrit chez les dyslexiques (Bowers & Wolf, 1993 ; Wolf & Bowers, 1999 ; Wolf et al., 2000 ; Wolf et al., 2002). Partant de ce constat, certains auteurs considèrent deux sources indépendantes à l'origine des déficits en lecture des dyslexiques, l'une reliée aux compétences d'analyse et de mémoire phonologique (généralement évaluées par la précision de la réponse), l'autre reliée à l'accès lexical, généralement évaluée par le temps de réponse dans des tâches de dénomination rapide (*Rapid Automatic Naming*, ou RAN) d'items très fréquents : images d'objet (une table, un ballon...), ou de couleur (rouge, bleu...), suites de nombres ou de lettres. Ainsi, des études dans lesquelles des lecteurs à risque pour l'apprentissage de la lecture et des lecteurs contrôle sans difficulté particulière ont été suivis pendant plusieurs années, depuis une période précédant l'apprentissage de la lecture, indiquent aussi que les prédicteurs les plus fiables de cet apprentissage sont les capacités d'analyse et de mémoire phonologiques ainsi que celles de dénomination rapide. C'est ce qui ressort de la méta-analyse de Scarborough (1998), qui a porté sur 61 études incluant plus de 30 enfants suivis pendant un à trois ans depuis un âge se situant entre 4 ans-et-demi et 6 ans. Dans cette perspective, la combinaison de ces deux déficits serait particulièrement perturbante pour l'apprentissage de la lecture.

L'hypothèse phonologique s'appuie sur le fait que des déficits phonologiques ont été observés de façon assez générale dans les études de groupe sur la dyslexie (Snowling, 2000). De plus, toutes les recherches qui ont examiné en même temps l'hypothèse

phonologique et les hypothèses alternatives signalent que les dyslexiques souffrent tous d'un déficit phonologique, sans qu'il s'accompagne forcément d'un déficit auditif, visuel ou moteur (Wimmer et al., 1998 ; Schulte-Körne et al., 1998, 1999 ; Wimmer et al., 1999 ; Rosen & Manganari, 2001 ; Chiappe et al., 2002 ; Share et al., 2002 ; Ramus et al., 2003a, 2003b). Par exemple, dans une étude longitudinale, un groupe de 20 dyslexiques recrutés parmi une cohorte de plus de 500 enfants a été suivi depuis les toutes premières étapes de l'apprentissage de la lecture jusqu'à l'âge de 14 ans (Kronbichler et al., 2002). À cette époque, ils ont passé une large batterie de tests phonologiques, ainsi que d'autres épreuves permettant d'évaluer leurs capacités visuelles et auditives. Les performances des dyslexiques, en tant que groupe, sont déficitaires uniquement dans des tâches phonologiques : répétition de pseudo-mots, analyse et mémoire phonologique. D'autres études indiquent que les dyslexiques ayant des troubles visuels ont également des déficits phonologiques (Borsting et al., 1996 ; Cestnick & Coltheart, 1999 ; Slaghuis & Ryan, 1999). Telle que présentée par Fawcett et al. (1996) ou encore par Nicolson et al. (2001), la théorie cérébelleuse (voir paragraphe 6.3.5. de ce chapitre 1) explique ce phénomène en supposant que le déficit est présent très précocément, dès la naissance, et qu'il interfère avec la mise en place normale des aptitudes auditives et articulatoires nécessaires à la constitution du système phonologique, comme avec les aptitudes visuelles telles que les mouvements oculaires et la reconnaissance des lettres. Cela donnerait lieu à la fois aux difficultés phonologiques et orthographiques caractéristiques de l'enfant ou de l'adulte dyslexique.

La prévalence des déficits a été examinée dans l'étude de Ramus et al. (2003b) qui a porté sur des adultes dyslexiques recrutés à l'université. Leurs habiletés phonologiques ont été évaluées à partir de tâches d'analyse phonémique, de mémoire à court terme phonologique et de dénomination rapide. Comparativement à des normo-lecteurs de même âge, tous les dyslexiques ont des troubles phonologiques sur l'ensemble de ces tâches. Le nombre de participants souffrant de déficits phonologiques est moindre dans une étude portant sur des enfants (Ramus et al., 2003a). Ainsi, dans l'étude de Ramus et al. (2003a), la batterie de tests phonologiques incluait une épreuve de lecture de pseudo-mots, des tâches d'analyse phonologique, de dénomination rapide et de fluence verbale (les enfants devaient produire le plus de mots possibles commençant ou se terminant par un phonème ou une rime donnés). Sur l'ensemble de ces tâches, un déficit phonologique a été relevé chez 17 des 22 dyslexiques (77%).

En résumé :

L'hypothèse phonologique est robuste vu que, d'une part, dans les études de groupes qui ont comparé les habiletés phonologiques et non phonologiques des dyslexiques, aucun résultat contradictoire avec cette hypothèse n'a été relevé. De plus, dans les études qui ont examiné les données individuelles, la majorité des dyslexiques souffrent d'un déficit phonologique. En outre, les analyses de régression indiquent que ces capacités expliquent la majeure partie de la variance en lecture. Par ailleurs, les études longitudinales signalent que ce sont les capacités phonologiques, en particulier celles d'analyse phonémique, qui sont les meilleures prédicteurs du futur niveau de lecture des enfants. Dans la plupart des études sur la dyslexie, le facteur « phonologie » intègre toutefois des capacités diverses, précision et rapidité de l'accès au lexique phonologique, mémoire à court terme phonologique et capacités d'analyse d'unités phonologiques de différentes tailles (syllabe, rime et phonème) de façon plus ou moins explicite. Mais l'origine des déficits phonologiques chez les dyslexiques pose question : ils pourraient s'expliquer par plusieurs facteurs sous-jacents, soit un

déficit des traitements auditifs rapides (hypothèse d'un déficit perceptif), soit un déficit de représentations de phonèmes (hypothèse d'un déficit linguistique/phonologique).

6.3.2. L'hypothèse du trouble du traitement temporel auditif

Selon certains chercheurs, le déficit phonologique des dyslexiques proviendrait d'un déficit des traitements rapides en perception auditive, qu'il s'agisse de perception du langage ou non. Ce déficit affecterait le traitement des sons brefs et des transitions temporelles rapides. Les premières études dans ce domaine ont été effectuées par Tallal.

6.3.2.1. Paradigme de référence : le jugement d'ordre temporel

Le test le plus couramment utilisé dans la littérature pour évaluer un déficit de traitement temporel a certainement été le test de jugement d'ordre temporel (JOT ou TOJ, *Temporal order judgment*), rendu célèbre par les travaux de Tallal et Piercy (1973, 1974). Ces travaux ont porté sur des dysphasiques. Deux stimuli identiques ou différents étaient présentés successivement, l'enfant devant indiquer s'il a ou non entendu la même chose (tâche de discrimination) et dans quel ordre (tâche de jugement d'ordre temporel). Les stimuli incluaient des sons non-verbaux courts ou longs, des voyelles brèves ou longues ainsi que des syllabes de type /ba/-/da/. La durée des intervalles inter-stimuli était longue ou courte. Les dysphasiques réussissent moins bien les tâches comportant des tons courts, des voyelles brèves ou des transitions consonne-voyelle brèves, surtout quand les intervalles entre les stimuli sont courts.

Ainsi, l'idée sous-jacente était de démontrer qu'un déficit unique, de nature perceptive mais éventuellement supra-modale, était capable d'expliquer un développement atypique du langage, postulant plus précisément une incapacité de ces enfants à traiter convenablement les stimuli brefs et en succession rapide comme cela est le cas à la fois des stimuli de l'épreuve de TOJ et des éléments de la parole humaine. Toutefois, toutes ces études portaient sur des patients ayant en commun des difficultés d'intensité variable, dans divers aspects du langage, mais les études ne portaient pas spécifiquement sur les troubles du langage écrit.

6.3.2.2. Jugement d'ordre temporel chez les dyslexiques

En 1980, Tallal propose pour la première fois d'étendre sa théorie explicative à la dyslexie, marquant le début d'une vaste et longue polémique, qui dure encore aujourd'hui, autour de la notion d'une origine perceptive aux troubles d'apprentissage de la lecture. Par analogie avec ses études chez les dysphasiques, Tallal (1980) compara 20 participants en difficulté de lecture, âgés de 8 à 12 ans (moyenne 9,7 ans), à 12 enfants normo-lecteurs de moyenne d'âge 8,5 ans, sur une tâche depuis lors dénommée *Tallal's repetition test*, tâche qui repose sur des jugements de similitude ou d'ordre temporel entre deux stimuli non verbaux (sons complexes) de 75 ms de durée, différant seulement par leur fréquence fondamentale, séparés d'un ISI de 428 ms. Enfin, les mêmes paires étaient présentées à des ISI plus courts s'étendant de 8 à 305 ms. L'auteur ne retrouva aucune différence entre les deux groupes dans la phase d'apprentissage, ni dans la phase de test avec des paires séparées par des intervalles de 429 ms. En revanche, des différences très significatives apparaissent pour les ISI plus courts, 45% des enfants dyslexiques se situant en dessous de la performance du plus faible contrôle, suggérant que, comme pour les dysphasiques, le cerveau de ces enfants était en déficit pour traiter les événements brefs et en succession rapide, et non les mêmes éléments séparés par de plus larges intervalles.

L'enfant dyslexique serait donc incapable d'entendre des distinctions acoustiques parmi les sons brefs et successifs de la parole. En revanche, si la durée des stimuli est artificiellement allongée, le déficit des dyslexiques n'apparaît plus. Un entraînement intensif basé sur des stimuli verbaux artificiellement étirés dans le temps faciliterait le traitement des transitions formantiques et permettrait d'améliorer la discrimination des phonèmes (Tallal & Piercy, 1975). Par ailleurs, chez les lecteurs normaux, une activité préfrontale gauche est observée en IRMf en réponse à des stimuli acoustiques non linguistiques à changements rapides (par opposition à des changements plus lents), alors que cette aire n'est pas sensible à cette différence chez les dyslexiques testés (Temple et al., 2001). Toutefois, cette région semble présenter suffisamment de plasticité, puisque cette sensibilité différentielle se développe après un entraînement intensif.

A la lumière des données évoquant un entraînement possible des enfants souffrant de troubles d'acquisition du langage, nous avons proposé à des enfants dyslexiques, dans une de nos expériences précédentes, un entraînement audio-visuel intensif portant spécifiquement sur la perception du trait phonétique de voisement (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003). En effet, nous supposons que ces enfants, en dépit de leurs difficultés, étaient tout de même sensibles au trait de voisement et que cette sensibilité pouvait être exploitée dans le cadre d'une remédiation. Cette idée s'appuyait sur les travaux de Forrest et Morrisette (1999) pour qui le trait de voisement serait le mieux retenu et le mieux traité, ceci aussi bien chez les jeunes enfants normo-lecteurs que chez les enfants dyslexiques. L'entraînement audio-visuel portant sur l'extraction implicite du voisement s'est avéré encourageant. Il était en effet suivi d'une modification de la configuration des effets de similarité de voisement entre les deux consonnes d'un stimulus C₁VC₂V, dans une tâche d'identification des consonnes écrites, configuration désormais conforme à celle observée chez les enfants normo-lecteurs et semblant témoigner de l'intervention d'une organisation des unités phonémiques par des inhibitions latérales en termes phonétiques (Bedoin, 2003). Il serait donc possible d'intervenir pour améliorer l'organisation des connaissances phonologiques, à un niveau infra-phonémique, chez des enfants dyslexiques.

6.3.2.3. Déficit auditif et traitements temporels rapides

Trois caractéristiques des stimuli sont en fait impliquées dans ce que Tallal appelle les traitements temporels : l'ordre d'apparition des stimuli, leur durée individuelle et la rapidité de leur succession, c'est-à-dire l'intervalle entre deux stimuli. Ce mélange de variables hétérogènes a été critiqué par Studdert-Kennedy et Mody (1995). Des expériences ont été effectuées, d'une part, pour tenter de reproduire les résultats originaux de Tallal, d'autre part, pour évaluer séparément l'incidence des trois dimensions temporelles sur les performances en lecture.

Plusieurs études ont évalué si le déficit des dyslexiques ressort principalement pour les intervalles courts. La variation des performances en fonction de la durée des intervalles et du niveau de lecture a été examinée dans une étude longitudinale qui a impliqué plus de 500 enfants suivis durant 3 ans, depuis le début de l'apprentissage de la lecture (Jorm et al., 1986a, 1986b ; Share et al., 2002). Ces auteurs ont utilisé la tâche de jugement d'ordre temporel mise au point par Tallal, avec les mêmes sons non-verbaux et les mêmes intervalles courts et longs. Les deux phases de test – d'abord avec l'intervalle long et ensuite avec les intervalles courts – ont été précédées par une phase d'apprentissage au cours de laquelle les stimuli étaient présentés un par un. Aucune différence entre les groupes n'est relevée pour la phase d'apprentissage. En revanche, dans la tâche de jugement d'ordre temporel, les dyslexiques ont des scores plus faibles pour l'intervalle long, ce qui

est à l'opposé de ce qui a été rapporté par Tallal (1980). Ce résultat peut éventuellement s'expliquer par une différence dans le *sex-ratio* des enfants, le groupe des dyslexiques comportant davantage de garçons (88% contre 45% chez les normo-lecteurs).

Pour tester cette interprétation, Share et al. (2002) ont effectué une seconde analyse en appariant les groupes en âge, sexe, QI et statut socio-économique. Les résultats sont similaires à ceux de l'analyse précédente mais ils s'expliquent surtout par les scores de 8 des 17 dyslexiques (47%), ce qui est cohérent avec l'étude de Tallal (1980) où seulement 45% des dyslexiques avaient des performances inférieures à celles des normo-lecteurs. Cependant, le sous-groupe de dyslexiques de l'étude de Share et al. (2002) se caractérise toujours par des performances déficitaires pour l'intervalle long, et non pour les intervalles brefs, encore une fois en contradiction avec les résultats originaux de Tallal (1980). Ces contradictions peuvent provenir de différences de l'âge moyen des enfants selon les études, la tâche de jugement d'ordre temporel ayant été passée avant l'apprentissage de la lecture chez de futurs dyslexiques et chez de futurs normo-lecteurs dans l'étude de Share et al. (2002), mais pas dans celle de Tallal (1980). Les dyslexiques de l'étude de Share et al. (2002) ont été revus à 9 ans. Leurs performances dans le test de jugement d'ordre temporel ont été comparées à celles de normo-lecteurs de même niveau de lecture appariés en fonction du QI et du sexe. Aucun déficit n'est relevé chez les dyslexiques pour l'épreuve de jugement d'ordre temporel. En revanche, leurs performances en lecture et en écriture de pseudo-mots sont déficitaires. Ces données reproduisent les résultats classiques à l'appui de l'hypothèse phonologique. Elles indiquent aussi que le déficit de la procédure phonologique de lecture est sévère puisqu'il ressort y compris dans la comparaison avec des enfants plus jeunes mais de même niveau de lecture, ce qui n'est pas le cas pour les capacités de lecture de mot en contexte ni pour celles de compréhension. Les résultats de cette étude ne permettent donc pas de soutenir que le déficit de la procédure phonologique de lecture des dyslexiques s'expliquerait par une déficience des traitements temporels rapides. Toutefois, comme dans l'étude de Tallal (1980), seuls des sons non-verbaux ont été utilisés dans le test de jugement d'ordre temporel, mais les intervalles courts variaient de 8 à 308 ms, cette dernière durée étant en fait proche de 428 ms, la durée dite longue dans l'étude de Tallal.

L'intervalle entre les stimuli a encore été manipulé dans deux épreuves (Chiappe et al., 2002), une de jugement d'ordre temporel et une de discrimination (dire si deux sons sont ou non identiques). Les intervalles entre les stimuli (/ba/-/da/) variaient de 10 à 100 ms. Des dyslexiques adultes ont été comparés à deux groupes de normo-lecteurs : un de même âge et un de même niveau de lecture. Les différences entre dyslexiques et témoins de même âge ne sont significatives, ni pour les intervalles brefs (entre 10 et 25 ms), ni pour les longs (entre 30 et 100 ms). Le même résultat a été relevé dans une troisième épreuve, dans laquelle soit un son de 170 ms, soit deux sons de 75 ms étaient présentés avec des intervalles entre 5 et 60 ms, les participants devant dire s'ils entendaient un ou deux sons. Par contre, comme dans l'étude de Share et al. (2002), les dyslexiques ont des scores inférieurs à ceux des témoins de même niveau de lecture dans des épreuves classiques évaluant leurs capacités phonologiques en lecture (lecture de pseudo-mots) et hors lecture (analyse phonémique et syllabique).

Deux revues de la littérature (Ramus, 2003 ; Rosen, 2003) signalent qu'il est maintenant de plus en plus clair que les troubles auditifs, lorsqu'ils sont présents, ne sont pas liés à la rapidité de la succession des stimuli auditifs. Tout d'abord, parmi les études qui ont utilisé les mêmes tâches que celles de Tallal, en plus de celles de Chiappe et al. (2002) et de Share et al. (2002), plusieurs n'ont pas permis de relever que le déficit des

dyslexiques était limité aux intervalles brefs (Reed, 1989 ; Nittrouer, 1999 ; Marshall et al., 2001). Enfin, des résultats obtenus dans d'autres tâches permettent de douter de cette hypothèse. Par exemple, pour la détection du nombre de sons entendus en fonction de la durée de l'intervalle, les participants ont tendance à n'entendre qu'un seul son quand ce dernier est court (McAnally & Stein, 1996 ; Schulte-Körne et al., 1998, 1999 ; Ahissar et al., 2000).

Le point fondamental des résultats de Tallal, et de l'interprétation qui en a été faite, est l'analogie proposée entre la valeur de l'intervalle inter-stimulus où ces enfants se trouvent en difficulté, et la durée de certaines composantes du langage articulé. Tout particulièrement, la durée des consonnes occlusives, qui avoisine 40 ms, expliquerait les difficultés que rencontrent certains dyslexiques dans la discrimination des consonnes. En effet, selon l'hypothèse du déficit du traitement temporel, il a été suggéré qu'une voie neuronale de type *magnocellulaire*, jouant un rôle crucial dans le traitement temporel de tout système sensoriel, sensori-moteur ou moteur, serait spécifiquement détériorée lors du développement précoce (Stein & Walsh, 1997). Anatomiquement le système auditif ne possède pas l'équivalent d'une voie magnocellulaire indépendante, mais il existe un sous-système auditif caractérisé par des neurones de grande taille spécialisés dans l'analyse de stimuli auditifs rapides. A l'instar des cellules magnocellulaires visuelles, ces cellules auditives présenteraient des anomalies dans le noyau géniculé médian chez les dyslexiques (Galaburda, Menard & Rosen, 1994). Or, la discrimination des phonèmes nécessite une analyse extrêmement précise des fréquences sur de très courtes durées (les transitions formantiques ont une durée inférieure à 40 ms). Ainsi, le dysfonctionnement des cellules de ce sous-système auditif serait à l'origine du déficit des enfants dyslexiques dans le traitement temporel des phonèmes. La plupart du temps, les voyelles ne posent pas ce type de problème, puisqu'elles sont de longue durée et que leur discrimination ne repose pas sur la perception de changements acoustiques brefs, comme pour les consonnes.

6.3.2.4. Déficit auditif ou déficit spécifique au traitement du langage ?

Dans une expérience visant à vérifier si le déficit des lecteurs en retard est bien spécifique au traitement du langage, Mody et al. (1997) ont utilisé des sons verbaux et non-verbaux aussi proches que possible quant à leurs caractéristiques acoustiques. Les sons verbaux étaient des syllabes de type /ba/-/da/, les sons non-verbaux ont été construits à partir de ces mêmes syllabes. L'incidence négative du raccourcissement de l'intervalle inter-stimuli ne se retrouve chez les faibles lecteurs que lorsque la tâche implique les sons verbaux, ce qui suggère que leur déficit est spécifique au traitement de sons de la parole. Dans l'étude de Serniclaes et al. (2001), la spécificité linguistique du déficit de perception des phonèmes a été testée à l'aide d'analogues sinusoïdaux de sons de parole variant le long d'un continuum de lieu d'articulation de /ba/ à /da/. Ces sons sont entendus comme étant de simples sifflements par un auditeur naïf. Dans l'expérience, ils étaient présentés par paires, d'abord en condition non-parole, puis en condition parole. Dans le premier cas, les stimuli étaient présentés comme des sifflements, dans le second, comme de la parole humaine (/ba/ ou /da/). Le participant devait dire si les deux sons qu'il entendait étaient identiques ou non. Une différence entre les réponses des deux groupes en condition parole, mais pas en condition non-parole, pourrait être attribuée à des problèmes spécifiques au traitement du langage, et non à des différences de traitement acoustique, comme c'était le cas dans les études antérieures (des stimuli différents ayant été utilisés en condition parole et non-parole). Ce protocole a été utilisé avec des enfants dyslexiques ayant un retard de lecture d'au moins 24 mois et des normo-lecteurs de même âge chronologique (13 ans,

Serniclaes et al., 2001). Conformément à l'hypothèse d'une spécificité linguistique du déficit des dyslexiques, les deux groupes diffèrent principalement en condition parole.

Ainsi, le grand débat à l'heure actuelle est de savoir si le déficit du traitement temporel est spécifique ou non au langage. Selon des données récentes, les enfants dotés de faibles habiletés phonologiques n'ont pas forcément de difficultés particulières pour rappeler des stimuli non-verbaux très rapides (Nittrouer, 1999, cité par Rosen & Manganari, 2001). De même, des données relevées en MEG font ressortir une réponse N100 anormalement forte chez les adultes dyslexiques après le début d'un pseudo-mot initialisé par /a/, alors que leurs réponses évoquées ne diffèrent pas de celles des bons lecteurs pour des sons non-verbaux analogues : le cortex auditif serait donc anormalement activé chez les dyslexiques 100 ms après le début de certains stimuli verbaux (Helenius et al., 2002). Enfin, Rey et ses collaborateurs (2002) ont récemment observé que le bénéfice correspondant à l'entraînement sur des stimuli temporellement étirés n'est pas différent de celui obtenu avec des stimuli naturels. Par conséquent, bon nombre d'auteurs pensent que le déficit du traitement temporel est purement linguistique.

Il est de plus apparu que les signaux présentés aux participants n'activent pas les mêmes réseaux corticaux selon qu'ils sont présentés comme de la parole ou non à des adultes normo-lecteurs (Dehaene-Lambertz et al., 2005). Un déficit plus fortement marqué en condition parole qu'en condition non-parole a été relevé dans d'autres études impliquant des dyslexiques (Schulte-Körne et al., 1998, 1999 ; Rosen & Manganari, 2001). Ainsi, Schulte-Körne et al. (1999) n'ont observé aucune différence entre les résultats des dyslexiques et ceux des normo-lecteurs dans deux tâches impliquant des aspects sonores non langagiers, alors que les performances de ces deux groupes diffèrent pour la discrimination de sons de la parole. Il est également possible d'attribuer à un déficit linguistique les résultats observés par Lorenzi et al. (2000), les performances auditives des dyslexiques étant plus fortement détériorées aux fréquences critiques pour la perception de la parole (4 Hz). Toutefois, une différence entre parole et non-parole n'a pas été retrouvée dans certaines études sur les dyslexiques (par exemple, avec des adultes : Ramus et al., 2003b ; avec des enfants : White et al., 2006). Les investigations permettant d'évaluer la spécificité des déficits dans les traitements auditifs comportaient pourtant de nombreuses tâches, certaines reproduisant partiellement le protocole mis au point par Mody et al. (1997). L'examen des résultats individuels des enfants suggère cependant qu'au moins une partie d'entre eux souffrirait d'un déficit spécifiquement langagier.

6.3.2.5. Traitement temporel dans des modalités autres qu'auditives

Un autre postulat, non moins important, de la théorie du déficit de traitement temporel est le caractère supra-modal de ce déficit de traitement de stimuli se succédant rapidement, ce qui implique qu'il devrait pouvoir être mis en évidence dans les autres modalités que la modalité auditive. Tallal et son équipe (Johnston et al., 1981 ; Tallal et al., 1985) avaient déjà observé que les enfants SLI avaient des difficultés à identifier lequel de deux doigts d'une même main étaient touchés simultanément. Stoodley et al. (2000) ont retrouvé que des adultes dyslexiques étaient également déficitaires sur une tâche de détection d'un stimulus vibratoire, lorsque la vibration était de 3 Hz mais non lorsqu'elle était de 30 ou 300 Hz. Enfin, Grant et al. (1999) ont retrouvé une élévation des seuils de discrimination tactile de l'orientation et de la largeur de grilles de stimuli palpés à l'aveugle par la pulpe des doigts. Ces auteurs proposent l'hypothèse qu'ici aussi, comme dans la modalité auditive, le déficit porterait sur le traitement d'une succession rapide d'informations. Nous concevons le caractère crucial de la démonstration d'un déficit de nature temporelle dans une modalité

autre qu'auditive, mais encore faut-il démontrer que le déficit existe dans les deux modalités chez un même individu.

Utilisant deux tâches, l'une visuelle (test de Ternus) l'autre auditive (test de répétition de Tallal) chez des enfants mauvais lecteurs, Cestnick et Coltheart (1999), puis Cestnick et Jerger (2000) et enfin Cestnick (2001) ont retrouvé un déficit de traitement temporel dans les deux modalités, avec une corrélation significative entre les deux, spécialement pour un sous-groupe de dyslexiques classés comme phonologiques à l'aide d'une épreuve de lecture de mots et de pseudo-mots. Ces auteurs interprètent leurs résultats comme témoignant d'une atteinte combinée des corps genouillés latéraux (visuels) et médians (auditifs) spécifiquement chez les dyslexiques de type phonologique. De manière certainement plus complète, Laasonen et al. (2001) ont étudié de jeunes adultes, dyslexiques ou non, dans des tâches de jugement d'ordre temporel sur des stimuli soit auditifs (tons de hauteur différente), soit visuels (flashes lumineux), soit tactiles (indentations palpées par la pulpe du doigt). En outre, les mêmes stimuli étaient utilisés dans une tâche dite « d'acuité de traitement temporel » où, sans avoir à faire de jugement d'ordre, les participants devaient juger de la simultanéité ou non de deux séries de 3 stimuli. Dans toutes ces tâches, les adultes dyslexiques étaient significativement plus faibles que les témoins.

En bref, selon l'hypothèse temporelle, les dyslexiques phonologiques souffriraient d'un trouble général du traitement temporel de l'information rapide. En vision, ce trouble se manifesterait par un fonctionnement déficitaire de la voie magnocellulaire, entraînant une réalisation imparfaite des traitements dont elle est spécialiste (i.e., traitement des contrastes, des informations en mouvement, des stimuli surgissant rapidement). En audition, ce trouble du traitement temporel reposera sur des anomalies magnocellulaires dans le noyau géniculé médian, et se manifesterait par une absence de réponse spécifique d'une région préfrontale gauche à des stimuli auditifs à changements rapides. Ce déficit du traitement auditif temporel des sons gênerait l'acquisition de la conscience phonologique et l'élaboration d'un code précis et bien organisé. En conséquence de tels troubles visuels et auditifs, l'apprentissage de la lecture serait particulièrement difficile. D'une part, la voie magnocellulaire ne permettrait pas de coder correctement les traits des lettres et leur emplacement, conduisant à des erreurs de type inversion de lettres ou lettres incorrectement identifiées. D'autre part, un traitement imparfait des stimuli auditifs rapides empêcherait le traitement correct des phonèmes, entravant l'acquisition de la conscience phonologique et l'élaboration d'un code phonologique précis.

Récemment, la théorie du déficit temporel a fait naître un espoir considérable dans le domaine de la remédiation des enfants dyslexiques à la suite de la publication de Merzenich et ses collaborateurs (1996, cités par Habib, 2002). En effet, des résultats spectaculaires ont été obtenus grâce à un entraînement intensif ayant pour but d'adapter progressivement le système perceptif d'enfants souffrant de troubles d'acquisition du langage, par des exercices quotidiens d'écoute de matériel acoustiquement modifié (allongement de la durée du signal). Néanmoins, l'interprétation des résultats est vivement critiquable sur deux points : la population de cette étude, qui n'était pas uniquement constituée de dyslexiques purs, et la validité de la théorie temporelle, remise en question par certains auteurs.

En résumé :

D'après les études recensées, les déficits des enfants dyslexiques pourraient donc ne pas simplement relever d'une difficulté à traiter des stimuli acoustiques rapides, mais une composante linguistique/phonologique serait centrale dans les difficultés d'apprentissage en lecture. C'est justement dans cette perspective que nous nous plaçons dans ce travail

de thèse. Nous supposons des anomalies du codage phonologique en lecture chez les enfants dyslexiques, un de nos objectifs étant de préciser si ce déficit concerne des traits phonologiques.

6.3.3. La théorie du déficit visuel magnocellulaire

Bien qu'un nombre conséquent de recherches témoigne de l'importance incontestable des compétences phonologiques pour l'apprentissage de la lecture (Ehri et al., 2001 pour une revue) et qu'un trouble phonologique soit classiquement décrit dans le contexte de certaines dyslexies (Sprenger-Charolles & Colé, 2003 ; Valdois et al., 2004a ; Vellutino et al., 2004), il semble cependant excessif de réduire la diversité des troubles dyslexiques à cette seule dimension. En fait, les recherches de plus en plus nombreuses qui évaluent les capacités de traitement visuel des enfants dyslexiques tendent à montrer que nombre d'entre eux présentent un déficit des traitements visuels indépendamment de toute atteinte sensorielle (ou périphérique). Il faut d'emblée remarquer que ces troubles visuels ne sont jamais mis en évidence sur la base d'épreuves cliniques classiques mais nécessitent le recours à des épreuves psycho-physiques informatisées. Une assez grande diversité de troubles des traitements visuels a été décrite chez les individus dyslexiques, la question cruciale étant bien sûr de savoir dans quelle mesure ces troubles sont reliés à l'activité de lecture et peuvent être tenus pour responsables des difficultés d'apprentissage de la lecture de ces enfants. Les recherches dans ce domaine doivent permettre de circonscrire à la fois la diversité des traitements visuels déficitaires chez ces enfants et leur réel impact sur l'apprentissage de la lecture.

6.3.3.1. La théorie du déficit magnocellulaire

L'hypothèse qui a donné lieu au nombre le plus important de recherches dans le domaine visuel est l'hypothèse d'une atteinte du système visuel magnocellulaire. Des données psychophysiques (Slaghuis & Ryan, 1999), électrophysiologiques (Livingstone et al., 1991) ou décrivant des anomalies de l'organisation anatomique et de la taille des cellules des couches magnocellulaires (Jenner, Rosen & Galaburda, 1999) appuient cette théorie. Le dysfonctionnement de ce système magnocellulaire chez les enfants dyslexiques se situerait au niveau du corps genouillé latéral, dont les couches neuronales seraient désorganisées. D'après cette théorie, l'autre système, parvocellulaire, serait en revanche intact (Lovegrove, Garzia & Nicholson, 1990, cités par Habib, 2002). La voie magnocellulaire, prenant son origine dans les cellules ganglionnaires de la rétine, achemine l'information qui lui est spécifique jusqu'au cortex visuel primaire, après un relais dans les grosses cellules du corps genouillé latéral. Une des fonctions de ces cellules est de fournir, au moment de chaque saccade oculaire, un influx inhibiteur du système parvocellulaire permettant d'effacer la trace de la perception précédente. En cas de dyslexie, ce système magnocellulaire fut justement supposé incapable de supprimer le fonctionnement du système parvocellulaire pendant les saccades oculaires (Breitmeyer, 1980), provoquant ainsi des impressions de superposition de lettres. Cette interprétation n'est désormais plus retenue, car il a été montré, dans le cas normal, que la sensibilité visuelle est supprimée pendant la saccade. Selon une autre interprétation, les systèmes magnocellulaires et parvocellulaires pourraient fonctionner correctement au niveau périphérique, mais un dysfonctionnement interviendrait dans les aires visuelles de plus haut niveau recevant de façon prédominante des projections magnocellulaires (voie visuelle dorsale), (Talcott, Hansen, Assoku & Stein, 2000).

Un cadre théorique a ensuite été proposé d'abord dans le domaine strictement visuel, puis l'hypothèse magnocellulaire a été étendue au domaine auditif (Stein, 2003). Fortement

critiquée (Skottun, 2000), l'hypothèse d'une atteinte visuelle magnocellulaire est aujourd'hui encore largement débattue. Par ailleurs, la notion de déficit magnocellulaire renvoie à une atteinte neurophysiologique qui engendrerait des déficits tant des traitements visuels de bas niveau que des traitements phonologiques ; elle n'est donc pas nécessairement incompatible avec l'idée selon laquelle le trouble phonologique est directement responsable, au niveau cognitif, du trouble dyslexique.

6.3.3.2. Trouble visuel magnocellulaire et dyslexies développementales

Dans leur étude, Livingstone et al. (1991) apportent des données comportementales et histologiques suggérant une atteinte du système visuel magnocellulaire dans le contexte des dyslexies développementales. Les auteurs concluent à l'atteinte du système visuel spécifiquement impliqué dans le traitement des faibles contrastes, à savoir le système visuel magnocellulaire. Pour confirmer cette hypothèse, les auteurs présentent des données histologiques recueillies post-mortem sur le cerveau de cinq personnes préalablement identifiées dyslexiques (mais dont certaines présentaient d'autres troubles associés, notamment dysphasiques). Cette seconde étude montre notamment que les cellules du système magnocellulaire au niveau du corps genouillé latéral ont des corps cellulaires de taille réduite (27% plus petits) chez les dyslexiques par rapport aux personnes non dyslexiques. En revanche, les deux populations ne se différenciaient pas au niveau du système visuel parvocellulaire.

Un grand nombre de données comportementales ont été depuis publiées et plaident en faveur d'une atteinte du système visuel magnocellulaire chez les personnes (adultes ou enfants) présentant une dyslexie développementale (Stein & Walsh, 1997). Il a ainsi été montré que les dyslexiques présentent une moindre sensibilité aux faibles fréquences spatiales et aux hautes fréquences temporelles (Lovegrove et al., 1986) ainsi qu'une sensibilité réduite aux points en mouvement (Cornelissen et al., 1995 ; Eden et al., 1996). Eden et al. (1996) montrent que les dyslexiques sont moins performants que les normo-lecteurs pour détecter le mouvement d'ensemble d'une partie d'un groupe de points. Leur étude comportementale est assortie d'une étude sous IRMf où des participants dyslexiques et normo-lecteurs sont confrontés à une tâche de vision passive de points en mouvement ou de points immobiles. La perception de points en mouvement entraîne une forte activation de l'aire V5 alors qu'aucune activation de cette aire n'est observée chez les dyslexiques, suggérant une atteinte du système visuel magnocellulaire. D'autres études ont mis en évidence une moindre discrimination de la différence de vitesse entre deux cibles en mouvement (Demb et al., 1998) et une atypie du contrôle oculomoteur (Pavlidis, 1981), également compatibles avec l'hypothèse magnocellulaire. Plusieurs études suggèrent en outre une relation entre les performances des participants dans les épreuves magnocellulaires et leur performance en lecture. Il a ainsi été montré que les seuils de détection de mouvement prédisaient 25% de la variance de performance en lecture (Talcott et al., 1998, 2000 ; Witton et al., 1998).

6.3.3.3. Hypothèse d'un trouble magnocellulaire amodal

L'hypothèse d'une atteinte spécifique du système visuel magnocellulaire a, en outre, peu à peu évolué vers l'hypothèse d'un trouble amodal des systèmes magnocellulaires auditifs et visuels. En effet, les études mentionnant des résultats à l'appui de l'hypothèse d'une atteinte du système visuel magnocellulaire avaient tendance à conclure qu'une majorité d'enfants dyslexiques (entre 70% et 80%) présentaient un tel trouble (Slaghuis et al., 1993 ; Stein et al., 2000a). Sachant qu'il était par ailleurs également établi qu'une majorité

d'enfants dyslexiques présentaient un trouble phonologique, il s'ensuivait nécessairement qu'une forte proportion de ces enfants présentait vraisemblablement des difficultés à la fois phonologiques et visuelles. L'hypothèse de co-occurrence de troubles phonologiques et de troubles visuels magnocellulaires a été confortée par les études portant sur des populations pré-sélectionnées d'enfants dyslexiques. Borsting et al. (1996) montrent dans leur étude que les difficultés de traitement des basses fréquences spatiales et des hautes fréquences temporelles ne se manifestent que chez les participants dyslexiques qui présentent un trouble phonologique associé (voir également les résultats de Cestnik & Coltheart, 1999). Cette étude, comme celle de Spinelli et collaborateurs (1997), conclut à l'absence de trouble de la sensibilité aux contrastes (et donc d'un déficit magnocellulaire) chez les dyslexiques sans trouble phonologique. Les troubles visuels magnocellulaires ne pourraient donc s'observer que chez les enfants dyslexiques présentant un trouble phonologique associé. Le déficit de cette fonction assurée par le système visuel magnocellulaire chez des dyslexiques de type phonologique suggère que ces enfants souffrent d'un trouble plus fondamental : une difficulté à traiter les stimuli à changements rapides, en modalité auditive comme en modalité visuelle (Stein & Walsh, 1997). Cette idée fonde l'hypothèse du déficit des traitements temporels.

Ceci a en effet conduit John Stein à faire l'hypothèse d'un déficit magnocellulaire amodal touchant tant la sphère auditive que visuelle (Stein & Talcott, 1999 ; Stein, 2003). Il y défend l'idée, proche de celle développée par Tallal (1980, 1993) quelques années plus tôt au niveau comportemental, selon laquelle les enfants dyslexiques auraient du mal à traiter les informations temporelles rapides visuelles et auditives suite à l'atteinte conjointe des systèmes magnocellulaires visuels et auditifs. Les résultats d'études neuro-anatomiques ont également conforté l'hypothèse magnocellulaire amodale : l'équipe de Galaburda qui avait précédemment montré des différences structurelles au niveau du corps genouillé latéral chez les dyslexiques (à l'appui de l'hypothèse d'une atteinte visuelle magnocellulaire) a également mis en évidence des anomalies structurelles des cellules magnocellulaires du corps genouillé médian, dédiées cette fois-ci au traitement des informations auditives (Galaburda et al., 1994). Les cellules atteintes seraient spécialisées dans la détection des changements rapides de fréquence et d'amplitude nécessaires pour identifier les indices acoustiques caractéristiques des sons de la parole.

Devant la polémique croissante quant à la prévalence des troubles magnocellulaires chez les personnes dyslexiques et à la relation privilégiée entre trouble visuel de bas niveau et déficit phonologique, Ramus et al. (2003b) ont proposé pour la première fois de tester chacune des hypothèses explicatives des troubles dyslexiques – la théorie phonologique (Snowling, 2000), la théorie perceptive auditive (Tallal, 1980), la théorie cérébelleuse (Fawcett et al., 1996 ; Nicolson et al., 2001) et la théorie magnocellulaire (Stein & Walsh, 1997) – auprès des mêmes individus. Leur étude a porté sur 16 étudiants dyslexiques et 16 témoins appariés qui ont été soumis à une batterie très complète d'épreuves nécessitant une dizaine d'heures de passation par personne. Les conclusions de cette étude sont que l'ensemble des dyslexiques évalués présente un trouble phonologique se caractérisant soit par des troubles méta-phonologiques, soit par des capacités limitées de mémoire à court terme, soit par un trouble de la dénomination rapide (ou une combinaison de plusieurs de ces troubles). Seul un petit nombre des 16 participants dyslexiques testés (deux d'entre eux seulement) présentent un trouble associé du système visuel magnocellulaire. Elle montre par ailleurs que le trouble phonologique est assez souvent associé à des difficultés de traitement des indices acoustiques des sons de la parole (chez 10 des 16 participants) et beaucoup plus rarement à des problèmes cérébelleux (chez 4 participants seulement). Cette étude suggère donc, contrairement à l'hypothèse magnocellulaire amodale, que seule

une faible proportion de dyslexiques porteurs de trouble phonologique présente à la fois des difficultés de traitement des sons de parole et des difficultés de traitement visuel magnocellulaire.

6.3.3.4. Limites et controverses

Si de nombreuses études témoignent de l'existence de particularités des traitements visuels chez certaines personnes dyslexiques, il est clair que ces particularités ne concernent pas la fonction visuelle dans son ensemble. Les dyslexiques ne présentent pas de troubles de la perception visuelle et ont des performances dans la norme des témoins sur les épreuves relevant du système visuel parvocellulaire : discrimination, traitement des couleurs (Sperling et al., 2003), traitement de configurations statiques (Wilmer et al., 2004). Les études en relation avec l'hypothèse magnocellulaire montrent une assez forte hétérogénéité de la population dyslexique : seuls certains enfants présentent un déficit sur les épreuves psycho-physiques censées évaluer l'efficacité du système magnocellulaire. L'hétérogénéité existerait au sein même de la population présentant un trouble magnocellulaire : certains dyslexiques présentant un déficit sur certaines fonctions qui relèvent du système magnocellulaire et pas sur d'autres.

6.3.4. La théorie du déficit visuo-attentionnel

Comme nous l'avons montré plus haut, de nombreux travaux et des preuves fortes convergent pour suggérer que la dyslexie développementale provient d'un déficit du traitement phonologique. Cependant, cette hypothèse est discutée compte tenu de l'hétérogénéité, largement admise aujourd'hui, de la population de dyslexiques testés, et des résultats de quelques études ne rapportant pas de déficit phonologique apparent chez des dyslexiques. L'approche pluraliste de la dyslexie admet en effet que des difficultés persistantes d'apprentissage de la lecture peuvent exister en dehors de déficits acoustiques ou phonologiques. La diversité des tableaux cliniques et l'analyse qualitative des erreurs de lecture et d'écriture suggèrent que des déficits d'un autre ordre puissent empêcher l'enfant de développer cette compétence (Castles & Coltheart, 1993 ; pour des revues, voir Eckert, 2004 ; Habib, 2001 ; Dworzak, Bedoin & Krifi, 2008). De nombreuses preuves convergent désormais pour suggérer plutôt un trouble de nature visuo-attentionnelle (Valdois, 2004a).

6.3.4.1. Troubles de l'attention visuelle

Les recherches menées jusqu'ici témoignent de façon consensuelle de l'absence de trouble attentionnel au sens large (problème de vigilance, hyperactivité ou impulsivité) dans le cadre des dyslexies développementales (Bednarek et al., 2004 ; Thomson et al., 2005). Certaines études ont conclu à un lien entre inattention et dyslexies développementales (Willcutt & Pennington, 2000 ; Thomson et al., 2005). Cependant, l'hypothèse d'inattention n'est pas compatible avec d'autres données (Bednarek et al., 2004) qui orientent plutôt vers un trouble attentionnel très spécifique. L'hypothèse d'un déficit de l'attention visuelle associé voire responsable des troubles dyslexiques n'a d'abord été formulée que très sporadiquement à travers des études de cas et quelques rares études de groupe. Cette hypothèse a ensuite été plus largement étudiée par le biais de deux paradigmes expérimentaux essentiellement : les épreuves de recherche d'une cible parmi des distracteurs et les épreuves de détection de cible avec ou sans indiqage, inspirées du paradigme de Posner. Les recherches défendant l'hypothèse d'un déficit de l'attention perceptive se heurtent à l'heure actuelle aux mêmes limites que les recherches reliées à l'hypothèse magnocellulaire, à savoir :

- cerner la nature exacte du déficit attentionnel ;
- disposer d'un cadre théorique permettant d'expliquer en quoi un tel déficit est propre à affecter spécifiquement l'apprentissage de la lecture.

Des résultats très récents ouvrent cependant de nouvelles perspectives, en suggérant que les troubles visuo-attentionnels pourraient jouer un rôle important et spécifique dans l'apprentissage de la lecture.

- Trouble sélectif en recherche de cible parmi des distracteurs

L'hypothèse d'un trouble de l'attention visuelle a été essentiellement confortée par nombre d'études utilisant le paradigme de recherche d'une cible parmi des distracteurs. Dans ce type de tâche, les participants sont confrontés à deux conditions expérimentales, une condition automatique et une condition attentionnelle. Dans la condition automatique, la cible se distingue des distracteurs par un attribut spécifique : un trait visuel (chercher une lettre Q parmi des O) ou une couleur (chercher une barre rouge parmi des barres bleues). Dans cette condition, la cible « saute aux yeux » (phénomène de *pop-out*) lors de sa présentation à l'écran et entraîne des temps de réponse rapides qui ne varient pas en fonction du nombre de distracteurs. Au contraire, en condition attentionnelle, la cible ne se distingue des distracteurs par aucun trait spécifique (chercher un O parmi des Q, ou chercher une ligne verticale rouge parmi des lignes horizontales rouges et des verticales bleues). Elle ne saute pas aux yeux et doit faire l'objet d'un traitement sériel attentionnel si bien que les temps de réponse augmentent avec le nombre de distracteurs.

L'ensemble des recherches utilisant ce paradigme expérimental ont montré que les enfants dyslexiques présentaient des difficultés spécifiques à la condition attentionnelle où les performances se caractérisent par des temps de recherche par item anormalement longs. Ainsi, les enfants dyslexiques sont plus sensibles aux distracteurs périphériques que les enfants contrôles, ce qui reflèterait une incapacité à orienter volontairement l'attention vers de petites cibles visuelles (Stein, 1991). Par ailleurs, les enfants dyslexiques ont des performances déficitaires lorsqu'ils doivent rechercher des O parmi des Q (condition nécessitant un traitement sériel/attentionnel), alors que leurs résultats sont dans la norme lorsque la tâche implique un traitement automatique (rechercher des Q parmi un ensemble de O), (Marendaz, Valdois & Walch, 1996 ; Valdois, 1996). En condition automatique, la tâche de recherche de cible mobilise peu de ressources attentionnelles alors que des capacités de focalisation sont mobilisées en condition attentionnelle pour le traitement simultané d'un sous-ensemble d'éléments ainsi que des capacités de désengagement et de déplacement attentionnel pour le traitement successif de plusieurs sous-ensembles. Les difficultés rencontrées par les dyslexiques pourraient donc refléter soit un problème de focalisation attentionnelle, soit une difficulté à désengager l'attention, ou encore une réduction du nombre d'éléments pouvant être traités simultanément lors de la phase de focalisation.

- Trouble de l'orientation de l'attention automatique

Dans d'autres études, un trouble de l'orientation de l'attention, cette fois automatique, a été observé chez certains dyslexiques, notamment dans une tâche basée sur le paradigme d'indication de Posner (Facoetti, Paganoni, Turatto, Marzola & Mascetti, 2000). Ces auteurs ont aussi parfois observé l'association de ce déficit avec une faible capacité de maintien du focus attentionnel. De tels déficits pourraient affecter la planification des mouvements oculaires et l'exclusion des informations parafovéales, deux opérations nécessaires au bon déroulement de la lecture. De plus, un entraînement visuel spécifique à la réorientation

du focus attentionnel améliore de façon significative la vitesse et l'exactitude de la lecture d'enfants dyslexiques (Facoetti, Lorusso, Paganoni, Umiltà & Mascetti, 2003). La difficulté à exclure momentanément certaines informations parafovérales pourrait correspondre à l'observation clinique, chez certains dyslexiques, d'une supériorité de la vision périphérique, interprétée parfois comme un trouble de l'inhibition des informations périphériques. En lecture, la présence d'un filtre attentionnel atténue normalement l'interférence des informations provenant de la périphérie (traitement parafovéal), et augmente l'efficacité de la vision centrale (traitement fovéal).

6.3.4.2. L'hypothèse visuo-attentionnelle

Plus récemment, l'hypothèse d'une atteinte des traitements visuo-attentionnels a été explorée chez les enfants dyslexiques à partir de tâches variées. Tout un ensemble de données expérimentales plaident en faveur d'un déficit d'orientation automatique de l'attention chez les dyslexiques. Un phénomène de mini-négligence gauche a été décrit dans le cadre de plusieurs recherches (Facoetti & Molteni, 2001 ; Hari et al., 2001 ; voir également le cas de dyslexie développementale par négligence décrit par Friedmann & Nachman-Katz, 2004). Ainsi, l'étude des temps de réaction à la présentation de cibles simples (une croix ou un point) apparaissant dans l'hémichamp droit ou gauche montre des temps de réaction beaucoup plus longs à gauche qu'à droite chez les dyslexiques (Facoetti & Molteni, 2001). Hari et collaborateurs (Hari & Renvall, 2001, pour revue) concluent également à une mini-négligence gauche sur la base d'épreuves de jugement d'ordre temporel consistant à dire laquelle de deux barres présentées à droite et à gauche du point de fixation est apparue la première ou d'épreuves d'illusion d'accroissement de lignes vers la droite ou vers la gauche. Dans les deux types d'épreuves, les dyslexiques présentent, contrairement aux témoins, un biais de réponse droit, suggérant une difficulté d'orientation de l'attention vers la gauche. D'autres données suggèrent une capture attentionnelle ralentie : les dyslexiques mettent plus de temps à engager leur attention du côté indiqué (lorsqu'un indice est présenté immédiatement avant l'apparition de la cible ; Facoetti et al., 2000a, 2000b, 2001) et, une fois engagée, leur attention ne pourrait facilement être désengagée (Facoetti et al., 2003). Enfin, la zone opposée au champ visuel dans lequel l'attention vient d'être orientée est normalement l'objet d'une inhibition, qui pourrait être trop faible chez les enfants dyslexiques, particulièrement dans le champ droit. Cela se traduirait par une attraction trop forte par des stimuli en champ droit mais par une mini-négligence gauche (Facoetti et al., 2006).

6.3.4.3. Nouvelles perspectives : notion d'empan visuo-attentionnel

Nous ne pouvons nier aujourd'hui que des dysfonctionnements visuels ou visuo-attentionnels sont fréquemment associés aux troubles dyslexiques. Néanmoins, la plupart des recherches mentionnées jusqu'ici ont décrit ces dysfonctionnements dans le contexte d'enfants atteints de troubles phonologiques et supposent que l'atteinte phonologique constitue l'origine proximale du trouble dyslexique. Des travaux récents suggèrent cependant qu'une forme particulière de dysfonctionnement visuo-attentionnel, un trouble de l'empan visuo-attentionnel (Bosse et al., 2006), pourrait être associé à certaines dyslexies et s'observer indépendamment de toute atteinte phonologique. La notion d'empan visuo-attentionnel renvoie à la quantité d'informations qui peuvent être traitées simultanément au sein d'une séquence d'éléments distincts. Dans le cadre de la lecture, cette notion renvoie au nombre de lettres du mot qui peuvent être identifiées au cours d'une seule fixation. Néanmoins, cette notion est plus large et pourrait concerner tant des lettres (Valdois et al.,

2003) que des chiffres (Hawelka & Wimmer, 2005) et même éventuellement d'autres types de séquences (couleurs ou symboles par exemple).

La notion d'empan visuo-attentionnel s'inscrit dans le cadre du modèle connexioniste de lecture multitraces (Ans, Carbonnel & Valdois, 1998 ; Valdois, 2004b). Ce modèle postule l'existence d'une fenêtre attentionnelle de taille variable à travers laquelle est extraite l'information orthographique du mot à lire. Une lecture globale du mot nécessite que la fenêtre visuo-attentionnelle s'adapte à la longueur du mot de façon à traiter simultanément l'ensemble des lettres qui le composent. Lors d'un traitement séquentiel analytique, la fenêtre visuo-attentionnelle est réduite et cadre successivement sur les unités orthographiques (syllabes, graphèmes) qui composent la séquence à lire. Les lettres situées à l'intérieur de la fenêtre attentionnelle sont maximalement activées et identifiées simultanément alors que les lettres contextuelles (extérieures à cette fenêtre) sont partiellement inhibées. La fenêtre visuo-attentionnelle correspond donc à l'ensemble des éléments de la séquence sur lesquels se focalise l'attention visuelle lors du traitement. Des tâches de report global et partiel ont été utilisées afin d'évaluer l'empan visuo-attentionnel des enfants dyslexiques. Ces tâches consistent à présenter sur écran d'ordinateur des séquences de 5 lettres quelconques (par exemple : R H S D M) pendant un temps limité (maximalement 200 ms pour éviter toute refixation) et à demander aux participants de dénommer les lettres immédiatement après leur disparition de l'écran. Lors du report global, l'enfant doit reporter l'ensemble des lettres présentées indépendamment de leur position. Lors du report partiel, une barre verticale est présentée sous une des lettres de la séquence et seule la lettre indiquée doit être dénommée.

6.3.4.4. Atteinte de l'empan visuo-attentionnel chez les dyslexiques

L'hypothèse d'une relation causale entre un déficit visuo-attentionnel et certains cas de dyslexie développementale a été confortée par les progrès significatifs en lecture et en orthographe d'un enfant dyslexique de surface à la suite d'une rééducation orthophonique centrée sur l'entraînement des capacités de traitement visuo-attentionnel (Valdois & Launay, 1999). De plus, que ce soit dans les procédures par adressage ou par assemblage du modèle de la double voie, ou bien dans la procédure orthographique décrite par Frith, un encodage correct de l'identité et de l'emplacement de chaque lettre est indispensable : même un traitement rapide et en parallèle des lettres d'un mot exige l'identification des lettres et de leur position. Des observations cliniques attestent que cette opération visuo-attentionnelle est déficiente chez certains dyslexiques. Ainsi, Valdois, Gérard, Vanault et Dugas (1995) décrivent un cas de dyslexie développementale caractérisé presque exclusivement par des erreurs visuelles, avec un trouble attentionnel entraînant une prise d'information partielle sur les mots et un codage positionnel imparfait des lettres à l'intérieur du mot. Valdois et ses collaborateurs décrivent une réduction de la fenêtre visuo-attentionnelle (Bosse, Tainturier & Valdois, 2006 ; Valdois, 2004a ; Valdois, Gérard, Vanault & Dugas, 1995 ; Valdois, Bosse & Tainturier, 2004).

En particulier, une atteinte sélective de l'empan visuo-attentionnel en contexte dyslexique a été montrée par Valdois et al. (2003), avec le cas d'un jeune garçon de 14 ans, Nicolas, qui présente toutes les caractéristiques d'une dyslexie de surface (trouble sélectif de la lecture et de l'écriture des mots irréguliers) en l'absence de trouble phonologique associé (bonne conscience phonémique, bonnes capacités de répétition et de mémoire verbale à court terme). Les performances de Nicolas sur les tâches de report de lettres mettent en revanche en évidence un profil très atypique. Alors que les participants normo-lecteurs de même âge réel parviennent à identifier la plupart des lettres quelle que soit leur

position dans la séquence, Nicolas ne parvient à identifier au même taux que les témoins, que les lettres apparaissant dans deux des cinq positions présentées (en position 1 et 3). Il lui est particulièrement difficile d'identifier les lettres apparues en position 4 et 5 de la séquence. Dans ces positions, ces performances demeurent déficitaires même lorsqu'on les compare à celles d'enfants normo-lecteurs plus jeunes de même niveau de lecture que lui. Nicolas présente donc une réduction de l'empan visuo-attentionnel en l'absence de trouble phonologique associé. À l'inverse, les résultats d'un autre adolescent dyslexique, Laurent, sur les mêmes épreuves sont parfaitement dans la norme des témoins de même âge réel (Valdois et al., 2003). Alors que Laurent a un niveau de lecture et un niveau intellectuel comparables à ceux de Nicolas, il ne présente aucun trouble objectivable de l'empan visuo-attentionnel. En revanche, ses performances sont très faibles sur tout un ensemble de tâches impliquant un traitement phonologique et son profil de lecture correspond à celui classiquement décrit dans le contexte des dyslexies phonologiques (trouble sélectif de la lecture et de l'écriture des pseudo-mots). Cette étude montre clairement l'existence d'une double dissociation entre trouble de l'empan visuo-attentionnel et trouble phonologique en contexte dyslexique. Certains dyslexiques présentent donc un trouble de l'empan visuo-attentionnel indépendamment de toute atteinte phonologique, alors que d'autres présentent le profil inverse. Pour intéressante que puisse être la démonstration d'une telle dissociation d'un point de vue théorique, celle-ci n'en demeure pas moins très limitée lorsqu'elle s'effectue dans le contexte de l'étude de deux cas contrastés. Tout porte en effet à penser qu'il peut s'agir de cas exceptionnels dont les résultats ne peuvent être généralisés.

Pour pallier ce problème, Bosse et al. (2006) ont analysé les performances de deux groupes d'enfants dyslexiques, l'un composé de 68 enfants francophones, l'autre de 29 enfants anglophones. Cette étude a permis de montrer qu'une majorité d'enfants présentaient un trouble isolé soit de la conscience phonémique, soit de l'empan visuo-attentionnel, dans les deux populations. Ceci suggère que la dissociation décrite dans le cadre de l'étude de cas initiale est observée chez une majorité d'individus dyslexiques indépendamment des caractéristiques de leur langue maternelle. Cette étude montre par ailleurs qu'une proportion importante d'enfants présente un trouble isolé de l'empan visuo-attentionnel ; en fait, le nombre d'enfants présentant ce type de déficit est, tant dans la population anglophone que francophone, au moins égal au nombre d'enfants présentant un trouble phonologique isolé.

6.3.4.5. Lien entre empan visuo-attentionnel et lecture

Les résultats précédemment mentionnés montrent qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel est observé chez certains dyslexiques et que ce déficit peut se rencontrer indépendamment de toute atteinte phonologique. Ceci est potentiellement très important du point de vue théorique à condition cependant de montrer l'existence d'un lien entre trouble de l'empan visuo-attentionnel et niveau de lecture et ce, indépendamment des capacités de traitement phonologique des enfants. Les études de groupe précédemment mentionnées apportent des éléments à l'appui d'une telle relation. En effet, l'étude de Bosse et collaborateurs (2006) montre une forte corrélation entre les performances des enfants dyslexiques sur les épreuves visuo-attentionnelles et leurs performances sur les épreuves de lecture proposées (niveau de lecture ou lecture de mots isolés). En revanche, les performances visuo-attentionnelles et métaphonologiques de ces enfants ne corrélatent pas, une fois pris en compte l'effet de l'âge. Des analyses de régressions multiples ont par ailleurs montré que leurs capacités de traitement visuo-attentionnel étaient prédictives de leur niveau de lecture indépendamment de leurs capacités de traitement phonologique. Casco, Tressoldi et Dellantonio (1998) avaient déjà montré que les capacités de traitement

visuo-attentionnel des enfants normo-lecteurs sont corrélées à leur niveau de lecture : dans leur étude, les enfants présentant les performances les plus faibles à une épreuve de recherche d'une lettre cible parmi des distracteurs lisaient significativement moins vite et commettaient un nombre d'erreurs visuelles plus élevé que les enfants ayant obtenu de bonnes performances à cette tâche. Ces résultats suggèrent qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel contribue de façon spécifique au faible niveau de lecture des enfants dyslexiques.

Le modèle multitraces de lecture offre par ailleurs un cadre théorique permettant d'expliquer le lien entre trouble de l'empan visuo-attentionnel et difficulté d'apprentissage de la lecture (Ans et al., 1998). La notion de fenêtre visuo-attentionnelle développée dans le modèle met l'emphasis sur l'implication de traitements visuo-attentionnels dans l'analyse de la séquence orthographique des mots (Bundesen, 1998 ; Pelli et al., 2006). En situation de lecture globale, l'attention doit se distribuer harmonieusement sur l'ensemble des lettres de la séquence pour assurer leur identification (« livre »). En cas de déficit, seules certaines lettres saillantes pourront être identifiées, et l'identité de ces lettres pourrait différer lors des rencontres successives avec le mot de sorte que l'enfant sans cesse confronté à des informations de nature différente ne pourra se constituer une trace mnésique stable du mot plusieurs fois rencontré (« Llivre » ; « livrE », les majuscules correspondant aux lettres saillantes correctement identifiées). On s'attend donc théoriquement à ce qu'un trouble de l'empan visuo-attentionnel soit particulièrement néfaste au développement de la procédure globale de lecture. Celui-ci pourrait cependant également gêner le développement de la procédure analytique dans la mesure où cette dernière repose sur le traitement d'unités orthographiques de tailles variables (syllabes et graphèmes) pouvant comporter jusqu'à 4 ou 5 lettres. Un trouble de l'empan visuo-attentionnel empêchant l'identification de l'ensemble des lettres correspondant aux unités orthographiques pertinentes pour un mot ou un pseudo-mot donné (e.g., « pointure ») pourrait donc altérer à la fois le fonctionnement des procédures analytique et globale de lecture.

Souvent directement comparés à des dyslexiques phonologiques, des cas d'enfants dyslexiques de surface sont ainsi décrits, par analogie avec la littérature sur la dyslexie acquise : ces enfants présentent des difficultés particulièrement marquées pour la lecture de mots irréguliers. Dans les termes de la théorie de la double voie, ils semblent n'utiliser que la procédure par assemblage phonologique. L'application systématique de règles graphèmes-phonèmes et phonèmes-graphèmes leur permet de lire des pseudo-mots, mais les conduit à de nombreuses erreurs par régularisation en lecture et écriture de mots irréguliers. L'utilisation de représentations orthographiques de mots complets dans une procédure par adressage serait donc déficitaire (pour des études de cas, voir Bailey, Manis, Petersen & Seidenberg, 2004 ; Broom & Doctor, 1995a, 1995b ; Castles & Coltheart, 1996 ; Coltheart, Masterson, Byng, Prior & Riddoch, 1983 ; Di Betta & Romani, 2006 ; Goulandris & Snowling, 1991 ; Hanley & Gard, 1995 ; Rowse & Wilshire, 2007 ; Valdois et al., 2003).

6.3.4.6. Autre type de difficultés visuo-attentionnelles chez les enfants dyslexiques

La variété des déficits visuo-attentionnels évoqués à propos de la dyslexie de surface pourrait refléter l'hétérogénéité de ce type de dyslexie (Rowse & Wilshire, 2007). Ainsi, une autre hypothèse dans le cadre de ces troubles visuo-attentionnels chez des enfants présentant une dyslexie de surface concerne le déficit d'un mécanisme d'inhibition de l'information sur les détails au détriment de l'analyse globale de stimuli visuels complexes (Bedoin, Lévy-Sebbag & Kéïta, 2005). A la suite de plusieurs expériences ayant comparé

les performances d'enfants dyslexiques dans des épreuves requérant un traitement global ou local de l'information pour discriminer une cible visuelle dans des stimuli complexes (lettres ou dessins d'objets hiérarchisés), Bedoin et ses collaborateurs ont mis en évidence des anomalies distinctes selon le type de dyslexie (associée ou non à des déficits phonologiques). En effet, chez des enfants dyslexiques de surface, un déficit spécifique de l'inhibition d'information non pertinente sur les détails est apparu (Bedoin, Lévy-Sebbag & Kéïta, 2005 ; Bedoin et al., 2009 ; Dworczak, Bedoin & Krifi, 2008 ; Kéïta, 2007 ; Kéïta, Bedoin, Herbillon, Lévy-Sebbag & Mérigot, 2005 ; Kéïta, Bedoin, Mérigot & Herbillon, 2005). Chez des enfants dyslexiques atteints d'un trouble phonologique, ces épreuves mettent en évidence une anomalie de la spécialisation hémisphérique pour le langage.

6.3.4.7. Limites

Les recherches précédentes montrent qu'un trouble de l'empan visuo-attentionnel se rencontre chez un certain nombre d'enfants dyslexiques en l'absence d'autres types de déficits (notamment phonologique) connus pour entraver l'apprentissage de la lecture. Ceci conduit à penser qu'un déficit de l'empan visuo-attentionnel pourrait être à l'origine de certaines formes de dyslexies, notamment celles qui ne sont pas associées à un déficit phonologique. Le fait que l'empan visuo-attentionnel soit corrélé et prédictif du niveau de lecture des enfants dyslexiques est compatible avec l'existence d'une relation causale entre déficit de l'empan visuo-attentionnel et trouble dyslexique.

Ceci ne saurait cependant suffire à établir une relation de causalité entre ces deux types de troubles. Une telle relation nécessite de montrer que les enfants dyslexiques présentent un déficit de l'empan visuo-attentionnel non seulement comparativement à des enfants de même âge réel (tel qu'évalué par Bosse et al., 2006) mais également comparativement à des enfants plus jeunes de même niveau de lecture (tel que suggéré par Valdois et al., 2003). Un autre argument à l'appui d'une relation causale consisterait à montrer, dans le cadre d'une étude longitudinale, que l'empan visuo-attentionnel évalué avant l'apprentissage de la lecture chez des enfants tout-venant est prédictif de leur niveau ultérieur de lecture, indépendamment de leurs autres aptitudes cognitives, notamment phonologiques. Enfin, il faudrait démontrer qu'un entraînement de l'empan visuo-attentionnel est de nature à améliorer les performances de lecture des enfants dyslexiques, et qu'un tel entraînement a un effet spécifique, différent de celui attendu suite à un entraînement phonologique. On est donc loin aujourd'hui de disposer des éléments nécessaires pour établir une relation causale entre déficit de l'empan visuo-attentionnel et trouble d'apprentissage de la lecture. Cependant, ce type de déficit est compatible avec nombre d'hypothèses théoriques récentes insistant enfin sur la complémentarité des dimensions phonologiques et visuelles de la lecture (Whitney & Cornelissen, 2005).

En résumé :

Apprendre à lire implique la mise en relation d'une séquence orthographique appréhendée visuellement et de la séquence phonologique correspondante. La plupart des recherches menées au cours des 30 dernières années ont mis l'emphasis sur la dimension phonologique et ont largement démontré son importance pour l'apprentissage normal et son implication dans les troubles dyslexiques lorsqu'elle est déficiente. Un nombre plus limité de recherches s'est intéressé à la dimension visuelle. Il en ressort de façon claire que les dyslexiques présentent des particularités des traitements visuels qui ne concernent pas la fonction visuelle dans son ensemble. Des arguments ont été apportés à l'appui d'une atteinte du système visuel magnocellulaire ; cependant les recherches menées dans ce cadre ont

conduit essentiellement à entrevoir l'extrême complexité de ce type de trouble dont on peut penser aujourd'hui qu'il se manifeste dans certaines conditions expérimentales particulières qui restent encore largement à définir et qu'il ne s'observe que chez une sous-population d'enfants dyslexiques, elle-même non clairement identifiée. Les études les plus récentes suggèrent notamment que le trouble magnocellulaire pourrait ne se manifester que lorsque la tâche implique un traitement attentionnel spécifique.

Ceci rejoint les résultats d'un certain nombre d'autres travaux suggérant l'existence de troubles visuo-attentionnels en contexte dyslexique, troubles pouvant avoir pour corrélat neurophysiologique une atteinte pariétale magnocellulaire. La notion de trouble de l'empan visuo-attentionnel récemment formulée dans le cadre du modèle connexionniste multitraces de lecture suggère quant à elle qu'une difficulté à traiter en parallèle les lettres de la séquence du mot pourrait être à l'origine de certaines formes de troubles dyslexiques, indépendamment des capacités de traitement phonologique des enfants. Les résultats publiés jusqu'ici suggèrent que ce type de déficit est dissocié du trouble phonologique chez un nombre non négligeable d'enfants dyslexiques et que la sévérité du déficit de l'empan visuo-attentionnel est reliée à la sévérité de leur trouble lexique. Des études ultérieures devront apporter des arguments forts à l'appui d'une relation causale entre déficit de l'empan visuo-attentionnel et troubles dyslexiques. Les données dont nous disposons aujourd'hui doivent néanmoins conduire à ne pas oublier que la lecture implique une dimension visuelle et une dimension phonologique dont chacune joue un rôle complémentaire dans l'apprentissage. Elles reposent donc la question de l'origine multifactorielle des troubles dyslexiques.

6.3.5. La théorie du déficit de la fonction cérébelleuse

D'après les principales revues de la littérature sur le sujet (voir par exemple Habib, 2000 ; Démonet et al., 2004), c'est essentiellement au niveau du cortex cérébral qu'il faut rechercher l'origine de la dysfonction dans le cerveau du dyslexique. Que ce soient les travaux neuropathologiques (Galaburda et al., 1985) ou les études plus récentes utilisant les moyens modernes d'imagerie anatomique (Leonard et al., 2001 ; Eckert, 2004) ou fonctionnelle (Heim & Keil, 2004), tous convergent essentiellement sur un certain nombre de structures corticales, principalement hémisphériques gauches, laissant peu de place à une éventuelle dysfonction sous-corticale. Certes, les travaux initiaux de Galaburda avaient, de façon quelque peu marginale, retrouvé également des anomalies au niveau des relais sensoriels thalamiques, apportant un argument pour l'hypothèse magnocellulaire ; mais nous ne retrouvons que peu ou pas d'argument en faveur d'une dysfonction du cervelet, un organe qui pourrait pourtant constituer un excellent candidat pour expliquer beaucoup des difficultés des dyslexiques. Tel a été le raisonnement poursuivi par deux chercheurs britanniques, Fawcett et Nicolson, dans l'hypothèse qu'ils ont développée ces dix dernières années.

6.3.5.1. Présentation de la théorie

Partant de la constatation que les dyslexiques présentent non seulement des difficultés de lecture, mais également d'autres troubles dans les domaines visuel, auditif et moteur, Fawcett et Nicolson concentreront leur attention sur une série de caractéristiques qu'ils avaient remarquées chez leurs patients dyslexiques : un retard dans les étapes du développement moteur, des troubles de nature séquentielle et temporelle (dire l'heure, se rappeler les mois de l'année), et surtout la présence de troubles de la coordination motrice et de troubles de l'équilibre (Fawcett & Nicolson, 1999). Or, tous ces symptômes

se trouvent également être des manifestations classiques de dysfonctions du cervelet. Parallèlement, tout un pan de la recherche développée durant les années 1980 et 1990, a permis au cervelet de sortir de son statut d'organe purement moteur, en révélant un domaine d'intervention beaucoup plus vaste, incluant de nombreuses fonctions cognitives (Schmahmann & Sherman, 1997 ; Schmahmann, 1997).

Ainsi, Fawcett et Nicolson (1999) décrivaient le tableau caractéristique de dyslexie comme «un déficit des aptitudes phonologiques, des habiletés motrices, de la rapidité du traitement d'information (Wolf 1991 ; Nicolson & Fawcett, 1994) et de l'automatisation (Nicolson & Fawcett 1990 ; Yap & Van der Leij, 1994)». Ce dernier aspect est sans doute le point le plus original du raisonnement de ces auteurs, faisant référence spécifiquement au rôle du cervelet dans l'apprentissage en général, et celui des procédures en particulier. C'est donc sur ces bases qu'a été postulée la théorie cérébelleuse de la dyslexie (Nicolson et al., 1995, 2001). Un certain nombre d'éléments expérimentaux sont venus à l'appui d'une théorie essentiellement basée sur l'intuition clinique : en premier lieu, certains travaux anatomiques, sur le cerveau *post-mortem* (Finch et al., 2002) et à l'aide de diverses méthodes d'imagerie (Brown et al., 2001 ; Leonard et al., 2001 ; Rae et al., 2002 ; Eckert et al., 2003), ont pointé une anomalie au niveau du cervelet chez le dyslexique. Assez paradoxalement, c'est une étude démontrant une hypoactivation cérébelleuse lors de tâches purement motrices (apprentissage d'une série de mouvements des doigts) chez l'adulte dyslexique, qui a véritablement fait connaître la théorie cérébelleuse (Nicolson et al., 1999). En revanche, bien que le cervelet soit classiquement activé lors de la lecture chez les normo-lecteurs (Fiez & Petersen, 1998), il n'a pratiquement jamais été publié de déficit d'activation du cervelet lors de la lecture chez les dyslexiques, hormis dans une étude concernant la lecture du Braille (Gizewski et al., 2004).

6.3.5.2. Cervelet et lecture

De fait, le cervelet peut affecter la lecture de différentes manières. Il est impliqué dans le contrôle des mouvements oculaires, dans l'attention visuo-spatiale, dans la vision périphérique, tous ces aspects étant des composantes essentielles de la lecture (Stein & Walsh, 1997). En tant que structure cruciale dans la gestion du temps par le cerveau, le cervelet peut contribuer aux problèmes de coordination sensori-motrice et d'intégration inter-sensorielle observés chez les dyslexiques. Telle que présentée par Fawcett et al. (1996) ou encore par Nicolson et al. (2001), la théorie cérébelleuse suppose que le déficit est présent très précocément, dès la naissance, et va interférer avec la mise en place normale des aptitudes tant auditives qu'articulatoires nécessaires à la constitution du système phonologique, comme aux aptitudes visuelles telles que les mouvements oculaires et la reconnaissance des lettres, donnant lieu à la fois aux difficultés phonologiques et orthographiques caractéristiques de l'enfant ou de l'adulte dyslexique.

Mais, aussi séduisante soit-elle, cette théorie a été vivement critiquée ces dernières années. Les détracteurs de Nicolson remarquent tout d'abord que les troubles moteurs sont loin d'être la règle chez tous les dyslexiques, et que beaucoup d'entre eux, même avec des difficultés majeures dans l'apprentissage de la lecture, n'ont manifesté aucune difficulté motrice, voire même se sont montrés très tôt particulièrement doués pour les activités motrices, qu'il s'agisse de motricité proximale et d'équilibre ou de motricité distale. C'est l'avis de Ramus et al. (2003) qui, après une analyse de 22 enfants dyslexiques de 8 à 12 ans, ont pourtant retrouvé dans 50% des cas des troubles moteurs pouvant suggérer un trouble cérébelleux. Il est intéressant de noter que dans une autre étude portant cette fois

sur 16 adultes dyslexiques, les mêmes auteurs (Ramus et al., 2003) ne retrouvent que 4 participants porteurs de troubles moteurs pouvant suggérer une atteinte cérébelleuse.

6.3.5.3. Cervelet et boucle auditivo-articulatoire

La faiblesse principale de la théorie cérébelleuse est probablement qu'elle ne rend pas compte de façon immédiate du trouble le plus unanimement reconnu comme crucial dans la dyslexie : le déficit phonologique. Une hypothèse séduisante à cet égard (Ivry & Justus, 2001 ; Nicolson et al., 2001) fait appel cependant au rôle primordial de l'articulation de la parole dans l'apprentissage de la langue. Pour ces auteurs, le chaînon crucial serait un déficit subtil de la mise en place précoce des aptitudes articulatoires qui provoquerait à la fois un défaut de la boucle articulatoire, altérant la mémoire phonologique à court terme et un trouble de la conscience phonologique, deux processus dont l'intégrité est nécessaire à un apprentissage normal de la lecture (Montgomery, 1981 ; Alexander et al., 1991 ; Heilman et al., 1996). Récemment, un seul travail a apporté des arguments en faveur de cette médiation articulatoire du déficit du dyslexique. L'équipe d'Uta Frith (Griffiths & Frith, 2002) a ainsi démontré que des adultes dyslexiques avaient significativement plus de difficultés que des témoins à associer des schémas représentant les positions de la langue et des dents pour chaque phonème avec le phonème correspondant, ce que les auteurs interprètent comme un trouble de la « conscience articulatoire ».

En résumé :

Au terme de cette analyse de la théorie cérébelleuse, on peut s'interroger sur sa validité et sa capacité à rendre compte de la totalité des déficits observés chez les dyslexiques. Aussi, comme le remarquent Démonet et al. (2004), beaucoup des déficits attribués ici à une dysfonction cérébelleuse pourraient tout aussi bien être attribués à la dysfonction d'autres structures, en particulier sous-corticales, également impliquées dans les processus de coordination motrice, d'automatisation des procédures, et de régulation temporelle motrice et cognitive. Nous reconnaîtrons cependant le mérite essentiel de cette théorie, celui d'avoir ouvert la voie à une véritable prise en compte des comorbidités dans l'explication de la dyslexie.

6.4. Explications neuroanatomiques – Apport de l'imagerie cérébrale

Depuis quelques années, la dyslexie a pu être reliée à des anomalies de la maturation du cerveau. L'imagerie cérébrale a d'ailleurs permis de visualiser les conséquences de telles anomalies sur l'anatomie cérébrale. Ainsi, la dyslexie pourrait être liée à des caractéristiques constitutionnelles du cerveau. L'approche neurologique de la dyslexie repose sur les travaux fondateurs de Galaburda et Kemper (1979) qui a découvert l'existence d'anomalies microscopiques dans la structure cyto-architectonique du cortex, en ayant l'opportunité d'analyser quelques cerveaux de personnes ayant présenté une probable dyslexie. Ce sont les progrès récents de la neuro-imagerie cérébrale qui ont permis l'accroissement des connaissances dans ce domaine et la confirmation de l'existence d'anomalies à la fois structurales et fonctionnelles du cerveau chez une majorité de personnes dyslexiques.

6.4.1. Études anatomo-pathologiques ou morphologiques

Les études anatomo-pathologiques ou morphologiques réalisées chez des adultes dyslexiques ont suggéré l'existence de particularités architecturales. Entre 1979 et 1985, Galaburda et ses collaborateurs ont été les premiers à examiner au microscope, post-

mortem, le cerveau de huit anciens dyslexiques. Ils ont alors découvert de multiples petites malformations à la surface de leur cerveau : des dysplasies (disposition anarchique au sein des couches cellulaires), des ectopies (amas de milliers de neurones en position aberrante à la surface du cortex) présentes surtout dans la région périnsylvienne gauche traduisant une migration anormale des neurones en cours de maturation, et aussi des polymicrogyri (accumulations focales de neurones réalisant une véritable micro-circonvolution à l'intérieur du cortex) observés surtout dans l'aire de Wernicke (Galaburda et al., 1985). Geschwind et Galaburda (1985, cités par Habib, 2002) ont proposé une explication à ces observations : ces anomalies seraient dues à un dysfonctionnement du système immunitaire conjugué à l'effet de la testostérone chez les garçons pendant la vie intra-utérine. Au niveau microscopique à partir de quelques cerveaux d'adultes dyslexiques, d'autres anomalies ont été retrouvées dans le ganglion géniculé latéral avec une réduction de taille des neurones magnocellulaires (Livingstone et al., 1991).

Selon une autre hypothèse, la dyslexie serait la conséquence d'un défaut de latéralisation du langage. Le groupe de Galaburda a par exemple relevé chez certains dyslexiques une réduction de l'asymétrie d'une région du cortex temporal cruciale pour la compréhension verbale et le traitement phonologique : le planum temporale. Toutefois, Leonard et ses collègues (1993) n'ont pas retrouvé une telle différence pour le planum temporale chez d'autres dyslexiques, mais plutôt un défaut d'asymétrie dans une zone du lobe pariétal inférieur, autre région du langage importante pour les traitements phonologiques. En effet, une lésion de cette région provoque un trouble de l'ordonnancement des phonèmes et des syllabes.

Une autre théorie envisage, chez les dyslexiques, un défaut de transfert d'informations entre les deux hémisphères. Leur corps calleux (structure médiane servant à la connectivité cérébrale) possèderait en effet une particularité : il serait beaucoup plus épais et plus grand que celui des témoins, reflétant donc un nombre anormalement élevé de neurones (Habib, 2002). Toutefois, il est très difficile de se baser seulement sur ces observations à cause de la très grande variabilité inter-individuelle.

Ces résultats ont encouragé la recherche sur les bases neurologiques de la dyslexie. Les symptômes dyslexiques dans leur diversité pourraient dépendre de la localisation des anomalies micro-structurales, puisque ces dernières, variables dans leur localisation, pourraient venir perturber l'une ou l'autre des zones essentielles pour le transfert optimal de l'information à travers les réseaux sous-tendant les fonctions du langage ; chez l'enfant, cette perturbation pourrait concerner les réseaux de la lecture en voie de mise en place, nuisant à l'automatisation du transcodage des informations visuelles vers les régions codant la phonologie et réciproquement. À partir d'un modèle de souris, l'équipe de Galaburda (Jenner et al., 2000) notait des anomalies de la connectivité secondaires à des ectopies neuronales. Enfin, des études morphométriques chez les dyslexiques ont rapporté des anomalies de l'architecture cérébrale (Habib, 2000 ; Leonard et al., 2001 ; Rae et al., 2002 ; Eckert et al., 2003).

6.4.2. Imagerie fonctionnelle

L'imagerie fonctionnelle cérébrale permet de recueillir des indices de l'activité cérébrale dans l'ensemble du volume, avec une précision suffisante pour pouvoir reconstituer des images en coupes ou en volumes du cerveau et y localiser des régions dont on mesure le taux d'activité dans des conditions expérimentales diverses, incluant des tâches de lecture ou de perception phonologique du langage.

6.4.2.1. Considérations méthodologiques

L'évidence d'un dysfonctionnement des régions cérébrales impliquées dans la lecture et les processus cognitifs associés est venue des résultats des études en imagerie fonctionnelle. Les méthodes de neuro-imagerie fonctionnelles sont un des principaux moyens d'exploration des corrélats neurobiologiques, mais les résultats de ces études nécessitent des interprétations prudentes par la possibilité de biais secondaires à des facteurs expérimentaux. Les corrélats cérébraux des fonctions linguistiques consistent en événements transitoires de faible amplitude et largement distribués dans tout le cerveau. Des variables telles que l'âge du participant, la latéralité, la durée de présentation des stimuli et leur fréquence de présentation peuvent influencer les données recueillies et devront être contrôlées dans tout plan expérimental (Démonet et al., 2005).

6.4.2.2. Principaux résultats chez l'adulte et chez l'enfant

Georgiewa et al. (1999, 2002) furent les premiers à rapporter des résultats, d'abord seulement en IRM fonctionnelle (IRMf) puis combinée à la méthode des potentiels évoqués (PE) chez des enfants dyslexiques et chez des témoins ; des différences entre les deux groupes étaient présentées pour des tâches linguistiques avec une présentation visuelle des stimuli au niveau du cortex frontal inférieur gauche, entre 250 et 600 ms (Georgiewa et al., 2002). À partir d'une tâche de détection de trait ou de mot, Helenius et al. (1999) montraient qu'il existe chez les dyslexiques un déficit dans le traitement pré-lexical impliquant habituellement le cortex temporo-occipital inférieur gauche.

Chez l'adulte normo-lecteur, les régions cérébrales impliquées dans la lecture de mots isolés sont largement distribuées mais dominées par un réseau hémisphérique gauche avec deux circuits postérieurs et un circuit antérieur (Pugh et al., 2000). Le circuit ventral ou temporo-occipital est centré sur le gyrus fusiforme (*Visual Word Form Area*) et semble sous-tendre la procédure d'adressage ou d'accès quasi automatique à la forme visuelle des mots (Cohen et al., 2002) ; le circuit dorsal ou temporo-pariétal comprend principalement le gyrus angulaire et le gyrus supra-marginalis (Price, 1998) impliqué dans le traitement phonologique et le processus, plus lent, d'assemblage. Le circuit antérieur est quant à lui centré principalement sur le gyrus frontal inférieur gauche ; il est relié aux deux circuits postérieurs (Price et al., 2001) et est impliqué dans les processus phonologique et articulatoire lors de la phase de production des mots. Chez les adultes dyslexiques, comparativement à des témoins normo-lecteurs, est mise en évidence une réduction de l'activité des circuits postérieurs. La région clé du circuit dorsal, le gyrus angulaire, montre une corrélation positive de son niveau d'activation avec les scores de lecture chez les normo-lecteurs et une corrélation négative chez les dyslexiques (Rumsey et al., 1999).

Selon Paulesu et ses collaborateurs (1996), des aires normalement activées de façon simultanée par des traitements langagiers seraient au contraire déconnectées chez les dyslexiques. Ainsi, dans deux tâches phonologiques (l'une de jugement de rimes, l'autre de mémoire à court terme), ces auteurs ont montré que la totalité des aires du langage était activée chez les bons lecteurs (cortex pariétal inférieur, dont notamment le gyrus supra-marginal, aire de Broca et aire de Wernicke, incluant le planum temporale). Les dyslexiques adultes de cette étude activaient les mêmes zones cérébrales, mais à l'économie : uniquement l'aire de Broca pour la tâche de jugement de rimes, et uniquement l'aire de Wernicke pour celle de mémoire à court terme. Les dyslexiques n'activeraient donc que les aires strictement nécessaires aux tâches phonologiques. Paulesu et ses collaborateurs suggèrent donc que ces aires du langage seraient déconnectées chez les dyslexiques et ne pourraient être activées simultanément. Un tel dysfonctionnement pourrait

être à l'origine d'une disconnection entre les procédures phonologiques par assemblage et par adressage. Des données d'imagerie en faveur de cette disconnection ont ensuite été publiées à propos d'enfants dyslexiques (Temple et al., 2001). Une étude en TEP (Paulesu et al., 2001) chez des adultes dyslexiques bien compensés et des témoins, de trois nationalités différentes (anglaise, italienne et française) retrouvait un défaut d'activation du circuit ventral chez les dyslexiques quelle que soit la langue.

Shaywitz et al. (2002) étudiant 144 enfants dyslexiques et témoins montraient par ailleurs que l'activité augmente avec l'âge dans les régions frontales inférieures gauches et droites chez les dyslexiques lors d'une tâche de rimes. Ces résultats sont en faveur de l'hypothèse compensatoire : l'augmentation de l'activation dans les régions frontales et/ou les régions hémisphériques droites constitue un moyen de surmonter le défaut d'engagement des régions postérieures gauches. Simos et al. (2000a, 2000b) rapportaient que la région du circuit ventral chez les enfants dyslexiques présente un niveau d'activité comparable aux témoins et que la différence se situe essentiellement au niveau du décours temporel de l'engagement de ces aires cérébrales : dans une tâche de reconnaissance de mots, l'activité neuronale 250 à 1200 ms après présentation du stimulus se poursuit vers le cortex temporal droit chez l'enfant dyslexique (Simos et al., 2000c), alors que chez les normo-lecteurs elle se propage vers les régions temporaire et pariétale gauches. Ainsi, les difficultés des enfants souffrant de dyslexie développementale seraient associées à un pattern aberrant des connexions fonctionnelles entre les aires cérébrales normalement impliquées en lecture. Au total, ces résultats suggèrent une anomalie de la connectivité au sein des circuits temporo-pariéto-frontaux qui sous-tendent le langage et affectant peut-être particulièrement le circuit sous-jacent à la boucle phonologique en mémoire de travail ainsi que l'interaction entre les « circuits dorsal et ventral de la lecture » (selon la conceptualisation de Pugh et al., 2000).

6.4.2.3. Imagerie fonctionnelle et test des hypothèses physiopathologiques des dyslexies

Dans la mesure où le déficit phonologique constitue un facteur étiologique prédominant dans la dyslexie, la majorité des études en imagerie fonctionnelle ont évalué ces processus à partir de tâches de rimes (Rumsey et al., 1997 ; Simos et al., 2000b), de tâches de mémoire verbale de travail (Paulesu et al., 1996) ou lors de la présentation auditive de stimuli verbaux (Rumsey et al., 1992 ; Simos et al., 2000a). La plupart des études ont montré un hypofonctionnement des régions périsylviennes plutôt gauches. Paulesu et al. (1996) suggéraient que le pattern observé chez les dyslexiques peut être en rapport avec une disconnection dans le circuit péri-sylvien gauche. Une équipe a étudié en IRMf la perception catégorielle des phonèmes. Les dyslexiques présentaient une diminution de l'activité dans le gyrus supra-marginalis gauche (Ruff et al., 2002), une région clé dans les processus phonologiques (Démonet et al., 1996).

Dans plusieurs études, des arguments concordants pour un dysfonctionnement du système visuel magnocellulaire ont été rapportés. Par exemple, Eden et al. (1996) retrouvaient un défaut d'activation de l'aire MT/V5 durant une tâche de détection de mouvement et mettaient en évidence une corrélation entre le niveau d'activation de l'aire V5 et la vitesse de lecture chez les dyslexiques et les normo-lecteurs. Toutefois, d'autres études n'ont pas confirmé ces résultats (Johannes et al., 1996 ; Vanni et al., 1997 ; Amitay et al., 2002). Les effets du système magnocellulaire paraissent en fait subtils et mis en évidence uniquement sous certaines contraintes expérimentales (Bednarek & Grabowska, 2002).

Temple et al. (2003) étudiaient en IRMf la réponse cérébrale à des variations rapides de la trace acoustique du signal de parole et montraient chez les normo-lecteurs une augmentation de l'activation au niveau de la région frontale inférieure gauche et de l'hémisphère cérébelleux droit lors de variations rapides comparativement à des changements plus lents du signal acoustique. Chez les dyslexiques, les auteurs notaient une augmentation de l'activation dans ces mêmes régions pour des variations lentes. De façon similaire, Nagarajan et al. (1999) retrouvaient une diminution de la M100 obtenue en MEG en réponse à des stimuli acoustiques présentant des changements rapides chez des dyslexiques, alors qu'ils présentaient une M100 d'amplitude plus large que les témoins pour des stimuli plus lents. Ces effets étaient également étudiés avec des syllabes naturelles (ma/na), qu'elles soient modifiées ou non par un étirement des transitions formantiques (Ruff et al., 2002). Les régions cérébrales sensibles aux changements acoustiques étaient identifiées comme étant la région frontale gauche et le ralentissement de la parole entraînait une augmentation d'activation dans cette région pour les dyslexiques. Toutefois, le niveau d'activation de la région du gyrus supra-marginalis gauche n'était pas influencé par ces variations de signal acoustique, alors que cette région est habituellement le siège d'un défaut d'activation chez les adultes dyslexiques. Deux effets importants impliqués dans les mécanismes de base de la dyslexie étaient identifiés par cette étude : l'activité neuronale était augmentée par le ralentissement de la parole dans certaines régions cérébrales et le défaut d'activité neuronale dans l'aire du gyrus supra-marginalis serait le support du déficit phonologique dans la dyslexie.

La MMN (*Mitch Match Negativity*) joue un rôle important dans l'exploration de l'hypothèse de déficits perceptifs. Cette composante neurophysiologique est obtenue pour tout changement identifiable lors d'une tâche auditive de répétition de stimuli indépendamment du niveau d'attention du participant (Kujala & Naatanen, 2001), suggérant un processus de type automatique. Les études initiales chez l'enfant présentant un trouble des apprentissages montraient une diminution de l'amplitude de la MMN mais la spécificité de cet effet paraît incertaine : la diminution de la MMN est liée au caractère linguistique des stimuli pour Schulte-Körne et al. (1998), l'anomalie de la MMN semble sensible à un facteur phonétique particulier, le temps de voisement (différence dans le décours temporel des événements acoustiques successifs entre « ga » et « ka » par exemple) pour Kraus et al. (1996), alors que Baldeweg et al. (1999) identifie cette anomalie lors d'une condition faisant varier un facteur non pas temporel mais spectral : la hauteur tonale. Ces résultats pourraient refléter des corrélats neurophysiologiques des troubles de la discrimination des sons de la parole chez le dyslexique, bien que le déterminisme de ces troubles paraisse variable. Il faut noter que Giraud et al. (2005) ont confirmé l'existence d'un trouble du traitement temporel du signal de parole (absence d'une composante électrophysiologique associée de façon caractéristique en français au son de pré-voisement du phonème «b»), mais seulement dans un sous-groupe de dyslexiques présentant des troubles sévères, alors qu'un autre sous-groupe également sévèrement déficitaire présentait un profil électrophysiologique caractérisé non par l'absence de cette composante mais par des composantes multiples.

Nicolson et al. (1999) ont utilisé la TEP lors d'un paradigme d'apprentissage d'une séquence de mouvements des doigts pour évaluer l'activation cérébrale chez des dyslexiques et témoins. Ils montraient une diminution de l'activation cérébrale au niveau de l'hémisphère cérébelleux droit et du cortex frontal inférieur gauche chez les dyslexiques par rapport aux témoins. Ces anomalies corroborent les anomalies métaboliques au niveau de l'hémisphère cérébelleux droit retrouvées chez les dyslexiques lors d'une étude en spectro-IRM (Rae et al., 1998). Néanmoins, si des anomalies de l'activation des régions

cérébelleuses sont parfois retrouvées lors d'études en imagerie fonctionnelle chez les dyslexiques, elles ne sont pas toujours interprétées (Brunswick et al., 1999).

Globalement, l'ensemble très important de données accumulées ces dernières années est caractérisé par la grande diversité des anomalies rapportées dans la mesure où des publications sont venues à l'appui de chacune des théories concurrentes pour rendre compte de la physiopathologie des dyslexies.

6.4.2.4. En résumé

Bien que les controverses continuent concernant la physiopathologie ou le traitement de la dyslexie, les différentes hypothèses pourraient être envisagées comme complémentaires plutôt que de s'exclure mutuellement. Les études d'imagerie fonctionnelle montrent des activations et une connectivité anormale des régions postérieures et péri-sylviennes gauches. Les futures études concernant la physiopathologie des dyslexies développementales devront inclure des études comportementales et des études en imagerie fonctionnelle dans de larges suivis longitudinaux de dyslexiques de nationalités différentes en s'intéressant non seulement à la lecture de mots isolés (comme la plupart des études actuellement) mais également aux domaines cognitifs plus complexes impliqués dans la lecture d'un texte.

6.4.3. En conclusion

Il existe une grande diversité de théories explicatives de la dyslexie. Cette diversité est due à plusieurs facteurs. Il existe sans doute plusieurs causes distinctes de la dyslexie, et donc plus d'une théorie pourrait être correcte, chacune pour un sous-ensemble de la population dyslexique. La dyslexie est complexe, incluant de nombreux symptômes autres que la lecture, notamment phonologiques, auditifs, visuels, spatiaux, moteurs et autres. Chacun de ces symptômes a donné lieu à des spéculations théoriques.

La dyslexie est fréquemment comorbide avec d'autres troubles développementaux (dysphasie, dyspraxie, troubles d'attention...). Dans les études de groupes, des symptômes d'autres troubles développementaux peuvent ainsi sembler liés à la dyslexie, engendrant de nouvelles hypothèses théoriques. Cette grande diversité de symptômes associés à la dyslexie ne facilite pas l'identification des causes réelles par rapport aux simples comorbidités. Néanmoins, à l'issue d'un très grand nombre d'études, il ressort clairement que :

- une majorité d'enfants dyslexiques souffre d'un déficit cognitif spécifique à la représentation et au traitement des sons de la parole : c'est ce que l'on appelle le déficit phonologique. Ce déficit entrave l'apprentissage, la maîtrise et l'automatisation de l'usage des relations graphèmes-phonèmes, et par suite l'ensemble de l'apprentissage de la lecture (y compris la voie orthographique, ce qui explique que la plupart des dyslexiques ne se classent pas aisément en « dyslexie phonologique » et « dyslexie de surface ») ;
- un certain nombre d'enfants dyslexiques semble présenter des troubles de nature visuelle ou visuo-attentionnelle, à l'exclusion de tout déficit phonologique. Il pourrait même exister plusieurs sous-types de dyslexies visuelles. Cependant, les recherches empiriques dans ce domaine sont pour l'instant insuffisantes et n'ont pas conduit à des théories suffisamment abouties et validées. Au niveau des facteurs neurobiologiques de ces déficits cognitifs, les hypothèses de trouble du traitement temporel, de dysfonctionnements magnocellulaire et cérébelleux n'ont pas apporté

suffisamment de preuves de leur validité. Néanmoins, les données neurobiologiques restent suffisamment éparses pour que la question reste largement ouverte.

L'hypothèse qui semble la plus prometteuse actuellement est celle de dysfonctionnements de la migration neuronale affectant précocement la formation de certaines aires du cortex, notamment les aires périsylviennes gauches (dans le cas de la dyslexie avec déficit phonologique). Cette hypothèse, quoiqu'ancienne et basée sur des données limitées, a en effet été très récemment confortée par les nouvelles données issues de la génétique.

7. Traits phonologiques et difficultés d'apprentissage de la lecture

Le développement phonologique semble se prolonger jusqu'à un âge avancé, et certains travaux récents insistent sur la nécessité de nuancer la description d'une acquisition correcte des contrastes phonologiques selon les types de traits. Une représentation phonologique mature pour les consonnes était jusqu'ici censée correspondre à la perception d'une différence acoustique entre des sons appartenant à des catégories phonémiques différentes, rassemblées par un même label (le nom d'un phonème), et une incapacité à discriminer des sons marqués par une différence acoustique de même amplitude mais relevant d'une même catégorie phonémique. Ces deux tâches sont supposées permettre l'étude de l'intégrité des unités phonémiques. Ce phénomène de perception catégorielle pour les consonnes doit être cependant quelque peu relativisé chez les enfants sans pathologie du langage. Chez bon nombre de dyslexiques, dont le système phonologique est pourtant suffisamment élaboré pour permettre des compétences correctes en perception et en production de parole, il semble que la perception catégorielle ne soit pas optimale. La comparaison avec les performances des contrôles est cependant délicate, puisque même en dehors d'une pathologie d'apprentissage, la perception catégorielle des phonèmes est imparfaite chez l'enfant, au moins lorsqu'elle est mesurée avec les outils initialement destinés aux adultes. C'est donc sans doute en se tournant vers une étude qualitative détaillée de la configuration des réponses des dyslexiques qu'une forme atypique de perception catégorielle des phonèmes peut être mise à jour.

7.1. Perception catégorielle chez l'apprenti-lecteur avec ou sans difficulté

Un consensus existe sur l'importance de déficits d'ordre phonologique dans la dyslexie chez l'enfant. Il convient aujourd'hui d'essayer de mieux comprendre en quoi ce système phonologique est atypique. Il ne permettrait pas de réaliser correctement les épreuves de perception catégorielle des phonèmes. Deux caractéristiques émergent de l'analyse des réponses des dyslexiques dans les tâches d'identification et de discrimination de phonèmes : il s'agit d'une perception trop faible de la frontière phonémique dans un continuum entre deux phonèmes, et d'une perception atypique des allophones.

7.1.1. Difficulté de perception des frontières phonémiques dans la dyslexie

En premier lieu, les réponses des dyslexiques témoignent de représentations de catégories phonémiques dont les frontières sont floues, utilisées de manière instable. Cette anomalie apparaît à la fois dans les épreuves d'identification et de discrimination de phonèmes.

Chez les lecteurs sans difficulté, dans les expériences demandant d'identifier des exemplaires plus ou moins typiques de deux phonèmes (A et B), faisant partie d'un continuum acoustique entre des représentants typiques de A et de B, le pourcentage de réponses utilisant le nom de l'un de ces phonèmes chute brutalement à un endroit précis du continuum. Cet endroit délimite une frontière phonémique, marquée par un changement brusque sur la courbe des pourcentages de réponse. Un changement marqué par une pente abrupte refléterait l'utilisation de représentations de catégories phonémique claires, aux limites tranchées et mobilisées de manière homogène dans l'expérience. Chez l'homme, il serait la marque d'une perception linguistique permettant de distinguer des catégories de sons de manière stable selon des critères pertinents pour la langue. Chez les enfants dyslexiques, cette pente est moins abrupte que chez les participants de même âge mais sans difficulté de lecture, car leurs réponses sont moins homogènes. Plusieurs études ont montré cet effet, chez des enfants très jeunes lecteurs (7 ans) mais déjà en difficulté dans cet apprentissage (Chiappe, Chiappe & Siegel, 2001) et chez des enfants dyslexiques de 8-9 ans (Maassen, Groenen, Crul, Assman-Hulsmans & Gabreëls, 2001 ; Werker & Tees, 1987) ou de 10 ans (Godfrey et al., 1981), surtout s'ils sont particulièrement en difficulté (enfants SLI, *Specific Language Impairment*) (Joannisse, Manis, Keating & Seidenberg, 2000). Notons cependant que les différences de pente sont souvent subtiles. Par exemple, Maassen et al. (2001) observent une pente significativement différente chez les enfants dyslexiques seulement pour une différence de voisement et pas pour le lieu (la tendance observée étant cependant près du seuil de significativité), et cette différence pourrait ne refléter qu'un retard de développement, car elle est significative avec le groupe contrôle pour l'âge, mais pas avec le groupe contrôle pour le niveau de lecture (enfants plus jeunes). Ces auteurs soulignent que les tâches de discrimination ont une meilleure valeur clinique que les tâches d'identification.

Les épreuves de discrimination de phonèmes mettent en effet à jour des catégories phonémiques aux frontières floues chez les enfants dyslexiques, d'une manière plus unanime à travers les études. Le taux de discrimination entre deux stimuli sur un continuum est normalement plus élevé s'ils appartiennent à des catégories phonémiques différentes (et sont donc associés à des noms de phonèmes différents) que s'ils constituent deux exemplaires d'une même catégorie. Chez les dyslexiques, ce pic de discrimination est moins élevé à la frontière phonémiques que chez les contrôles de même âge (Bogliotti et al., 2008 ; Godfrey et al., 1981 ; Serniclaes et al., 2001 ; Werker & Tees, 1987) ou chez les contrôles plus jeunes mais de même niveau de lecture (Bogliotti et al., 2008 ; Maassen et al., 2001, pour le néerlandais ; Ortiz et al., 2007, pour l'espagnol). Serniclaes, Ventura, Morais et Kolinsky (2005) ont de plus montré, dans une étude conduite auprès d'adultes lecteurs et non-lecteurs, que les résultats de ces deux groupes en perception catégorielle ne diffèrent pas, suggérant que les anomalies de perception catégorielle chez les enfants dyslexiques sont en fait une cause et non une conséquence de leurs problèmes de lecture.

Parfois, il arrive qu'une même étude relate les deux indices de traitement atypique de la frontière phonémique chez des enfants en grande difficulté avec l'apprentissage de la lecture. Par exemple, Bogliotti et al. (2002) ont analysé le traitement de la frontière phonémique pour un continuum /do/-/to/ par des enfants de 10 ans, francophones et faibles lecteurs. Lorsqu'il s'agit d'identifier les phonèmes, les réponses des enfants faibles lecteurs n'ont pas fait apparaître de frontière phonémique, alors que cette frontière est claire chez les

enfants bons lecteurs du même âge, entre les VOTs de valeur 0 ms et +20 ms. De plus, dans la tâche de discrimination, les enfants bons lecteurs présentent un pic de discrimination lorsque les VOTs des consonnes présentées sont de 0 et +20 ms, ou de 10 et 30 ms. Ce pic ne se manifeste pas chez les enfants faibles lecteurs. Recherchant aussi plusieurs indices de déficit de perception catégorielle des phonèmes, Maassen, Groenen, Crul, Assman-Hulsmans et Gabreëls (2001) ont comparé les performances d'enfants dyslexiques en néerlandais avec cette fois deux groupes contrôles (l'un pour l'âge, l'autre pour le niveau de lecture). Dans l'épreuve d'identification, un déficit est apparu chez les dyslexiques mais seulement pour le voisement (et non pour le lieu) et seulement par rapport au groupe contrôle pour l'âge. Si l'étude s'était limitée à cette tâche, elle aurait incité à conclure que ces enfants souffrent d'un simple retard de développement phonologique, restreint d'ailleurs à certains traits. Avoir exploré en plus les performances des enfants dans une tâche de discrimination a cependant permis de montrer que les enfants dyslexiques sont en fait déficitaires pour traiter des différences basées aussi bien sur le lieu que sur le voisement, et ceci par rapport aux deux groupes contrôles. Leur système phonologique semble donc souffrir d'autre chose qu'un simple retard de développement, il est assez largement atypique et s'est développé de manière déviante par rapport à la norme.

A l'âge adulte, plusieurs études ont montré que la catégorisation phonémique atypique n'apparaît pas clairement à travers l'amoindrissement de la pente dans les tâches d'identification, ni l'aplatissement du pic de discrimination à la frontière phonémique (Ruff, Marie, Celsis, Cardebat & Démonet, 2003), mais les réponses des dyslexiques restent tout de même plus lentes que celles des contrôles dans les tâches de perception catégorielle (Schwippert & Koopmans-Beinum, 1998). Si les épreuves de perception catégorielle ne révèlent plus chez eux de déficit phonologique très clair, la catégorisation phonologique s'accompagne toutefois dans leur cas d'activations cérébrales atypiques. Dans une étude en TEP, Dufor, Serniclaes, Sprenger-Charolles et Démonet (2007) montrent notamment que la discrimination des syllabes /ba/ et /da/ par des contrôles s'accompagne d'activations gauches en régions temporelle supérieure, pariétale inférieure et fronto-latérale inférieure. Ces deux dernières régions sont moins activées chez des dyslexiques adultes, qui activent en contrepartie davantage le cortex frontal droit. Une analyse de corrélation des résultats de cette étude a d'ailleurs montré que l'augmentation de l'activation du cortex frontal inférieur gauche correspond à une amélioration du traitements catégoriels des phonèmes chez les bons lecteurs, mais à une augmentation de la sensibilité à des catégories allophoniques chez les dyslexiques. Cette différence pourrait témoigner d'une lacune quant à la spécialisation linguistique/phonologique des compétences sous tendues par cette région cérébrale (Dufor, Serniclaes, Sprenger-Charolles & Démonet, 2009). Des données similaires ont été recueillies en IRMf. Ruff et al. (2003) ont ainsi utilisé une série de syllabes formant un continuum entre /pa/ et /ta/. Lorsqu'ils écoutent passivement une série de syllabes dont l'une est phonémiquement déviante, des adultes francophones présentant des séquelles de dyslexie développementale phonologique se distinguent par une absence d'activation dans le gyrus angulaire et dans des aires cérébrales importantes pour l'attention auditive. Ces activations cérébrales atypiques chez les dyslexiques adultes sont parfois le seul indice d'un traitement atypique des catégories phonémiques. Une recherche toute récente suggère que les régions cérébrales impliquées dans le traitement de différences phonémiques pourraient avoir chacune un rôle un peu différent, notamment selon le caractère phonémique ou non des différences acoustiques perçues chez les personnes non dyslexiques. Ainsi, l'activation d'une région située dans le sillon frontal inférieur gauche serait modulée par un changement acoustique seulement s'il représente une frontière phonémique (cette région serait importante pour le traitement de l'invariance dans une

catégorie phonémique), alors que l'activation de régions temporales supérieures gauches serait sensible aux changements acoustiques impliquant ou non le passage d'une frontière phonémique (Myers, Blumstein, Walsh & Eliassen, 2009). Une autre aire, située dans le cortex préfrontal gauche, permettrait normalement un mécanisme de décision pour trancher entre les résultats de ces différents traitements, et déterminerait ce qui fonde la réponse catégorielle. Il est possible d'imaginer qu'un dysfonctionnement de cette région cérébrale préfrontale, et relevant des fonctions exécutives, soit à l'origine de la perturbation du traitement des traits phonologiques par rapport aux variations simplement acoustiques et allophoniques chez certaines personnes atteintes de dyslexie.

Par rapport à notre questionnement, il est important de noter que les difficultés de discrimination des enfants dyslexiques se manifestent par une augmentation de leurs erreurs devant des paires de stimuli qui ne diffèrent que par un seul trait phonologique. Lorsque les phonèmes à discriminer diffèrent par davantage de traits, les enfants dyslexiques ne sont plus générés par la diminution du délai entre les stimuli présentés (Mody, 1993). Par exemple, le raccourcissement du délai s'accompagne d'une augmentation d'erreurs pour discriminer /ba/-/da/, mais pas pour discriminer /ba/-/sa/. Il apparaît aussi que, lorsqu'il s'agit de rappeler l'ordre de présentation de deux stimuli, seuls les couples qui diffèrent par un seul trait (e.g., /ba/-/da/) et non par trois traits (e.g., /ba/-/sa/) posent des difficultés aux enfants mauvais lecteurs (Mody, Studdert-Kennedy & Brady, 1997). De même Adlard et Hazan (1998) ont montré que les paires de stimuli significativement plus mal discriminées que les autres sont celles qui diffèrent par un seul trait. Cela suggère des difficultés à traiter des stimuli similaires du point de vue phonologique, plutôt qu'une simple difficulté à traiter des indices acoustiques à changement rapide. Chez des adultes dyslexiques, d'autres données ont d'ailleurs montré des difficultés à discriminer des consonnes fricatives, alors que les rapides transitions formantiques ne seraient pas l'indice acoustique majeur pour identifier le lieu d'articulation (Masterson, Hazan & Wijayatilake, 1995). L'origine de la difficulté de discrimination pour les dyslexiques relève donc sans doute davantage de la similarité phonologique (en termes de recouvrement de traits), plutôt que de la brièveté des indices acoustiques des contrastes traités.

7.1.2. Perception atypique des allophones dans la dyslexie

La perception phonémique anormale chez les personnes dyslexiques se manifeste aussi par une autre anomalie : un traitement particulier des allophones. Dans leur étude de 2001, Serniclaes et ses collègues ont montré la tendance des enfants dyslexiques à percevoir des différences acoustiques entre les exemplaires d'une catégorie phonémique que les contrôles ne discriminent pas. Les études sur la perception catégorielle chez les dyslexiques (Sprenger-Charolles & Serniclaes, 2004) suggèrent que l'origine de leur déficit proviendrait d'une anomalie de la perception catégorielle des phonèmes, sans conséquences évidentes pour la communication orale, mais avec une forte présomption d'incidence sur l'acquisition du langage écrit. En particulier, ce déficit pourrait expliquer les difficultés qu'ils rencontrent dans la mise en œuvre de la procédure par médiation phonologique, qui nécessite de relier les graphèmes aux phonèmes correspondants. Selon ces auteurs, le dyslexique perçoit des allophones d'un même phonème ; si tel est le cas, il va alors difficilement pouvoir effectuer l'opération de conversion graphèmes-phonèmes. Ce déficit pourrait également expliquer sa déficience en mémoire à court terme phonologique, pouvant provenir du poids des exigences de stockage dues à la taille élargie du répertoire catégoriel (allophonique plutôt que phonémique).

D'après d'autres études, cette trop grande sensibilité acoustique n'est pas tout à fait générale, mais consisterait surtout à accorder trop d'importance à des différences acoustiques particulières, en dehors des frontières pertinentes. La perception de telles différences correspondrait au maintien, anormal, de certaines prédispositions (mais pas toutes) permettant au bébé de moins de 9 mois de discriminer les phonèmes de toutes les langues. Toutefois, Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré et Sprenger-Charolles (2004) parlent d'une perception *allophonique*, et non *phonétique* chez les dyslexiques. Les représentations phonologiques des dyslexiques ne seraient pas organisées autour de phonèmes, mais autour d'allophones, qui sont des variations d'un même phonème se manifestant en production de parole, dans la langue étudiée, sous l'effet de la coarticulation. Il ne s'agit donc pas de toutes les variations possibles dans toutes les langues du monde, mais seulement de celles qui ont des représentants dans la langue étudiée, sans avoir pour autant une valeur contrastive. Percevoir de manière allophonique ne permet donc pas aux enfants dyslexiques d'être plus sensibles que les autres à des frontières phonétiques totalement absentes de leur langue. Les allophones sont en fait des catégories qui devraient avoir perdu leur statut de catégorie phonémique dans la langue parlée par l'individu, mais qui existent tout de même dans la langue étudiée, et dont le maintien compromet l'établissement d'un système phonologique typique de la langue et pertinent pour celle-ci.

Ainsi, Bogliotti et al. (2002) montrent que les enfants mauvais lecteurs ne détectent pas les différences entre tous les exemplaires d'un phonème, mais présentent un pic de discrimination à une étape du continuum (variation progressive du VOT entre des exemplaires de /do/ et /to/) décalée par rapport à celle qui est pertinente pour la langue : leur pic de discrimination est autour de -20 ms de VOT, alors qu'il est entre 10 et 20 ms pour les enfants bons lecteurs. Cette frontière autour de -20 ms de VOT est atypique pour des francophones, mais il existe des langues (e.g., le thaï) présentant une frontière phonémique autour de cette valeur. Ce pic secondaire a été répliqué chez des dyslexiques, autour de -30 ms de VOT (Serniclaes et al., 2004). Même s'ils présentent un pic de discrimination localisé à une frontière phonémique, un pic de discrimination secondaire est parfois observé (Serniclaes et al., 2004) chez les enfants plus jeunes que les dyslexiques, mais de même niveau de lecture. A partir de ces premiers résultats, les auteurs ont conclu que les enfants dyslexiques souffrent vraisemblablement d'un retard dans l'élaboration de leur système phonologique ; leur tendance à percevoir de manière allophonique diminuerait d'ailleurs un peu avec l'âge. Cependant, dans une étude plus récente, Bogliotti et al. (2008) ont cependant montré que ce pic de discrimination secondaire caractérise les enfants dyslexiques par rapport à un groupe contrôle plus jeune mais de même niveau de lecture. Pour eux, ce déficit de perception catégorielle n'est donc la conséquence ni d'une trop faible exposition au matériel écrit, ni de leur faible niveau de lecture, et il ne s'agirait pas non plus d'un simple retard de développement du système phonologique : les enfants dyslexiques mettraient en place un système phonologique déviant. La position de ce pic chez les enfants mauvais lecteurs n'est pas arbitraire, et pourrait s'expliquer par le maintien trop fort de dispositions phonétiques anciennes, qui n'ont pas été modifiées assez précisément par l'expérience linguistique pour permettre des traitements phonologiques typiques.

En français, dans le système phonologique des jeunes enfants, une combinaison (coupling) s'opère normalement entre les deux frontières perçues avant 6 mois pour le voisement (une frontière autour de -20 ou -30 ms de VOT, une autre autour de +30 ms de VOT), pour ne retenir qu'une frontière autour de 0 ms de VOT qui correspondra à la différence perçue entre des consonnes sourdes et sonores (Bogliotti et al., 2008). Les enfants dyslexiques ne réaliseraient pas, ou mal, cette combinaison. Ils utiliseraient alors des représentations allophoniques, plutôt que phonémiques, des sons de la parole.

Autrement dit, les allophones (simples variantes contextuelles d'un phonème présentes dans la langue, mais n'ayant une valeur phonémique que dans d'autres langues) seraient traités comme des phonèmes différents. Tout se passe comme si ces enfants avaient des difficultés à sélectionner des critères acoustiques pour traiter des différences phonémiques, et lorsque cette sélection s'opère, les critères retenus par l'enfant ne sont pas les plus adaptés à la langue.

Un tel déficit de la représentation perceptive des phonèmes chez les enfants dyslexiques ne constitueraient pas un obstacle majeur à la perception et à la production de la parole : l'accès lexical est possible, et requerrait simplement davantage de ressources de traitement (le répertoire des allophones est plus large que celui des phonèmes). Certaines données montrent d'ailleurs que chez des personnes sans problème particulier avec le langage, la représentation de différences acoustiques / phonétiques très fines, mais ne permettant pas de franchir une frontière de catégorie phonémique, est préservée lors de l'accès lexical (Andruski, Blumstein & Burton, 1994 ; McMurray, Tanenhaus & Aslin, 2002). De même, toujours chez des personnes sans pathologie, les temps de réponse en discrimination et identification de phonèmes augmentent lorsque les stimuli se rapprochent de la frontière phonémique pour un continuum /ba/-/pa/ (Pisoni & Tash, 1974), et l'évaluation de la représentativité des exemplaires d'une catégorie phonémique est cohérente avec leur éloignement avec la frontière (Miller, 1997). Des travaux sur le voisement en français montrent aussi que les auditeurs peuvent évaluer à quel point une consonne entendue en fin de stimulus est un bon représentant ou non d'un phonème du point de vue du voisement. Il est alors demandé aux participants d'identifier une consonne entendue en faisant un choix forcé entre une consonne voisée et la consonne qui diffère de celle-ci seulement par le voisement. Ils doivent ensuite estimer si le stimulus est représentatif du phonème choisi sur une échelle en 5 points. Non seulement cette évaluation est possible, mais elle est réalisée correctement et elle a une réalité cognitive, car les auteurs montrent une corrélation négative entre le degré de voisement ainsi évalué et l'importance de phénomènes d'assimilation que la consonne peut produire (Snoeren, Hallé & Segui, 2006). La sensibilité à des variations intra-catégorielles dans les catégories phonémiques, et donc la sensibilité graduelle aux traits phonologiques, n'est donc pas un obstacle à la perception de la parole. La différence entre les dyslexiques et les personnes qui ne le sont pas est peut-être à rechercher dans la généralité de cette sensibilité intra-catégorielle, ou bien dans la possibilité de sélectionner, lorsque cela est nécessaire, un mode de traitement du langage qui en fait abstraction, grâce au bon fonctionnement d'une région située dans le cortex pré-frontal gauche (Myers, Blumstein, Walsh & Eliassen, 2009).

Lorsqu'elle est inévitable, exacerbée et disproportionnée par rapport à la sensibilité aux frontières phonémiques pertinentes, cette sensibilité pourrait être à l'origine d'une faible conscience phonémique (Chiappe, Chiappe & Siegel, 2001 ; Manis et al., 1997 ; Serniclaes et al., 2004). Ce déficit en conscience phonémique apparaît chez des dyslexiques observés dans diverses langues, par exemple en espagnol, que ces participants soient comparés à des contrôles pour l'âge ou pour le niveau de lecture (Ortiz, Jimenez & Miranda, 2007). La segmentation des phonèmes et leur analyse explicite seraient particulièrement difficiles à acquérir par les dyslexiques, davantage que pour les syllabes (Liberman, Shankweiler, Fisher & Carter, 1974), vraisemblablement parce que les phonèmes ne font pas partie de leur inventaire, ni du processus de codage phonologique qu'ils utilisent couramment (Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi & Sprenger-Charolles, 2008). Selon Werker et Tees (1987), les dyslexiques auraient tout de même des représentations phonémiques, mais elles ne seraient pas assez robustes pour soutenir des traitements efficaces en condition de stress ou de très forte demande cognitive (e.g., traitement du langage dans le bruit).

La lecture, particulièrement pour des apprenti-lecteurs, serait une activité suffisamment stressante pour que la faiblesse des catégories phonologiques se révèle à travers un appariement imparfait des unités orthographiques avec les représentations phonologiques.

Le déficit de conscience phonémique entraverait l'établissement de règles de correspondance graphème-phonème, elles-mêmes déterminantes pour la mise en place de compétences de lecture. L'acquisition de règles de codage graphème-phonème est cruciale pour développer de bonnes compétences en lecture : leur apprentissage précoce permet à l'enfant de devenir un bon lecteur (Share, 1995) et les exercices entraînant cette compétence sont particulièrement efficaces (Ehri, Nunes, Willows, Schuster, Vaghoub-Zadeh & Shanahan, 2001). Les enfants dyslexiques ont très souvent des difficultés à appliquer ces règles, même lorsqu'on les compare à des enfants plus jeunes et de même niveau de lecture (Sprenger-Charolles, Colé, Lacert & Serniclaes, 2000). Cela pourrait s'expliquer par leur perception allographique : il est en effet difficile de comprendre qu'une même lettre serve à symboliser des catégories de sons perçus comme fondamentalement différentes.

7.2. Insensibilité des enfants dyslexiques à la similarité phonologique graduelle

Une étude conduite auprès d'enfants entre 7 et 13 ans a montré leur sensibilité à l'importance de la différence entre une série de consonnes et une consonne déviante, en terme de nombre de traits phonologiques (Wehner, Ahlfors & Mody, 2007). Un stimulus intrus était présenté au cœur d'une série où une autre syllabe était répétée, et sa différence pouvait reposer sur 1 ou 3 traits phonologiques (les consonnes étaient présentées dans les syllabes /bat/, /kat/, /rat/). Les temps de réponses des enfants, qu'ils soient bons ou mauvais lecteurs, étaient d'autant plus rapides que le nombre de traits distincts était élevé. Les enregistrements en magnétoencéphalographie ont montré que les activations cérébrales accompagnant les premiers traitements acoustiques des stimuli ne diffèrent pas entre les groupes. Par contre, chez les enfants mauvais lecteurs, les auteurs observent une réduction de l'activation de l'hémisphère gauche dans la condition la plus difficile (celle où l'intrus ne diffère que par un trait). Alors que le traitement d'une différence entre, par exemple, *bat* et *pat* s'accompagne chez les bons lecteurs d'une activation gauche débutant à 50-100 ms et formant une pointe bilatérale autour de 150-200 ms, elle s'accompagne chez les mauvais lecteurs d'une onde bilatérale, plus tardive et plus nette dans l'hémisphère droit. Les activations cérébrales des enfants faibles lecteurs sont également atypiques parce qu'elles ne sont pas modulées par le degré de recouvrement phonologique entre l'intrus et son contexte. Au-delà d'une certaine sensibilité aux traits phonologiques, les enfants dyslexiques présentent donc des anomalies au niveau des activations cérébrales accompagnant le traitement de ces traits, avec notamment une implication démesurée de l'hémisphère droit (voir aussi Breier et al., 2003), sans doute parce que leurs mécanismes phonologiques ne se déroulent pas de manière classique.

7.3. Difficultés particulières pour certains types de traits et dyslexie

7.3.1. Le voisement

Dans une épreuve de détection d'intrus (une syllabe est répétée et parfois une syllabe déviante est présentée), Wehner et al. (2007) ont montré que les intrus les plus difficiles à

repérés sont ceux qui diffèrent par le voisement. Cette condition requiert plus de ressources que la condition où la différence repose sur le lieu d'articulation. Cette difficulté est vérifiée aussi bien chez les enfants bons lecteurs que chez les enfants faibles lecteurs. Etant donnée cette difficulté particulière pour discriminer des stimuli verbaux selon le voisement chez des enfants sans problème d'apprentissage particulier, il se peut que ce contraste phonologique soit suffisamment difficile pour permettre à une différence entre enfants dyslexiques et enfants témoins d'être significative. Plusieurs études ont justement porté sur les difficultés à traiter cette distinction phonologique en cas de difficulté majeure d'apprentissage de la lecture.

Ainsi, les difficultés de perception catégorielle des phonèmes observées chez des enfants de 10 ans qualifiés de mauvais lecteurs dans l'étude de Bogliotti et al. (2002) ont été mises en évidence à partir de stimuli CV opposés par le contraste de voisement (/do/-/to/). Ces données contribuent à montrer que les difficultés de lecture en français peuvent être associées à un traitement atypique du trait de voisement, sans que cela permette toutefois de dire si ce trait est plus difficile à traiter que les traits de lieu ou de mode. Chez des enfants anglophones atteints d'une dyslexie phonologique, Manis et al. (1997) ont également observé une courbe d'identification sur laquelle la frontière catégorielle est moins nette que chez des enfants contrôles, de même âge ou de même niveau de lecture, pour un continuum entre deux mots qui diffèrent par le voisement de leur consonne occlusive initiale (*bath-path*). De même, la pente correspondant au changement de réponse dans une tâche d'identification est moins abrupte chez des enfants de 7 ans s'ils ont des difficultés à apprendre à lire, dans une expérience construite à partir d'un continuum entre deux phonèmes qui diffèrent par le voisement (/pis/-/bis/) ou (/bif/-/pif), dans l'étude de Chiappe et al. (2001). De même, toujours chez des enfants en difficulté avec l'apprentissage de la lecture, Breier et al., (2001) ont montré un déficit de perception du voisement pour des séries /ga/-/ka/.

Une perception atypique du voisement a aussi été mise en évidence dans des épreuves de discrimination, et non plus d'identification de phonèmes. Dans l'étude conduite en néerlandais par Maassen et al. (2001), nous avons vu que les enfants dyslexiques présentent un développement atypique de leur système phonologique, qui les conduit à être moins performants que les enfants de leur âge, ou des enfants plus jeunes mais de même niveau de lecture, dans une épreuve de discrimination. Dans cette tâche, leur déficit apparaît aussi bien pour le lieu que pour le voisement. Toutefois, dans une épreuve d'identification proposée aux mêmes enfants, seul le traitement du voisement est anormal chez les enfants dyslexiques. Ce résultat permettrait de s'orienter vers l'hypothèse d'une difficulté particulièrement marquée à traiter des phonèmes de manière catégorielle selon le trait de voisement pertinent pour la langue.

Toutefois, Post, Foorman et Hiscock (1997) n'observent pas de différence entre les enfants selon leur niveau de lecture pour ce qui est de la perception de différences de voisement. Ortiz et al. (2007) concluent que, actuellement, les données ne permettent pas de savoir quels sont les contrastes phonologiques qui posent le plus de problèmes aux enfants dyslexiques.

Ortiz et al. (2007) ont comparé les performances en perception de parole d'enfants dyslexiques avec celles de deux groupes contrôles : l'un pour l'âge, l'autre pour le niveau de lecture. Si les résultats des petits patients sont moins bons que ceux des deux groupes contrôles, il est alors possible d'accepter que le déficit en perception de parole ait une relation causale avec le faible niveau de lecture (Goswami, 2003). Par contre, si les performances des enfants dyslexiques sont inférieures à celles du groupe contrôle pour

l'âge, mais non différentes de celles du groupe plus jeune et de même niveau de lecture, alors le résultat ne permet pas de discuter d'un lien causal entre le déficit observé et le faible niveau de lecture. Il serait alors seulement possible de dire que le niveau de perception de parole des dyslexiques n'est pas ce qu'il devrait être étant donné leur âge. Les résultats montrent que les dyslexiques sont moins performants que les deux groupes contrôles en discrimination pour chacun des 3 types de traits (lieu, voisement et mode), ce qui montre qu'il y aurait un lien causal entre la difficulté à traiter les contrastes phonologiques et la dyslexie. Mais les résultats ne permettent pas de savoir quel contraste pose clairement le plus de problèmes à ces enfants.

7.3.2. Le lieu

Nous avons évoqué plusieurs résultats montrant que les enfants dyslexiques opèrent un traitement perceptif atypique de différences entre phonèmes portant tant sur le lieu que sur le voisement (Maassen et al. 2001 ; Ortiz et al., 2007). Pour appuyer l'existence d'une anomalie dans le traitement du lieu d'articulation, nous pouvons aussi évoquer l'étude de Godfrey, Syrdal-Lasky, Millay et Knox (1981). Lorsqu'il s'agit d'identifier ou de discriminer des consonnes occlusives voisées (/b, d, g/) qui diffèrent par le lieu d'articulation, ces auteurs ont montré que des enfants dyslexiques de 10 ans opèrent des catégorisations moins stables que les enfants contrôles et leurs frontières phonémiques sont moins nettement marquées. Ajoutons aussi les résultats présentés par Adlard et Hazan (1998). L'étude conduite par Joanisse, Manis, Keating et Seidenberg (2000) a évalué quant à elle l'identification pour des mots qui s'opposent par le voisement ou par le lieu d'articulation de leur consonne initiale occlusive. Ils ont eux aussi montré que la courbe d'identification pour un continuum entre les deux extrêmes présente une frontière moins abrupte pour les enfants dyslexiques que pour les enfants contrôles. Ce déficit de la perception catégorielle apparaît aussi bien pour le contraste de voisement (*dug-tug*) que pour celui de lieu d'articulation (*spy-sky*). Cependant, cette difficulté semble ne se manifester de manière significative que pour les dyslexiques atteints de troubles phonologiques massifs, comme le montraient aussi Manis et al. (1997). Chez 13 enfants dyslexiques, une série d'épreuves a aussi permis de montrer que les erreurs de discrimination portent surtout sur l'opposition entre des consonnes occlusives. Pour les couples de fricatives, ils relèvent tout de même aussi des pourcentages d'erreurs mesurables (entre 15 et 25%) pour la discrimination du voisement ou du lieu. Les paires pour lesquelles les erreurs des dyslexiques sont les plus systématiques sont des couples de nasales qui s'opposent sur le lieu (« *met* »-« *net* », « *mail* »-« *nail* », « *smack* »-« *snack* »), ainsi que des couples de fricatives qui s'opposent soit sur le lieu, soit sur le voisement (« *fine* »-« *vine* »). Les auteurs complètent ainsi les propos de Mody (1993) qui observait que les plus grandes difficultés se posaient pour les couples phonologiquement les plus similaires (différence d'un seul trait), en ajoutant que cette difficulté est encore accrue lorsque ces traits sont acoustiquement peu saillants. Il ne s'agit pas forcément de traits peu saillants parce que sous-tendus par des indices acoustiques rapides, comme le suggère le travail de Tallal ; ils peuvent être associés à des indices spectraux peu saillants.

Certains chercheurs ont suggéré que le lieu pourrait poser plus de problème aux enfants dyslexiques, car les indices acoustiques des traits de lieu sont brefs et requièrent une intégration rapide. La théorie dite 'auditive' de la dyslexie, qui postule un déficit du traitement de l'information séquentielle rapide, fonde ce type d'hypothèse.

Certaines données vont en ce sens. Csepe, Gyurkocza et Osman-Sagi (1998), par exemple, ont utilisé la MMN comme indice électrophysiologique de la perception d'un contraste. Ils montrent que la plupart des dyslexiques de leur étude présentent un déficit

sévère du traitement des contrastes phonémiques, mais le déficit le plus courant concerne dans leur étude le lieu d'articulation. C'est aussi ce que montreraient de Gelder et Vroomen (1998, cité par Ortiz, 2007).

Toutefois, Ortiz et al. (2007) montrent que les contrastes de lieu sont discriminés de manière particulièrement exacte par tous les groupes, et que les traits de lieu ne posent pas plus de problèmes aux dyslexiques que les autres traits. Ce résultat, qui ne place pas le lieu au rang des traits les plus difficiles à traiter par les dyslexiques, est compatible avec l'hypothèse d'un déficit des représentations et du codage phonologique, plutôt qu'avec celle d'un déficit du traitement temporel de l'information acoustique dans la dyslexie.

Chapitre 2 : Problématique et hypothèses générales

Questions centrales de la thèse.

Dans le cadre général des travaux sur le rôle des connaissances phonologiques dans le processus de reconnaissance de mot écrit, l'objectif de notre thèse est de contribuer à mieux décrire la nature du code impliqué et de comprendre les mécanismes par lesquels les connaissances phonologiques interviennent en lecture. La recherche que nous présentons s'articule pour cela autour de quelques idées majeures, que nous testons dans une série de 12 expériences.

Nous voudrions avant tout défendre l'idée selon laquelle **les premières étapes du processus de reconnaissance de mot écrit impliquent un code phonologique suffisamment fin pour être décrit en termes de traits phonologiques**. Dans la partie théorique, nous avons présenté une proposition de modèle de lecture articulant deux mécanismes basés sur les traits phonologiques et l'orientation de nos hypothèses sera guidée par les contraintes de ce modèle. Concrètement, il s'agira de montrer que **le partage de traits phonologiques par les différentes consonnes d'un mot écrit détermine la vitesse d'identification des lettres de ce mot**. Avant la réalisation de notre travail de thèse, nous avons conduit des expériences étudiant ces effets chez les adultes et les enfants normo-lecteurs. Nous avons résumé ces données dans la partie théorique : le partage de traits phonologiques par les consonnes d'un stimulus écrit CVCV exerce des effets différents sur l'identification de la première et de la deuxième consonne ; ces effets sont toutefois différents chez les jeunes lecteurs avant le CE2 et les lecteurs plus âgés. Nous en avons conclu que les mécanismes phonologiques impliqués en lecture évoluent au cours de la scolarité en école primaire. Notamment, les effets explicables par l'établissement de relations d'inhibition latérale, parmi les connaissances phonologiques, ne s'observent qu'à partir du CE2. Les perturbations de ces mécanismes seront étudiées dans notre thèse auprès d'**enfants dyslexiques**, présentant ou non d'importants troubles phonologiques.

Le prolongement de cette réflexion sur le rôle des traits phonologiques en lecture consistera à mieux connaître le **décours temporel des deux mécanismes phonologiques** proposés dans le modèle, et à évaluer le **rôle de la présence simultanée de plusieurs syllabes écrites sur l'engagement de ces mécanismes**. La notion de catégorie de traits sera ensuite intégrée. Nous avons rapproché et présenté des éléments de la littérature scientifique au sujet de la pertinence cognitive de cette typologie des traits dans diverses activités langagières. Nous aimerions compléter en apportant des indices de cette **organisation catégorielle des traits** dans des situations de lecture. Ici encore, la question sera traitée chez de jeunes adultes bons lecteurs, des enfants normo-lecteurs et des enfants dyslexiques.

La dernière idée centrale dans cette thèse concerne l'**organisation hiérarchique de ces catégories de traits**. Pour cela, nous interrogeons cette hiérarchie tant dans des expériences de lecture que dans des épreuves métalinguistiques, toujours auprès d'adultes, d'enfants normo-lecteurs et d'enfants dyslexiques.

Mécanisme d'inhibitions latérales dans le système phonologique et dyslexie.

Dans de précédents travaux (Bedoin, 2003 ; Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003 ; Krifi, Bedoin & Herbillon, 2003), nous avons montré des effets de partage de traits phonologiques à l'intérieur d'un stimulus écrit unique chez des adultes bons lecteurs et dès le CE2 chez les enfants. Qu'en est-il chez les enfants dyslexiques ? Dans cette thèse, nous essaierons de montrer qu'au-delà de l'apport potentiel, et modeste, de quelques éléments à l'ensemble des recherches fondamentales développées à propos des traitements phonologiques en lecture, ces recherches peuvent aussi conduire à poser des hypothèses nouvelles concernant les déficits cognitifs à l'origine de difficultés persistantes d'apprentissage de la lecture. Ainsi, nous nous proposons d'évaluer la sensibilité des enfants dyslexiques au partage du voisement par les consonnes d'un stimulus écrit.

Nous faisons tout d'abord l'hypothèse que les enfants dyslexiques présentent sur ce plan des anomalies qui témoigneraient d'une **absence ou d'un retard de la mise en place des relations d'inhibition latérale entre phonèmes** (Hypothèse 1).

De plus, nous proposons **l'Hypothèse 2**, dans une **perspective résolument pluraliste de l'étude de la dyslexie développementale**, supposant l'existence de déficits cognitifs distincts à l'origine de deux types de dyslexie chez l'enfant : une forme dans laquelle les difficultés d'apprentissage de la lecture sont associées à d'importants troubles phonologiques, et une autre dans laquelle ces troubles phonologiques ne sont pas détectés avec les bilans, pourtant complets, réalisés dans les Centres de Référence des Troubles du Langage et des Apprentissages. Ainsi, nous supposons que les enfants dyslexiques avec trouble phonologique pourraient présenter une absence de sensibilité à des traits phonologiques en lecture, alors que le déficit des enfants dyslexiques sans trouble phonologique ne serait pas aussi radical. Ils pourraient par exemple ne souffrir que d'un retard dans l'établissement d'une organisation phonologique basée sur des inhibitions latérales. Sans réduire l'origine de l'un ou l'autre type de dyslexie aux seuls déficits dont nous cherchons à montrer l'existence, nous testerons donc l'hypothèse d'anomalies phonologiques distinctes chez les deux types de patients dans l'Expérience 1.

Mise en évidence de deux mécanismes phonologiques en lecture, basés sur le trait de voisement.

Nos études précédentes (Bedoin, 2003 ; Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003) ont permis de mettre en évidence des effets de similarité infra-phonémique entre les deux consonnes d'un stimulus écrit unique CVCV. Nous avons proposé de les interpréter en décrivant un modèle (paragraphe 3 du chapitre 1) inspiré du modèle d'Activation Interactive de McClelland et Rumelhart (1981). Nous montrons ainsi un effet d'amorçage facilitateur de la première consonne sur la deuxième, que nous expliquons par un mécanisme d'activation rapide basé sur des relations ascendantes, et un effet négatif de la similarité, que nous expliquons par un mécanisme d'inhibition latérale entre phonèmes. Toutefois, l'existence du mécanisme le plus rapide (produisant un amorçage facilitateur) n'a été jusqu'ici mise en évidence que chez de très jeunes lecteurs pour la similarité de voisement, et pour des traits de lieu et de mode (mais pas de voisement) chez les adultes.

Notre objectif est de trouver des indices de ce mécanisme phonologique précoce, à partir du voisement. Nous chercherons aussi à préciser à quel délai de traitement il intervient. Nous réaliserons pour cela les Expériences 2a, 2b et 2c, dans lesquelles les consonnes partagent ou non le trait de voisement, avec des durées de présentation variables, de 33, 66 et 100 ms pour le stimulus C₁VC₂V. Notre **Hypothèse 3** est que les indices de l'intervention de ce mécanisme activateur pourraient apparaître pour la durée de présentation la plus brève (33 ms, Expérience 2a). Par contre, avec une présentation excédant 50 ms (Expériences 2b et 2c), le mécanisme d'inhibition latérale viendrait le court-circuiter, annulant les traces de son intervention (comme cela pourrait se produire aussi dans l'Expérience 1, avec une présentation de 50 ms). Concrètement, étant donné que, en cas de partage de trait phonologique, le premier mécanisme basé sur des relations ascendantes activatrices est censé se manifester par une amélioration du traitement de la deuxième consonne (C₂), notre hypothèse est que le partage du trait de voisement par les deux consonnes améliorera le traitement de C₂ avec une durée de présentation de 33 ms. Par contre, le mécanisme d'inhibition latérale est quant à lui censé induire une détérioration du traitement de C₂ et une amélioration du traitement de la première (C₁) en cas de partage de traits phonologiques par les deux consonnes. Nous prédisons donc que ces deux dernièrseffets pourraient se manifester avec des durées de présentation de 66 ou de 100 ms en cas de partage du voisement (**Hypothèse 4** ,Expériences 2b, 2c).

Mécanismes phonologiques en lecture et simultanéité de la présentation des lettres.

Les deux mécanismes que nous étudions sont appréhendés dans un contexte particulier, qui se rapproche d'une situation de lecture normale, en ce sens que le traitement de la première consonne se fait en présence de la deuxième au sein du stimulus CVCV. La présence simultanée des deux syllabes n'est peut-être pas anodine dans le déclenchement du mécanisme d'inhibition latérale. La mise en œuvre de relations d'inhibition latérale pourrait être favorisée par cette concurrence directe et d'emblée évidente entre les lettres en présence.

Aussi pouvons-nous imaginer qu'une présentation successive de chacune des syllabes n'encourage pas le développement du mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale et permet un traitement plus indépendant des deux syllabes. Notre **Hypothèse 5** est que le mécanisme basé sur les inhibitions latérales ne se développera pas suffisamment pour réduire les performances sur le traitement de C₂ en cas de partage de voisement, si C₁ disparaît avant C₂. En revanche, la plus grande rapidité de déclenchement du mécanisme impliquant les relations ascendantes activatrices lui permettrait de se produire, même dans de telles conditions. C'est pourquoi nous prédisons que le partage du voisement pourrait faciliter le traitement de C₂ en cas de présentation successive des deux syllabes d'un pseudo-mot C₁VC₂V. Cette hypothèse sera testée avec une durée de présentation de 50 ms pour chacune des syllabes (Expérience 3a) et une durée de 66 ms (Expérience 3b).

Deux mécanismes phonologiques basés sur les traits en lecture : cas particulier du voisement.

S'ils confortent notre Hypothèse 5, les résultats des Expériences 3a et 3b devraient permettre de montrer l'implication du mécanisme impliquant les relations activatrices, en ce qui concerne le voisement. Ils permettront donc aussi de compléter la discussion à propos de l'Hypothèse 3, et ceci dans une situation imposant une forte demande. L'objectif de l'Expérience 4 est d'apporter une preuve supplémentaire à l'implication de ce mécanisme particulièrement rapide, et transitoire. Le but dans cette expérience est donc d'aménager des conditions favorables à l'observation des effets de ce mécanisme, en cas de ressemblance de voisement, pour confirmer qu'il se produit tout de même. Afin d'accroître les chances d'accéder aux effets de ce premier mécanisme, la présentation des stimuli C₁VC₂V sera particulièrement rapide, et la tâche très exigeante : les participants devront produire immédiatement à voix haute l'une des deux syllabes (C₁V ou C₂V) selon la consigne préalable. Dans cette tâche de production, l'intervention attendue d'un mécanisme d'amorçage phonologique facilitateur pourrait se traduire par deux phénomènes : nous attendons tout d'abord une plus grande exactitude de production de C₂ dans la condition où cette consonne a le même trait de voisement que C₁ (**Hypothèse 6**). D'autre part, à partir du modèle que nous proposons, nous pouvons aussi prédire que la proportion d'erreurs ne préservant pas le voisement de la cible C₂ sera plus élevée dans la condition où C₂ et C₁ ont un voisement différent que dans la condition où ils partagent le trait de voisement (**Hypothèse 7**). En effet, après l'extraction rapide du voisement de C₁, d'autres phonèmes contenant ce trait devraient être pré-activés, grâce au premier mécanisme d'activation phonologique. Si C₁ et C₂ n'ont pas le même voisement, cela devrait induire beaucoup d'erreurs consistant à produire pour C₂ un phonème dont le voisement est celui de C₁. Par contre, si C₁ et C₂ partagent le même voisement, même en cas d'erreur de production du phonème C₂, celui-ci devrait préserver le voisement de C₂, qui est le même que celui de C₁.

Organisation catégorielle des traits phonologiques en lecture.

Les expériences précédentes ne manipulent que la ressemblance phonétique de voisement entre les deux consonnes d'un stimulus écrit C₁VC₂V. Une nouvelle série d'expériences propose ici de vérifier que les lecteurs sont sensibles au partage de différents types de traits phonologiques par les consonnes de stimuli écrits : le voisement, mais aussi des traits de mode ou de lieu d'articulation.

L'Expérience 5a tentera tout d'abord de répliquer l'effet du partage de traits de voisement, dans une tâche de lecture imposant un traitement très rapide et précis de la position des lettres, puis l'Expérience 5b testera la sensibilité des lecteurs au partage du trait de mode. Ces deux expériences sont associées à plusieurs hypothèses, basées sur le modèle de lecture que nous proposons et selon lequel les adultes bons lecteurs élaborent une organisation des phonèmes intégrant des relations d'inhibition latérale dont le poids varie avec les traits phonologiques partagés par les phonèmes. Nous supposons tout

d'abord que les lecteurs adultes identifieront moins bien la consonne C_2 dans un pseudo-mot C_1VC_2V si C_1 et C_2 partagent la même valeur de voisement que si elles diffèrent sur ce point, même lorsque la tâche impose un traitement précis de la position des lettres (**Hypothèse 8** , Expérience 5a). Selon l' **Hypothèse 9** , nous supposons que, dans les mêmes conditions, les lecteurs adultes identifieront mieux la consonne C_1 dans un pseudo-mot C_1VC_2V présenté rapidement si C_1 et C_2 partagent la même valeur de voisement que si elles diffèrent sur ce point (Expérience 5a), grâce à une réduction de l'effet de masquage produit par C_2 sur C_1 . De façon analogue, nous posons l' **Hypothèse 10** d'une moins bonne identification de C_2 par les lecteurs adultes si C_1 et C_2 partagent la même valeur de mode (fricatif ou occlusif) que si elles diffèrent sur ce point(Expérience 5b). Les lecteurs adultes devraient également mieux identifier la consonne C_1 si elle partage avec C_2 la même valeur de mode (fricatif ou occlusif) (**Hypothèse 11**).

Enfin, l'Expérience 5c teste dans une même épreuve la sensibilité des lecteurs à trois types de similarité infra-phonémique : le partage de traits de voisement, de lieu ou de mode. Il s'agit alors de trouver de nouveaux arguments en faveur d'une organisation non-linéaire des traits phonologiques. Etant donné que des travaux réalisés en perception et en production de parole montrent que l'influence de la ressemblance phonologique entre des unités successives varie selon les types de traits impliqués, nous prédisons que l'effet du partage de traits en lecture suit aussi cette règle. Les travaux en perception et production de parole permettent d'ériger le mode d'articulation au sommet de la hiérarchie des catégories de traits, la position relative du lieu et du voisement étant plus variable selon les situations expérimentales. Cela nous conduit à formuler l' **Hypothèse 12** : les lecteurs devraient être davantage sensibles au partage de traits phonologiques par les consonnes d'un stimulus écrit si ces traits relèvent du mode d'articulation plutôt que du lieu d'articulation ou du voisement (Expérience 5c).

Hiérarchie des traits phonologiques.

Notre hypothèse générale est que les traits phonologiques du français ne sont pas représentés de manière linéaire, mais sont rassemblés en catégories telles que le mode d'articulation, le lieu d'articulation et le voisement. Une hiérarchie des différents types de traits phonologiques se dégage de la littérature ainsi que des résultats des Expériences 5a, 5b et 5c. Peut-on retrouver des éléments complémentaires à propos d'une telle organisation hiérarchique à partir d'un autre type de tâche ? Cette hiérarchie se met-elle en place progressivement chez les enfants normo-lecteurs ? Ce développement est-il atypique chez les enfants dyslexiques ? Cela dépend-il du type de dyslexie présenté par l'enfant ?

Afin de tester la pertinence de telles catégories pour le système cognitif, nous avons élaboré une épreuve métalinguistique permettant d'évaluer si les participants faisaient des rapprochements entre des consonnes simplement sur la base du nombre de traits partagés ou si le partage de traits relevant de l'une ou l'autre de ces catégories introduisait des biais dans les choix (Expériences 6a et 6b). Le principe est de proposer une syllabe CV cible écrite, puis deux autres syllabes. La cible doit être appariée à l'une des deux syllabes proposées, en fonction de leur proximité phonologique. La cible partage toujours un seul trait avec chacune des syllabes proposées. Dans trois blocs séparés, nous comparons ainsi le poids implicitement accordé aux traits de voisement, lieu et mode d'articulation. L'analyse

devrait permettre de savoir si les choix d'appariement dépendent seulement du nombre de traits partagés, auquel cas les réponses ne devraient pas différer du hasard dans ces situations de choix forcé. Si les participants ont par contre une préférence pour apparier les syllabes qui partagent des traits d'une certaine catégorie, cela constituera un argument pour la pertinence de cette catégorie du point de vue de la cognition, et pour la prépondérance de son statut. Peu de travaux portent directement sur cette question, mais ceux que nous avons synthétisés suggèrent que le mode d'articulation pourrait être la catégorie la plus organisatrice chez les adultes et les enfants normo-lecteurs. Nous prédisons donc qu'ils apparieront plus fréquemment les syllabes en fonction du partage de mode, plutôt que du partage de lieu ou de voisement (**Hypothèse 13**). Nous posons aussi l' **Hypothèse 14** d'une mise en place progressive de la hiérarchie des catégories de traits comme critère d'organisation des consonnes chez les enfants pendant la période où ils apprennent à lire. Enfin, nous supposons que les enfants dyslexiques présentent une organisation différente de ces trois catégories de traits, et des anomalies particulièrement marquées sont attendues chez les enfants présentant une dyslexie de type phonologique plutôt qu'une dyslexie de type surface (**Hypothèse 15**).

L'objectif de ce travail de thèse est donc de confirmer l'intervention de la phonologie dans les étapes précoces du processus de reconnaissance de mot écrit, de préciser la nature des connaissances impliquées et de connaître quelques-unes des contraintes pour leur intervention : quel est le déroulement temporel des activations phonologiques et comment varient-elles selon les types de traits ? D'autre part, cette thèse vise à apporter des arguments en faveur de l'existence de troubles phonologiques chez les enfants dyslexiques, à préciser certaines anomalies de leurs représentations au niveau infra-phonémique, tout en tenant compte de disparités possibles dans ces anomalies selon le type de dyslexie.

Chapitre 3 : Partie expérimentale

1. Sensibilité au voisement et dyslexie : Expérience 1

De précédents travaux en lecture ont montré chez l'adulte des effets qui pourraient s'expliquer par l'implication d'un niveau de connaissances phonologiques organisées selon des relations d'inhibition latérale entre phonèmes (Bedoin, 2003 ; Bedoin & Krifi, 2009). L'intervention de tels effets a également été montrée chez les enfants normo-lecteurs à partir du CE2, mais pas avant ce qui suggère la mise en place progressive de cette organisation des connaissances phonologiques avec l'âge (Krifi, Bedoin & Herbillon, 2004 ; Krifi & Bedoin, 2009). Ces relations d'inhibition pourraient permettre d'éviter des confusions en lecture.

L'objectif de l'Expérience 1, construite à partir du logiciel PsyScope (Cohen, Whinney, Flatt & Provost, 1993), est de mettre en évidence et de mieux comprendre les anomalies des traitements phonologiques à un niveau infra-phonémique en lecture chez les enfants dyslexiques. Ainsi, nous nous proposons d'évaluer leur sensibilité au partage du voisement par les consonnes d'un stimulus écrit. Nous faisons tout d'abord l'hypothèse que les enfants dyslexiques présentent sur ce plan des anomalies qui témoigneraient d'une absence ou d'un retard de la mise en place des relations d'inhibition latérale entre phonèmes (hypothèse 1). Par ailleurs, nous supposons que les anomalies présentées par les enfants dyslexiques seront différentes selon le type de dyslexie (hypothèse 2). Nous opérationnaliserons cette hypothèse en comparant les performances d'enfants présentant une dyslexie développementale sans trouble phonologique avec celles d'enfants présentant une dyslexie développementale avec trouble phonologique, appariés en âge chronologique et en âge lexique. Nous supposons que les résultats des enfants dyslexiques avec trouble phonologique témoignent d'une absence de sensibilité à des traits phonologiques en lecture, alors que les enfants dyslexiques sans trouble phonologique ne présenteraient pas sur ce plan un déficit aussi radical. Ils pourraient par exemple ne souffrir que d'un retard dans l'établissement d'une organisation phonologique basée sur des inhibitions latérales.

1.1. Méthode

a. **Participants** . Trente-six enfants dyslexiques ont participé à cette expérience (67% de garçons, 33% de filles ; âge moyen = 10 ans 11 mois, écart-type = 1 an 3 mois).

Ces enfants ont été testés au Centre Hospitalier Lyon-Sud¹, à l'Hôpital Debrousse² et à l'Hôpital Femme-Mère-Enfant³ dans le cadre d'un programme de recherche et d'un bilan neuropsychologique au Centre de Référence des Troubles des Apprentissages pour lesquels ils étaient convoqués sur une journée. Tous étaient de langue maternelle française, et avaient avec ou sans correction une vue normale. Nous avons pour chacun d'entre eux rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory

¹ Service de Neuropédiatrie du Pr. David, consultations pédiatriques, Pierre-Bénite (69).

² Unité de Neuropédiatrie du Pr. des Portes, consultations neuropsychologiques, Lyon (69).

³ Service de Neuropédiatrie du Pr. des Portes, consultations neuropsychologiques, Bron (69).

(Oldfield, 1971) : 87% étaient droitiers et 13% gauchers (indice moyen de latéralité manuelle = 84%, écart-type = 18%).

La passation individuelle de l'expérience était précédée d'un bilan neuropsychologique de langage écrit, permettant de diagnostiquer le type de dyslexie. Ce bilan comportait une épreuve de lecture de mots et non-mots (BALE), une dictée de mots et non-mots (BALE), sept épreuves de conscience phonologique(extraites de l'Odédys et du BALE, Laboratoire Cogni-Sciences et Apprentissages – IUFM Grenoble, 1999), et une à trois épreuves visuo-attentionnelles (Valdois et al., 2003). Par ailleurs, pour chaque enfant, un test psychométrique était demandé au préalable, ainsi qu'un bilan auditif et ophtalmologique, afin d'exclure un retard intellectuel ou un trouble sensoriel. Pour chacun d'entre eux également, le neuropsychologue remplissait avec les parents les critères du DSM-IV concernant le trouble attentionnel avec ou sans hyperactivité, afin d'exclure la présence d'un tel trouble.

Parmi les 36 enfants testés, 23 présentaient une dyslexie avec trouble phonologique, et 13 une dyslexie sans trouble phonologique. Par ailleurs, pour 26 d'entre eux, nous avons pu procéder à un appariement deux à deux, en âges chronologique et lexique, des enfants dyslexiques avec troubles phonologiques (moyenne d'âge chronologique = 10 ans 10 mois ; moyenne d'âge lexique = 8 ans) et des enfants dyslexiques sans troubles phonologiques (moyenne d'âge chronologique = 10 ans 8 mois ; moyenne d'âge lexique = 8 ans 1 mois).

b. Stimuli. La liste expérimentale était constituée de 96 pseudo-mots bisyllabiques de structure CVCV, composés de 4 lettres et de 4 phonèmes. Pour la moitié des stimuli (48), la lettre à détecter était la 1^{ère} consonne (C₁) ; pour l'autre moitié (48), il s'agissait de la 2^{ème} (C₂). Chaque ensemble de 48 stimuli était réparti en 4 conditions expérimentales : 12 contenaient deux consonnes sonores, 12 deux consonnes sourdes, 12 une sonore puis une sourde, et 12 une sourde puis une sonore. Les mêmes consonnes sourdes /t, p, k, f, s, ʃ/, et les mêmes consonnes sonores /d, b, g, v, z, ʒ/ ont été utilisées en 1^{ère} et en 2^{ème} position. Dans une condition donnée (e.g., cible 1^{ère} consonne - pseudo-mot SN-SN), chaque consonne cible (e.g., /d/) était représentée par 2 pseudo-mots (e.g., *duba* et *duga*) pour lesquels elle était associée à 2 consonnes différentes (ici, /b/ et /g/). De plus, ces deux mêmes combinaisons de consonnes étaient utilisées dans la condition SN-SN avec cible en 2^{ème} consonne (i.e., *buda* et *guda*), de façon à ce que les conditions soient vraiment comparables entre elles. Le Tableau II présente un exemple pour chaque condition expérimentale, chacune contenant 12 stimuli :

Tableau II : Exemples pour les 8 conditions expérimentales de l'Expérience 1 (SN = sonore ; SD = sourd).

Rang de la Cible	1 ^{ère} consonne				2 ^{ème} consonne			
Condition expérimentale	SN-SD	SN-SN	SD-SN	SD-SD	SD-SN	SN-SN	SN-SD	SD-SD
Exemple	boki	duga	fozi	puta	cubo	guda	zufo	tupa

S'ajoutaient à cette liste des distracteurs choisis de façon à ce que l'emplacement de la lettre cible ne puisse être prédit : ils contenaient en effet les mêmes consonnes que les stimuli expérimentaux, mais la question portait sur une lettre cible différente. Sur l'ensemble de la liste, 50% des réponses correctes étaient positives et 50% négatives.

Les stimuli ont été répartis en 6 blocs, comptant chacun 32 essais. L'ordre des blocs variait systématiquement entre les participants selon la méthode des carrés latins.

c. Matériel et Procédure. Chacun des enfants dyslexiques était testé individuellement dans une pièce insonorisée, installé à 57 cm de l'écran d'un ordinateur portable Macintoshbook. Il devait réaliser une tâche de détection de lettre.

Comme l'illustre le Tableau III, chaque essai commençait par l'apparition, au centre de l'écran, d'un point de fixation (+) en gras, style Courier et taille 48, d'une durée de 1500 ms, immédiatement remplacé par un pseudo-mot écrit en minuscules, en style Courier et taille 24 (un stimulus CVCV couvrant 2.6° d'angle visuel). Ce pseudo-mot était présenté 85 ms, puis immédiatement remplacé par un masque (XXXXXXX) d'une durée de 16 ms. Apparaissait enfin une lettre majuscule, écrite en style Courier et taille 48, située un peu en dessous mais toujours centrée : cette lettre restait à l'écran jusqu'à ce que le participant ait appuyé sur l'une des deux clés de réponse désignées pour décider si la lettre était présente ou non dans le pseudo-mot. Il était demandé au participant de répondre le plus exactement et le plus rapidement possible. L'expérience commençait par une série de 10 essais et durait 20 minutes.

Tableau III : Procédure utilisée pour l'Expérience 1.

Événements	+	Pseudo-mot	XXXXXXX	LETTRE
Temps de présentation	1500 ms	85 ms	16 ms	Jusqu'à la réponse

1.2. Résultats

Nous avons tout d'abord réalisé une analyse globale portant sur les réponses des 36 enfants dyslexiques, ainsi qu'une analyse différentielle incluant un facteur groupe (dyslexie avec troubles phonologiques versus dyslexie sans troubles phonologiques majeurs) ; puis, afin d'évaluer plus directement l'effet de la forme de dyslexie, nous avons réalisé une analyse sur un sous-ensemble d'enfants (26) constituant des couples appariés en âges chronologique et lexique. Enfin, des analyses séparées pour chacun des deux groupes d'enfants dyslexiques ont été menées pour mieux comprendre sur quoi reposent les interactions. Nous avons estimé la taille des effets en calculant les η^2 partiels, avec la formule recommandée par Rosenthal, Rosnow et Rubin (2000). Elles sont interprétées en suivant le principe de Cohen (1988) : la taille de l'effet est petite si $\eta^2 = .01$, moyenne si $\eta^2 = .059$ et grande si $\eta^2 = 0.138$.

a) Analyse globale sur les 36 enfants dyslexiques

Nous avons réalisé une analyse de variance à mesures répétées par sujet avec 3 facteurs intra-individuels : le Rang de la consonne cible (C₁, C₂), la Ressemblance de voisement (ressemblance, différence) et le Voisement de la cible (consonne sonore, consonne sourde). Cette analyse a porté à la fois sur les temps de réponse pour les décisions exactes et sur les taux d'erreurs. Les temps déviants (supérieurs à la moyenne plus deux écarts-type et inférieurs à la moyenne moins deux écarts-type) ont été préalablement exclus, ils représentent 9% des réponses correctes.

L'analyse des taux d'erreurs révèle un effet significatif du Rang, $F(1, 35) = 28.65, p = .0001$, avec de meilleures performances pour traiter C₁ que C₂. Aucun autre facteur principal ni interaction n'atteint le seuil de significativité.

Concernant les temps de réponse, l'analyse confirme l'effet significatif du Rang sur les performances, $F(1, 35) = 15.33, p = .0004$: les enfants dyslexiques détectent plus rapidement C₁ que C₂. L'interaction Rang * Ressemblance n'est pas significative. Néanmoins, étant donnée l'importance de cet effet à l'égard de notre hypothèse, nous avons tout de même procédé à l'étude des contrastes : cette étude révèle que le partage du voisement améliore le traitement de C₂, effet très proche du seuil de significativité, $F(1, 35) = 3.91, p = .0562, \eta^2 = 0.10$, comme l'illustre la Figure 8 (p.112).

b) Analyse différentielle sur les 36 enfants dyslexiques

Afin de découvrir d'éventuelles nuances concernant les traitements infra-phonémiques en lecture chez les enfants dyslexiques selon leur type de dyslexie, nous avons effectué une analyse de la variance à mesures répétées avec les trois mêmes facteurs intra-individuels (Rang, Ressemblance, Voisement), mais aussi un facteur inter-individuel groupe (avec ou sans trouble phonologique), sur les taux d'erreurs et sur les temps de réponse. Les temps déviants ont été exclus comme précédemment. L'analyse des taux d'erreurs montre un effet du Rang, $F(1, 34) = 29.95, p = .0001$, les enfants identifiant mieux C₁ que C₂. Nous ne relevons pas d'effet du Groupe, et les interactions Rang * Ressemblance et Rang * Ressemblance * Groupe ne sont pas significatives.

L'analyse des temps de réponse confirme l'effet du Rang, $F(1, 34) = 12.98, p = .0010$, avec des latences plus courtes pour identifier C₁ que C₂. L'interaction Ressemblance * Groupe est également significative, $F(1, 34) = 4.47, p = .0422$, avec de meilleures performances en cas de ressemblance de voisement qu'en cas de différence chez les enfants dyslexiques sans trouble phonologique, mais pas chez les enfants dyslexiques avec trouble phonologique. Enfin, les facteurs rang et ressemblance n'interagissent pas ; mais, étant donnée l'importance de cette interaction à l'égard de nos hypothèses, nous avons tout de même procédé à l'étude des contrastes, qui révèle de meilleures performances pour C₂ en cas de ressemblance de voisement qu'en cas de différence, $F(1, 34) = 6.39, p = .0164, \eta^2 = 0.16$. Bien que cet effet repose essentiellement sur les données des dyslexiques sans trouble phonologique, l'interaction Rang * Ressemblance * Groupe n'est pas significative.

c) Appariement

Vingt-six des 36 enfants dyslexiques (13 avec troubles phonologiques et 13 sans troubles phonologiques) ont été appariés deux à deux en âges chronologique et lexique.

Nous avons pratiqué une analyse de variance à mesures répétées avec 3 facteurs intra-individuels : le Rang de la cible (C₁, C₂), la Ressemblance de voisement (ressemblance, différence) et le Voisement de la cible (consonne sonore, consonne sourde), et un facteur inter-individuel : Groupe (avec ou sans troubles phonologiques). Cette analyse portait à la fois sur les taux d'erreurs et sur les latences pour les réponses exactes. Les temps déviants ont été préalablement exclus avec les mêmes critères que pour l'analyse précédente (8% des réponses correctes).

L'analyse des taux d'erreurs fait ressortir un effet du Rang, $F(1, 24) = 15.08, p = .0007$, avec de meilleures performances pour C₁ que pour C₂. Aucun effet principal et aucune interaction n'atteignent le seuil de significativité.

L'analyse des temps de réponse confirme l'effet du Rang, $F(1, 24) = 7.30, p = .0128$, avec des temps de réponse plus courts pour C₁ que pour C₂ ; mais aucun autre effet principal ne ressort. L'interaction Rang * Ressemblance n'est pas significative, ni l'interaction Rang * Ressemblance * Groupe. Néanmoins, ces interactions étant importantes à l'égard de notre hypothèse, nous avons procédé à l'étude des contrastes . Cette étude montre de meilleures performances pour détecter C₂ en cas de ressemblance de voisement qu'en cas de différence : $F(1, 24) = 4.95, p = .0361, \eta^2 = 0.17$. Par ailleurs, cet effet est plus marqué chez les enfants dyslexiques sans troubles phonologiques (différence = 231 ms) que les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques (différence = 37 ms).

Afin d'évaluer plus précisément les anomalies spécifiques à chacun des deux types de dyslexie, nous avons réalisé des analyses de variance séparées pour chacun des deux groupes d'enfants dyslexiques.

d) Enfants avec troubles phonologiques (N = 23)

Nous avons réalisé une analyse de variance à mesures répétées avec 3 facteurs intra-individuels : le Rang (C₁, C₂), la Ressemblance de voisement (ressemblance, différence) et le Voisement (consonne sonore, consonne sourde). Cette analyse a porté à la fois sur les latences pour les réponses exactes et sur les taux d'erreurs. Les temps déviants ont été préalablement exclus toujours selon les mêmes critères ; ils représentent 7% des réponses correctes.

L'analyse des taux d'erreurs montre un effet significatif du Rang , $F(1, 22) = 25.04, p = .0001$, avec des réponses plus exactes pour C₁ que pour C₂. Les facteurs rang et ressemblance n'interagissent pas.

Concernant les temps de réponse, l'analyse confirme l'effet du Rang, $F(1, 22) = 11.03, p = .0032$: les enfants dyslexiques identifient plus rapidement C₁ que C₂. Les facteurs rang et ressemblance n'interagissent pas. Comme l'illustre la Figure 9(p.113), la ressemblance de voisement n'a pas d'effet ni sur C₁ ni sur C₂ chez les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques.

e) Enfants sans troubles phonologiques (N = 13)

Le même type d'analyse que pour les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques a été réalisé sur les données de ce groupe. Les temps déviants, exclus, représentent 6.8% des réponses correctes.

L'analyse des taux d'erreurs révèle un effet significatif du Rang, $F(1, 12) = 10.03, p = .0081$, avec de meilleures performances pour détecter C₁ que C₂. Les facteurs rang et ressemblance n'interagissent pas.

Concernant les temps de réponse, l'analyse montre une tendance pour l'effet du Rang, $F(1, 12) = 4.08, p = .0662$, avec des temps de réponse plus courts pour détecter C₁ que C₂. L'analyse montre un effet du facteur ressemblance, $F(1, 12) = 7.45, p = .0183$: les performances des enfants dyslexiques sans trouble phonologique sont meilleures en cas de ressemblance de voisement qu'en cas de différence. L'interaction Rang * Ressemblance

n'est pas significative ; mais étant donnée l'importance de cette interaction à l'égard de nos hypothèses, nous avons procédé à l'étude des contrastes, qui révèle de meilleures performances pour détecter C_2 en cas de ressemblance de voisement qu'en cas de différence, comme l'illustre la Figure 10(p.113), $F(1, 12) = 6.39$, $p = .0265$, $\eta^2 = 0.35$.

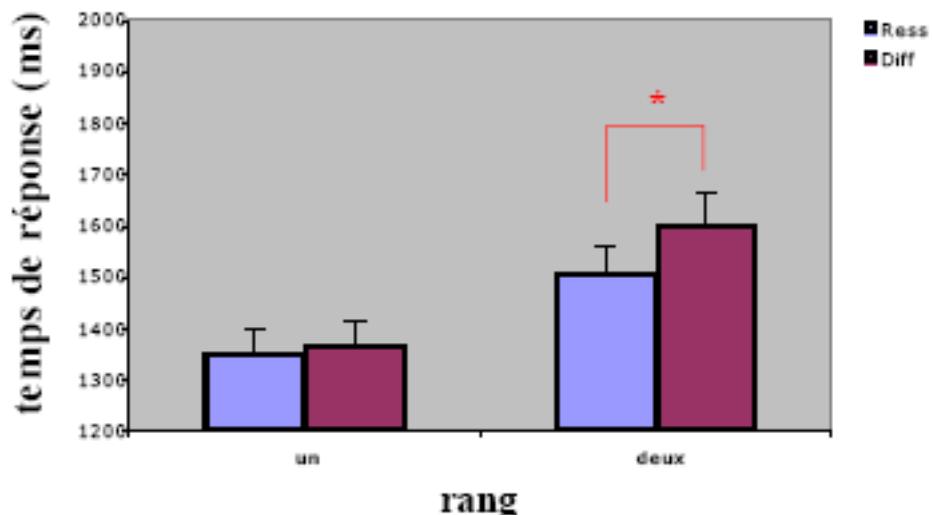


Figure 8 : temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, des 36 enfants dyslexiques (analyse globale), pour l'Expérience 1.

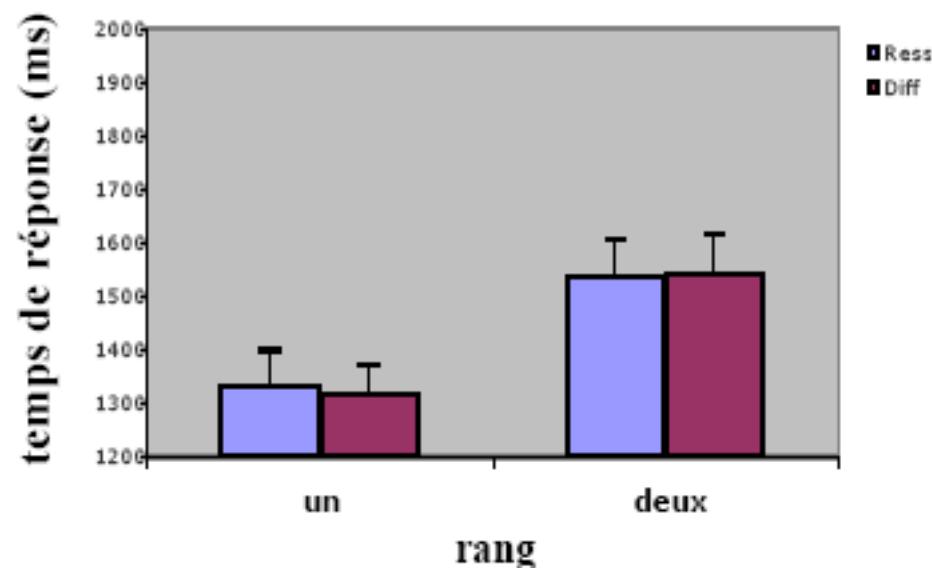


Figure 9 : temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, des 13 enfants dyslexiques avec troubles phonologiques, pour l'Expérience 1.

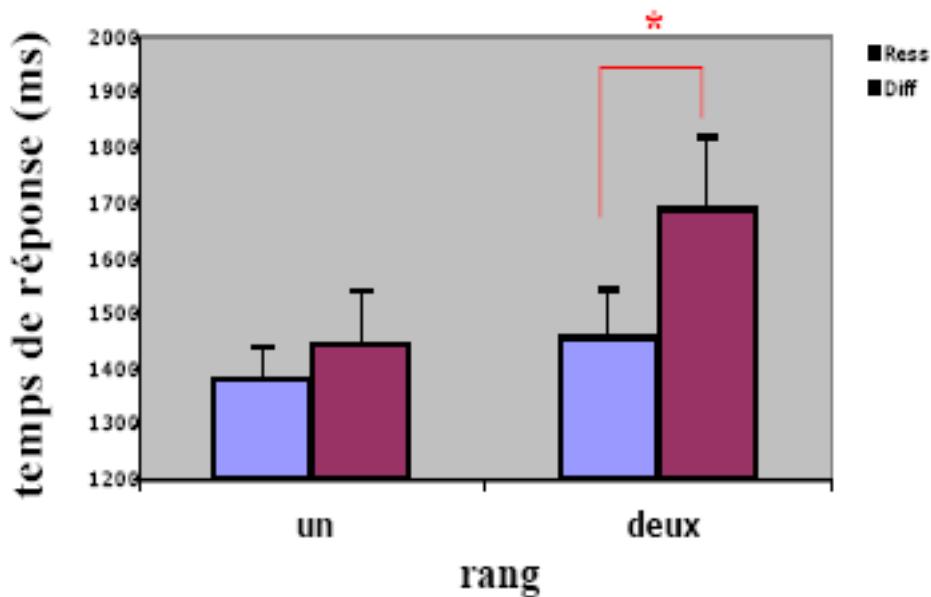


Figure 10 : temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, des 13 enfants dyslexiques sans troubles phonologiques, pour l'Expérience 1.

1.3. Discussion

L'objectif de cette expérience était de mettre en évidence les anomalies des traitements phonologiques à un niveau infra-phonémique en lecture chez les enfants dyslexiques, en évaluant leur sensibilité au partage du voisement par les consonnes d'un stimulus écrit. Notre première hypothèse était que les enfants dyslexiques présentent sur ce plan des anomalies qui témoigneraient d'une absence ou d'un retard de la mise en place des relations d'inhibition latérale entre phonèmes. Ainsi nous pensions ne pas retrouver chez eux les effets d'amorçage et de masquage entre les deux consonnes d'un même stimulus écrit CVCV décrits dans notre modèle (Bedoin & Krifi, 2009). Par ailleurs, nous supposions que les anomalies présentées par les enfants dyslexiques seraient différentes en fonction du type de dyslexie., c'est-à-dire que leur configuration de résultats montreraient une différence de sensibilité au partage du trait de voisement, témoignant d'une différence d'organisation interne des unités phonémiques en termes de partage de traits phonologiques.

Anomalie du traitement phonologique en lecture, au niveau des traits ?

Les effets d'amorçage et de masquage entre C₁ et C₂ observés sur l'ensemble des enfants dyslexiques testés ici ne permettent pas de penser qu'un niveau de connaissances sur des phonèmes organisés par des relations d'inhibitions latérales, dont le poids varierait en fonction des traits partagés, soit systématiquement intervenu. En effet, l'examen des temps de réponse montre que, chez eux, la ressemblance de voisement entre les deux consonnes facilite le traitement de C₂, ce qui serait par contre compatible avec l'intervention du premier mécanisme. Ce résultat doit toutefois être interprété avec prudence, étant donné qu'il est apparu à l'issue d'une interaction Rang * Ressemblance non significative.

Nous avions déjà observé une telle configuration de résultats dans des travaux préalables. Ainsi, de meilleures performances en cas de ressemblance de voisement pour le traitement de C₂ est un phénomène présent chez les enfants normo-lecteurs de CE1 (Krifi, Bedoin & Herbillon, 2004). De plus, le traitement de C₂ s'avère également mieux réalisé en cas de partage de mode ou de lieu avec C₁, lorsque le SOA est très court chez des adultes bons lecteurs (Bedoin & Krifi, 2009). Nous avons évoqué dans ces cas un phénomène d'amorçage facilitateur classique : C₁ amorcerait C₂ si les deux consonnes partagent le trait de voisement. En effet, la lettre C₁ activerait le phonème correspondant, activant lui-même les traits phonologiques contenus dans ce phonème, qui renforcerait à leur tour les activations des phonèmes compatibles avec de tels traits. Une consonne C₂ partageant des traits avec C₁ serait ainsi favorisée (Bedoin, 2003). Chez les enfants dyslexiques, cette explication, basée sur un mécanisme phonologique que nous avions décrit comme « initial », peut être maintenue pour le voisement, C₂ étant mieux reconnue en cas de partage de ce trait avec une autre consonne, ce qui n'est pas le cas de C₁.

Cela atteste une certaine sensibilité des enfants dyslexiques aux ressemblances infra-phonémiques entre les consonnes d'un stimulus écrit. Nous pensons que ces enfants, pris dans leur ensemble, sont sensibles aux ressemblances de voisement, tout au moins lorsqu'elles concernent des lettres composant un même stimulus. En cela, nos résultats diffèrent de ceux de Rebattel (2001) qui concluait à l'absence de sensibilité des enfants dyslexiques à des ressemblances infra-phonémiques en lecture. Sa conclusion doit donc être modulée. Nous pensons que ces enfants sont sensibles aux ressemblances de voisement, tout au moins lorsque ces ressemblances concernent des lettres composant un même stimulus. Dans l'expérience de Rebattel, les stimuli entre lesquels les ressemblances étaient manipulées n'étaient pas les deux consonnes d'un même stimulus, mais les consonnes initiales de deux syllabes présentées successivement (et très rapidement) au même endroit sur l'écran, ce qui était alors sans doute trop difficile, surtout du point de vue des traitements temporels posant vraisemblablement problème aux enfants dyslexiques.

En proposant cette Expérience 1 aux enfants dyslexiques, nous nous donnions les moyens d'évaluer si ces enfants avaient tout de même à leur disposition (et utilisaient) un niveau de connaissances sur des phonèmes organisés par des relations d'inhibitions latérales basées sur le partage de traits (relations intra-niveau), comme les adultes et les enfants bons lecteurs à partir du CE2. Rappelons que la mise en jeu de telles relations se traduirait par un effet délétère de la ressemblance phonologique entre C₁ et C₂ pour l'identification de C₂, mais un effet bénéfique de cette ressemblance pour l'identification de C₁. Or, les données montrent que, sur ce point, les enfants dyslexiques sont très différents des adultes et des enfants bons lecteurs dès le CE2. Rien, chez les enfants dyslexiques, ne permet de supposer l'existence d'une telle organisation des connaissances phonologiques en terme d'inhibition latérale entre phonèmes : en cas de ressemblance de voisement, il n'y a ni gêne pour l'identification de C₂ ni facilitation pour celle de C₁, comme permettrait de le prédire l'existence d'une telle organisation. Les données figurent même la configuration inverse, en tout cas pour C₂. Il semble donc que les enfants dyslexiques dans leur ensemble sont sensibles aux ressemblances de voisement entre les consonnes d'un stimulus écrit, mais n'ont pas structuré leurs connaissances sur les phonèmes selon ce trait phonologique de la même manière que les bons lecteurs. En cela, notre hypothèse 1 est donc vérifiée. Seules les relations inter-niveaux (bottom-up) interviennent dans le traitement de séries de syllabes écrites. Cette absence d'organisation des connaissances

phonologiques à un niveau infra-phonémique selon des relations d'inhibition latérale chez les enfants dyslexiques permet de penser que l'apprentissage réussi de la lecture n'est pas étranger à ce raffinement de l'organisation des connaissances phonologiques.

Mais, deux types de dyslexie, deux patterns de résultats différents

Dans la première partie (a- analyse globale) de cette Expérience 1 ainsi que dans de précédents travaux (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003 ; Bedoin & Krifi, 2005), les enfants dyslexiques ont été regroupés quel que soit leur type de dyslexie. Dans les deuxième et troisième parties (b- analyse différentielle, et c- appariement), nous nous sommes donnés les moyens de tester un éventuel effet du type de dyslexie, en procédant notamment à un appariement en âges chronologique et lexique des enfants dyslexiques avec troubles phonologiques et des enfants dyslexiques sans troubles phonologiques deux à deux. Cette analyse a montré que les deux groupes d'enfants dyslexiques avaient deux configurations de résultats différentes. Nous apportons donc des arguments en faveur de notre hypothèse 2.

Dyslexiques sans troubles phonologiques : résultats identiques à ceux des enfants normo-lecteurs les plus jeunes (CE1)

Pour cette expérience, les enfants dyslexiques sans troubles phonologiques ont des résultats dont la configuration est distincte de celle des dyslexiques avec troubles phonologiques, mais ne diffère pas de celle des enfants normo-lecteurs de CE1 (voir Figure 7 du chapitre 1 ; Krifi, Bedoin & Herbillon, 2003). Ainsi, ils détectent plus facilement C₁ que C₂, ce qui est également le cas chez les enfants normo-lecteurs de CE1, CE2, CM1, CM2 (Krifi, 2003) ou chez les adultes (Bedoin, 2003). Surtout, pour ces deux groupes d'enfants (dyslexiques sans troubles phonologiques et normo-lecteurs de CE1), la ressemblance aide la détection de C₂. En cela, les enfants dyslexiques sans troubles phonologiques se comportent comme les enfants normo-lecteurs plus jeunes mais de même niveau de lecture. Ce constat suggère que leur déficit, à ce niveau, relève d'un retard. Leurs données attestent la sensibilité à une ressemblance phonologique infra-phonémique (partage du voisement) en lecture, mais suggèrent qu'ils n'utilisent pas ou ne disposent pas d'une véritable organisation interne mature pour les unités phonémiques en termes de partage de traits phonologiques. Même lorsqu'elle n'a pas pour origine un trouble phonologique, la dyslexie entraîne peut-être une réduction des expériences de lecture, qui défavorise l'établissement d'une organisation des connaissances phonologiques plus mature et plus propice à contrer les phénomènes de compétition en lecture.

Dyslexiques avec troubles phonologiques : pas de sensibilité au partage de voisement

L'examen des temps de réponse ne montre aucun effet de la ressemblance de voisement, ni sur C₁ ni sur C₂, ni dans le sens d'une gêne ni dans le sens d'une facilitation. Les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques ne semblent donc pas présenter de sensibilité à la ressemblance de voisement entre C₁ et C₂. Ces effets peuvent être interprétés d'une part en terme d'absence d'organisation des connaissances phonémiques selon des relations d'inhibition latérale : les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques ne paraissent pas disposer de connaissances sur les phonèmes organisées par de telles relations déterminées par la ressemblance de voisement. Mais également, les relations inter-niveaux, qui, à partir des lettres, activeraient les phonèmes, activant eux-mêmes les

traits phonétiques correspondant, ne semblent pas non plus intervenir chez les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques. En cela, les résultats des enfants dyslexiques avec troubles phonologiques diffèrent de ceux des enfants dyslexiques sans troubles phonologiques. Ainsi, non seulement les relations intra-niveau mais également les relations inter-niveaux ne seraient pas opérationnelles chez les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques. Par conséquent, les troubles phonologiques de ces enfants dyslexiques peuvent s'expliquer par une anomalie d'organisation à un niveau infra-phonémique, comme nous en avions fait l'hypothèse. Les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques ont donc une sensibilité au partage de voisement différente de celle des enfants dyslexiques sans trouble phonologique. Notre hypothèse 2 est donc vérifiée. Nous apportons ainsi un argument supplémentaire à la pertinence de la distinction entre les types de dyslexie chez l'enfant.

2. Sensibilité à la ressemblance de voisement en lecture chez l'adulte : Expériences 2a, 2b et 2c (présentation simultanée) ; Expériences 3a et 3b (présentation divisée)

Une série d'expériences, menées auprès d'une population d'adultes normo-lecteurs, vise à préciser les conditions nécessaires à l'apparition de deux effets pouvant être produits par le partage de traits phonologiques par les consonnes d'un stimulus écrit C_1VC_2V .

Rappelons que, d'après le modèle que nous proposons, inspiré du modèle d'activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981), ces deux mécanismes ne se déroulent pas au même rythme ; l'un serait très rapide, l'autre aurait besoin de plus de temps pour s'établir et viendrait masquer les effets du précédent. Nous souhaitons avant tout préciser le découpage temporel de ces traitements et estimer les durées de présentation visuelle permettant de développer l'un et l'autre de ces mécanismes.

Aucune donnée n'a jusqu'ici permis d'affirmer que le plus rapide de ces deux mécanismes se produit en cas de ressemblance de voisement, chez des lecteurs de niveau normal. Pour tester l'hypothèse de son existence, nous utilisons une durée de présentation variable, de 33, 66 et 100 ms pour le stimulus. Nous prédisons que les indices de l'intervention de ce premier mécanisme pourraient apparaître pour la durée de présentation la plus brève (33 ms). Par contre, avec une présentation excédant 50 ms, le second mécanisme viendrait le court-circuiter, annulant les traces de son intervention comme cela se produisait dans l'Expérience 1 (avec une présentation de 50 ms chez l'adulte, voir paragraphe 3.2. du chapitre 1 et voir Bedoin, 2003). En cas de partage de trait, nous avons vu que le premier mécanisme est censé se manifester par une amélioration du traitement de la deuxième consonne. Notre hypothèse opérationnelle est donc que le partage du trait de voisement par C_1 et C_2 améliorera le traitement de C_2 avec une durée de présentation de 33 ms (hypothèse 3, Expérience 2a).

Le deuxième mécanisme est quant à lui censé induire une détérioration du traitement de C_2 et une amélioration du traitement de C_1 en cas de partage de traits phonologiques par les deux consonnes. Nous prédisons donc que de tels effets pourraient se manifester

avec des durées de présentation de 66 ou de 100 ms en cas de partage du voisement (hypothèse 4, Expériences 2b, 2c).

Enfin, les deux mécanismes que nous étudions sont appréhendés dans un contexte particulier, qui se rapproche d'une situation de lecture normale, en ce sens que le traitement de C₁ se fait en présence de C₂ au sein du stimulus CVCV. La présence simultanée des deux syllabes n'est peut-être pas anodine dans le déclenchement du deuxième mécanisme. La mise en œuvre de relations d'inhibition latérale pourrait être favorisée par cette concurrence directe et d'emblée évidente entre les lettres en présence. Aussi pouvons-nous imaginer qu'une présentation successive de chacune des syllabes n'encouragerait pas le développement du mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale et permettrait un traitement plus indépendant des deux syllabes. Notre hypothèse est que le mécanisme basé sur les inhibitions latérales ne se développera pas suffisamment pour réduire les performances sur le traitement de C₂ en cas de partage de voisement, si C₁ disparaît avant C₂. En revanche, la plus grande rapidité de déclenchement du premier mécanisme lui permettrait de se produire, même dans de telles conditions. C'est pourquoi nous prédisons que le partage du voisement pourrait faciliter le traitement de C₂ en cas de présentation successive des deux syllabes d'un pseudo-mot C₁VC₂V, pour une durée de présentation de 50 ms (hypothèse 5), durée qui induisait au contraire, dans l'Expérience 1, une réduction des performances sur C₂ lors d'une présentation simultanée des syllabes. Cette hypothèse sera testée avec une durée de présentation de 50 ms pour chacune des syllabes (Expérience 3a) et une durée de 66 ms (Expérience 3b).

2.1. Expérience 2a (SOA = 33 ms, présentation simultanée)

2.1.1. Méthode

a. Participants . Vingt-quatre étudiants en Psychologie de l'Université Lumière Lyon 2 ont participé à cette expérience (23% garçons, 77% filles ; âge moyen = 22 ans 5 mois, écart-type = 3 ans 8 mois). Tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) afin de connaître leur latéralité manuelle : nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 86%, écart-type = 7%). Tous étaient de langue maternelle française, et avaient une vue normale avec ou sans correction.

b. Stimuli, Matériel et Procédure. Les stimuli sont les mêmes que ceux de l'Expérience 1. Seule la durée de présentation des pseudo-mots diffère : ici 33 ms chez l'adulte au lieu de 85 ms chez les enfants dyslexiques de l'Expérience 1. Le matériel et la procédure sont identiques à ceux de l'Expérience 1.

2.1.2. Résultats

Nous avons réalisé une analyse de variance par sujet (F1) à mesures répétées avec 3 facteurs intra-individuels : le Rang de la cible (C₁, C₂), la Ressemblance de voisement entre C₁ et C₂ (ressemblance, différence) et le Voisement (consonne sonore, consonne sourde). Nous avons également réalisé une analyse par item (F2) avec 2 facteurs intra-individuels (Rang et Ressemblance) et un facteur inter-individuel (Voisement). Ces deux analyses ont porté à la fois sur les temps de réponse et sur les taux d'erreurs. Les temps déviants (c'est-à-dire supérieurs à la moyenne des temps de réponse plus deux écarts-type

pour une condition expérimentale chez un participant ou inférieurs à la moyenne moins deux écarts-type) ont été préalablement exclus. Ils représentent 2.2% des réponses correctes.

Concernant les taux d'erreurs, le facteur rang a un effet significatif, $F1(1, 23) = 64.68, p = .0001, F2(1, 22) = 201.55, p = .0001$: la première consonne (C_1) est mieux détectée que la deuxième (C_2). Les facteurs rang et voisement interagissent, $F1(1, 23) = 12.36, p = .0019, F2(1, 22) = 7.61, p = .0115$, avec de meilleures performances pour les consonnes sourdes que pour les consonnes sonores en première position (C_1), alors qu'en seconde position (C_2) les consonnes sonores sont mieux détectées que les sourdes. L'interaction Rang * Ressemblance est significative par sujet, $F1(1, 23) = 6.08, p = .0216, \eta^2 = 0.21, F2(1, 22) = 3.16, p = .0892, \eta^2 = 0.13$: l'étude des contrastes montre quela ressemblance de voisement gêne le traitement de C_2 , $F1(1, 23) = 3.92, p = .0597, \eta^2 = 0.15$, et facilite l'identification de C_1 mais de façon non significative, $F1(1, 23) = 2.27, p = .1458, \eta^2 = 0.09$, comme l'illustre la Figure 11.

L'analyse des temps de réponse confirme l'effet significatif du Rang, $F1(1, 23) = 35.41, p = .0001, F2(1, 22) = 133.93, p = .0001$. En effet, C_1 est plus rapidement détectée que C_2 . L'interaction Rang * Ressemblance n'est pas significative.

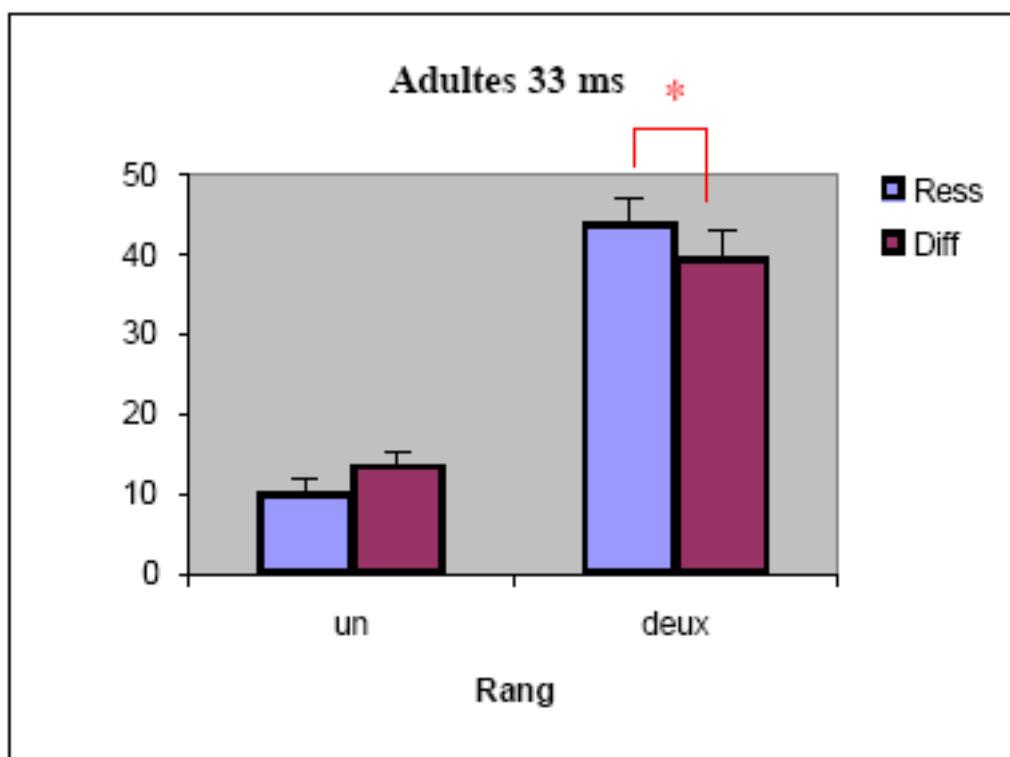


Figure 11 : taux d'erreurs (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, pour l'Expérience 2a

2.1.3. Discussion

Nous observons un effet massif du rang de la consonne : la première consonne (C_1) est identifiée à la fois plus rapidement et plus précisément que la deuxième (C_2). Bien qu'elles soient peu nombreuses, les lettres sont difficilement identifiables en parallèle, de façon automatique, car elles constituent un pseudo-mot qui n'a pas de représentation lexicale. Aussi cet effet du rang des lettres est vraisemblablement dû à la séquentialité de leur traitement de gauche à droite. Les lecteurs doivent utiliser ici la voie analytique et donc opérer un traitement séquentiel (Juphard, Carbonnel, Ans & Valdois, 2006).

L'Expérience 2a est très proche de celle conduite par Bedoin (2003), la seule différence concerne le temps de présentation du pseudo-mot : 33 ms ici et non 50 ms. Pour rappel, dans cette expérience princeps, la ressemblance de voisement aidait le traitement de C_1 et gênait celui de C_2 . Ces résultats étaient interprétés dans le cadre du modèle d'organisation des phonèmes selon des relations d'inhibition latérale (Bedoin, 2003). De telles relations intra-niveau ne pourraient produire qu'un effet négatif sur le traitement de C_2 en cas de partage de traits phonologiques avec C_1 . Par le biais des relations entre phonèmes et traits phonologiques, C_1 inhiberait en effet ses concurrents, c'est-à-dire les consonnes partageant des traits avec elle. Par contre, étant donnée la séquentialité du traitement des lettres d'un pseudo-mot, dans le cas où C_1 constitue la cible, C_2 joue sans doute le rôle d'un masque. Du fait des inhibitions latérales, un effet négatif de la ressemblance de C_1 (cible) se produirait sur C_2 (masque) ; C_2 serait alors moins bien identifiée et constituerait un masque peu perturbant pour la cible (C_1). C'est pourquoi C_1 serait alors mieux détectée (effet conforme à celui observé dans les situations de backward masking). Dans l'Expérience 2a offrant un temps de présentation des pseudo-mots plus court (33 ms), nous répliquons ces deux effets avec une gêne pour le traitement de C_2 et une facilitation pour le traitement de C_1 en cas de ressemblance de voisement. Cette expérience apporte donc un argument supplémentaire à l'intervention d'un niveau de connaissances sur les phonèmes, organisés chez l'adulte par des relations d'inhibition latérale, dont le poids est déterminé par la ressemblance infra-phonémique entre les phonèmes. Cette expérience montre que ce niveau de relations intervient précocement chez des adultes bons lecteurs, puisque les effets apparaissent avec un temps de présentation du pseudo-mot de 33 ms. Par contre, la configuration des résultats ne conforte pas l'hypothèse 3, et nous ne disposons toujours pas de données témoignant du premier mécanisme décrit dans notre modèle chez l'adulte pour le voisement. Nous tenterons plus loin de trouver des indices d'un tel mécanisme dans une expérience avec une présentation aussi rapide, mais imposant en plus une forte demande dans la tâche (Expériences 3a et 3b).

Enfin, nous avons observé une interaction, non prédictée, entre les facteurs rang et voisement de la consonne cible. Cet effet révèle que, dans un stimulus écrit CVCV, le traitement de la consonne en première position est mieux réalisé si elle est sourde plutôt que sonore, alors que le traitement de la deuxième consonne est plus précis si elle est sonore plutôt que sourde. Ce dernier aspect est cohérent avec des éléments de phonétique articulatoire, et pourrait également être rapproché d'un phénomène de mutation consonantique décrit en linguistique diachronique.

Du point de vue articulatoire, il est plus facile de produire une consonne sonore qu'une consonne sourde en position inter-vocalique, car l'écart de sonorité est alors réduit. Aussi, dans une épreuve où la présentation visuelle est si rapide qu'elle laisse sans doute une part au devinement, il n'est pas très surprenant d'observer une tendance à lire une consonne sonore plutôt que sourde en C_2 (qui se trouve entre deux voyelles).

Par ailleurs, la tendance à lire une consonne sonore en position inter-vocalique pourrait être analogue à un phénomène observé en linguistique diachronique. Dans l'évolution des langues, les mécanismes de mutation consonantique suivent certaines lois. Ainsi, suivant la Loi de Grimm, l'occlusive sourde indo-européenne se transforme, en proto-germanique, en fricative sourde. Puis, si elle est en position intervocalique, elle devient une fricative sonore selon la Loi de Verner (Stéphanovitch, 1997, p. 16). La linguistique historique montre que les consonnes en position inter-vocalique tendent à subir un affaiblissement, réalisé par différents moyens : il peut s'agir d'une disparition, les voyelles ayant tendance à éliminer les consonnes, ou d'une sonorisation qui réduit la différence entre la consonne et son contexte vocalique. En français, cet affaiblissement se serait particulièrement produit au III^{ème} siècle, avec par exemple le passage de habére à avére (suppression), ou le passage de sapére à savére (sonorisation). D'autres exemples illustrent le même phénomène pour le passage du latin au français, où ripa devient rive et papilione devient pavillon (Bourciez, 1989, p. 170). On le retrouve aussi dans le passage du vieil anglais à l'anglais moderne (e.g., lufu devenu love, et drifan devenu drive). Pour la langue corse, dans le nord de l'île, certains auteurs parlent aussi d'un phénomène de mutation consonantique dans lequel une consonne mutante sourde est sonorisée lorsqu'elle est précédée d'une voyelle (e.g., làcrica devient l'agrima, et fata devient f'ada). Ainsi, l'effet que nous observons en lecture, qui favorise l'identification des consonnes sonores (par opposition aux sourdes) en position intervocalique n'est peut-être pas étranger au phénomène de mutation consonantique observé en linguistique diachronique.

2.2. Expérience 2b (SOA = 66 ms, présentation simultanée)

2.2.1. Méthode

a. Participants . Dix-huit étudiants en Psychologie de l'Université Lumière Lyon 2 ont participé à cette expérience (26% garçons, 74% filles ; âge moyen = 21 ans 10 mois, écart-type = 3 ans 11 mois). Tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) afin de connaître leur latéralité manuelle : nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 83%, écart-type = 5%). Tous étaient de langue maternelle française, et avaient une vue normale avec ou sans correction.

b. Stimuli, Matériel et Procédure. Les stimuli sont les mêmes que ceux de l'Expérience 2a. Seule la durée de présentation des stimuli diffère : ici 66 ms au lieu de 33 ms. Le matériel et la procédure sont identiques à ceux de l'Expérience 2a.

2.2.2. Résultats

Nous avons réalisé les mêmes analyses de variance que dans l'Expérience 2a, à la fois sur les temps de réponse et sur les taux d'erreurs. Comme précédemment, les temps déviants ont été exclus ; ils représentent 2% des réponses correctes.

Concernant les taux d'erreurs, le facteur rang a un effet significatif, $F(1, 17) = 27.78$, $p = .0001$, $F(2, 22) = 14.00$, $p = .0011$: la première consonne (C₁) est mieux détectée que la deuxième (C₂). Les facteurs rang et ressemblance interagissent tout au moins par sujet, $F(1, 17) = 6.30$, $p = .0232$, $\eta^2 = 0.27$, $F(2, 22) = 3.35$, $p = .0810$, $\eta^2 = 0.13$: l'étude des contrastes montre quela ressemblance de voisement facilite le traitement de

$C_1, F1(1, 17) = 7.89, p = .0126, \eta^2 = 0.32$, et gêne l'identification de C_2 mais pas de façon significative, comme l'illustre la Figure 12.

L'analyse des temps de réponse confirme l'effet significatif du Rang, $F1(1, 17) = 47.69, p = .0001, F2(1, 22) = 65.75, p = .0001$: C_1 est plus rapidement détectée que C_2 . L'interaction Rang * Ressemblance n'est pas significative.

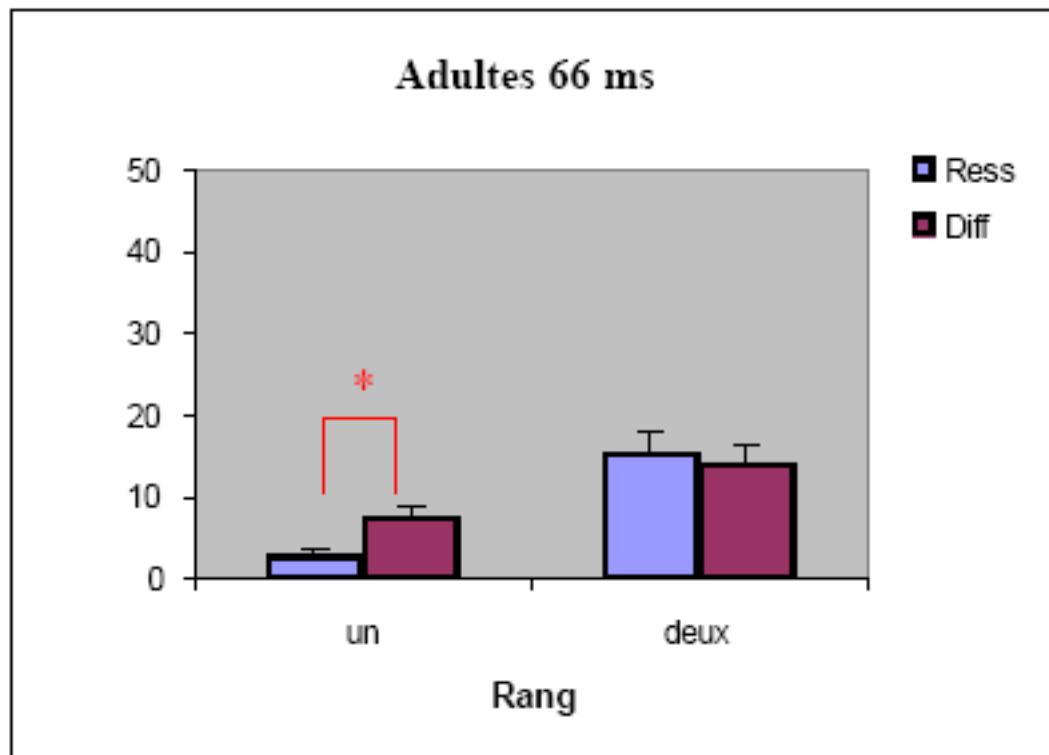


Figure 12 : taux d'erreurs (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, pour l'Expérience 2b.

2.2.3. Discussion

Comme dans l'expérience précédente, les résultats montrent un effet important du rang de la consonne, indiquant que les lecteurs effectuent un traitement séquentiel des pseudo-mots : la première consonne (C_1) est mieux et plus rapidement identifiée que la deuxième (C_2). Cet effet rejoint les données de la littérature (Juphard et al., 2006).

Avec un temps de présentation plus long (66 ms), nous retrouvons une certaine gêne pour le traitement de C_2 et une facilitation significative pour celui de C_1 en cas de ressemblance de voisement. Nous répliquons donc les résultats observés dans l'expérience princeps avec une durée de présentation de 50 ms (Bedoin, 2003). Un temps de présentation de 66 ms semble donc encore permettre l'intervention du niveau de connaissances des phonèmes organisés selon des relations d'inhibition latérale. Notre hypothèse 4 est donc vérifiée : nous apportons un argument supplémentaire à l'existence de relations intra-niveau inhibitrices entre les phonèmes, second mécanisme intervenant en lecture décrit dans notre modèle chez les adultes bons lecteurs (Bedoin, 2003 ; Krifi-Papoz, 2009).

2.3. Expérience 2c (SOA = 100 ms, présentation simultanée)

2.3.1. Méthode

a. Participants . Quinze adultes ont participé à cette expérience (7% garçons, 93% filles ; âge moyen = 23 ans 5 mois, écart-type = 7 ans 3 mois). Tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle d'Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) afin de connaître leur latéralité manuelle : nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 88%, écart-type = 10%). Tous étaient de langue maternelle française et avaient une vue normale avec ou sans correction.

Cette expérience a été réalisée en collaboration avec A.C. Viret (2003), une étudiante de Master 1 de Psychologie.

b. Stimuli, Matériel et Procédure. Les stimuli sont les mêmes que ceux des Expériences 1, 2a et 2b. Seule la durée de présentation des stimuli diffère : ici 100 ms. Le matériel et la procédure sont identiques à ceux de ces expériences.

2.3.2. Résultats

Nous avons pratiqué la même analyse de la variance à mesures répétées que dans les deux expériences précédentes, avec 3 facteurs intra-individuels : Rang (C_1 ou C_2), Ressemblance (ressemblance ou différence), et Voisement (consonne sonore ou sourde), sur les taux d'erreurs et les temps de réponse. Comme précédemment, nous avons exclu les temps déviants (ils représentent 2% des réponses correctes).

L'analyse des taux d'erreurs fait ressortir un effet du Rang, $F(1, 14) = 12.42, p = .0034$: C_1 est mieux identifiée que C_2 . L'interaction Rang * Ressemblance est significative, $F(1, 14) = 5.53, p = .0338, \eta^2 = 0.28$: la ressemblance de voisement gêne le traitement de C_2 et facilite celui de C_1 , comme l'illustre la Figure 13.

L'analyse des temps de réponse confirme l'effet du Rang, $F(1, 14) = 44.12, p = .0001$, avec de meilleures performances pour C_1 que pour C_2 . Cette analyse ne montre aucun autre effet significatif.

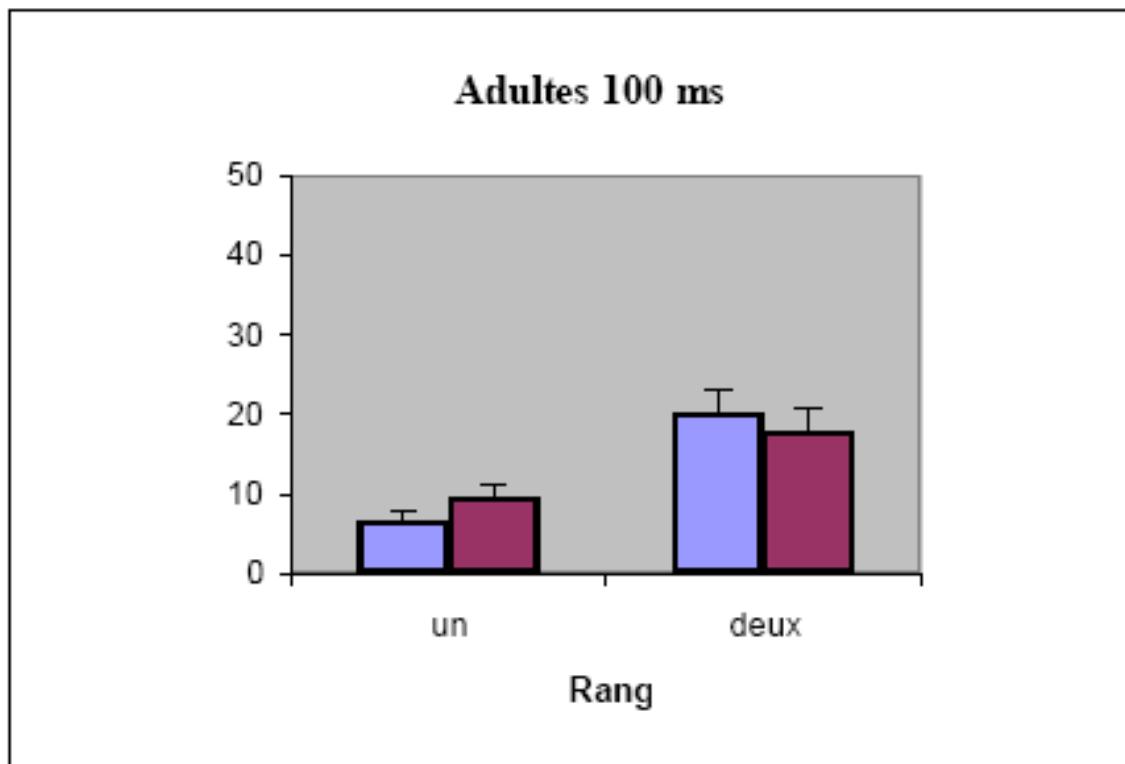


Figure 13 : taux d'erreurs et temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, pour l'Expérience 2c.

2.3.3. Discussion

Nous retrouvons un effet important du rang de la consonne, indiquant que les lecteurs effectuent un traitement séquentiel des pseudo-mots : la première consonne (C_1) est mieux et plus rapidement identifiée que la deuxième (C_2). Cet effet rejoue les données de la littérature (Juphard et al., 2006).

En augmentant le temps de présentation du pseudo-mot dans cette Expérience 2c, nous observons toujours une gêne de la ressemblance de voisement pour le traitement de C_2 , ainsi opposée à une facilitation pour celui de C_1 . Ce résultat pourrait témoigner de l'implication d'un niveau organisé par des relations d'inhibition latérale entre phonèmes.

L'ensemble de ces trois expériences (Expériences 2a, 2b et 2c), qui ne diffèrent qu'au niveau du temps de présentation, donnent donc lieu à des configurations de résultats similaires. La première consonne du stimulus CVCV est mieux identifiée si elle suivie d'une deuxième consonne qui partage son voisement, et la deuxième est moins bien traitée si elle est précédée d'une consonne de même voisement. Nous proposons d'interpréter ces effets sont interprétés en terme d'intervention de relations d'inhibition latérale entre phonèmes se ressemblant du point de vue des traits phonologiques, décrites dans notre modèle (Bedoin, 2002 ; Bedoin & Krifi, 2009).

Ainsi, si un niveau de connaissances phonémiques organisé par des relations d'inhibition latérale pondérées par des ressemblances de voisement participe au traitement des lettres d'un pseudo-mot écrit, cette intervention se produit dès 33 ms (Expérience 2a) et persiste avec un temps de présentation plus long de 66 ms (Expérience 2b) et de 100 ms (Expérience 2c). Notre hypothèse 4 est donc vérifiée : nous apportons un argument

supplémentaire à l'existence de relations intra-niveau inhibitrices entre les phonèmes, second mécanisme intervenant en lecture décrit dans notre modèle chez les adultes bons lecteurs (Bedoin, 2003 ; Bedoin & Krifi, 2009).

Mais, nous ne disposons toujours pas de résultats attestant de l'implication d'un premier mécanisme décrit dans notre modèle chez l'adulte. Nous allons maintenant tenter de la mettre en évidence dans une expérience entravant le cours normal des traitements par une interruption de la présentation de la première syllabe avant l'apparition de la seconde. Dans cette nouvelle procédure, la présentation temporellement séparée des deux syllabes du stimulus CVCV pourrait entraver la mise en jeu du deuxième mécanisme phonologique, basé sur les inhibitions latérales, et laisser l'occasion d'observer les effets d'un mécanisme phonologique antérieur (Expérience 3a).

2.4. Expérience 3a (SOA = 50 ms, présentation divisée)

2.4.1. Méthode

a. Participants . Vingt-quatre étudiants en Psychologie de l'Université Lumière Lyon 2 ont participé à cette expérience (25% garçons, 75% filles ; âge moyen = 22 ans 9 mois, écart-type = 3 ans 6 mois). Tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) : nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 87%, écart-type = 9%). Tous étaient de langue maternelle française et avaient une vue normale avec ou sans correction.

b. Stimuli, Matériel et Procédure. La liste des stimuli et le matériel étaient les mêmes que ceux des Expériences 1, 2a, 2b et 2c. Seule la procédure était différente, car les syllabes étaient présentées de manière indépendante.

En effet, comme l'illustre le Tableau IV, chaque essai commençait par l'apparition d'un point de fixation (+) au centre de l'écran, en gras, style Courier, taille 48, pendant 1500 ms. Il était immédiatement suivi de la première syllabe du pseudo-mot, écrite en minuscules, accompagnée sur la droite de deux étoiles (**) à la place de la deuxième syllabe. Cet ensemble couvrait 1.8° d'angle visuel (Style Courier, taille 24) et était présenté pendant 50 ms. À leur disparition, la première syllabe et les deux étoiles étaient immédiatement remplacées par un autre ensemble, constitué de deux étoiles (**) sur la gauche et de la deuxième syllabe sur la droite, pendant 50 ms. Immédiatement après, un masque visuel (XXXXXXX) couvrait la surface où les stimuli étaient apparus, pendant 16 ms. Enfin, une lettre majuscule, en Courier et de taille 48, s'inscrivait un peu en dessous, au centre sur l'axe horizontal. Elle restait à l'écran jusqu'à ce que le participant ait appuyé sur l'une des deux clés de réponse désignées pour décider si la lettre était présente ou non dans le mot. Il était demandé au participant de répondre le plus exactement et le plus rapidement possible. L'expérience durait 20 minutes.

Tableau IV : Procédure utilisée pour l'Expérience 3a.

Exemple	+	ba**	**du	XXXXXXX	D
Temps de présentation	1500 ms	50 ms	50 ms	16 ms	Jusqu'à la réponse

2.4.2. Résultats

Nous avons réalisé la même analyse de variance par sujet (F1) à mesures répétées que dans les Expériences 1, 2a, 2b et 2c, avec 3 facteurs intra-individuels : le Rang (C₁, C₂), la Ressemblance de voisement (ressemblance, différence) et le Voisement de la cible (consonne sonore, consonne sourde). Nous avons également réalisé une analyse par item (F2) avec 2 facteurs intra-individuels (Rang et Ressemblance) et un facteur inter-individuel (Voisement). Ces deux analyses ont porté à la fois sur les temps de réponse et sur les taux d'erreurs. Les temps déviants ont été préalablement exclus selon la même méthode que dans les expériences précédentes. Ils représentent 2% des réponses correctes.

Concernant les taux d'erreurs, le seul effet significatif est celui du rang, $F1(1, 23) = 10.08, p = .0042, F2(1, 22) = 34.19, p = .0001$, la première consonne étant mieux identifiée que la deuxième. Le rang et la ressemblance n'interagissent pas (Figure 14).

L'analyse des temps de réponse confirme l'effet du Rang, $F1(1, 23) = 8.31, p = .0084, F2(1, 22) = 37.78, p = .0001$. En effet, C₁ est plus rapidement identifiée que C₂. L'analyse révèle un effet de la Ressemblance, mais seulement significatif par item, $F1(1, 23) = 1.15, p = .2947, F2(1, 22) = 4.48, p = .0457$: les temps de réponse sont plus courts en cas de ressemblance de voisement qu'en cas de différence. Toutefois, la ressemblance et le rang interagissent, par sujet et par item, $F1(1, 23) = 8.60, p = .0075, \eta^2 = 0.27, F2(1, 22) = 9.15, p = .0062, \eta^2 = 0.29$. Comme l'illustre la Figure 14, seule l'identification de C₂ est significativement affectée par la ressemblance de voisement, qui facilite son traitement, $F1(1, 23) = 9.03, p = .0063, \eta^2 = 0.28, F2(1, 22) = 12.94, p = .0016, \eta^2 = 0.37$.

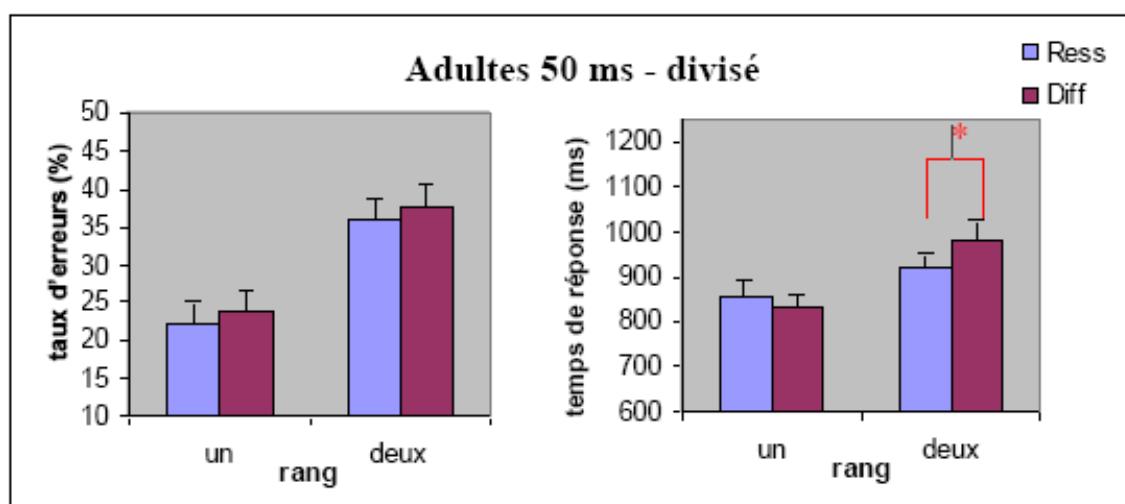


Figure 14 : taux d'erreurs (et erreur standard) et temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, pour l'Expérience 3a (divisée – 50 ms).

2.4.3. Discussion

Nous observons un effet massif du rang de la consonne : la 1^{ère} consonne (C₁) est identifiée à la fois plus rapidement et plus précisément que la 2^{ème} consonne (C₂). Bien que les lettres soient peu nombreuses, les lecteurs ne semblent pas les avoir traitées de façon entièrement automatique (en parallèle), sans doute parce que les stimuli utilisés dans cette expérience sont des pseudo-mots : les participants sont donc obligés d'utiliser la voie non-

lexicale (ou procédure par assemblage), séquentielle, pour lire de tels stimuli (Juphard et al., 2006).

La séquentialité de la présentation des deux syllabes gêne les adultes bons lecteurs. En effet, lorsque l'on compare les résultats des participants de cette Expérience 3a à ceux des participants de l'expérience princeps de Bedoin (2002), leurs performances sont meilleures et leurs temps de réponse plus courts lorsque la présentation des syllabes est simultanée (Bedoin, 2002) que lorsqu'elle est séquentielle (ici dans l'Expérience 3a). Ceci peut être dû au fait que la tâche est plus difficile à réaliser en présentation séquentielle car moins écologique, moins naturelle pour les lecteurs.

Par ailleurs, les temps de réponse sont influencés par la ressemblance de voisement entre les deux consonnes : la ressemblance procure surtout une aide. Celle-ci est évidente pour le traitement de C₂, traitée à la fois significativement plus rapidement et plus exactement si la consonne qui la précède lui ressemble du point de vue du voisement. Sans que l'effet soit significatif sur les erreurs, nous constatons qu'il n'y a tout de même pas d'échange rapidité-exactitude et que la tendance pointe dans la même direction que pour les latences. Sur C₁, l'effet de ressemblance est plus complexe puisqu'on assiste à un échange rapidité-exactitude (la ressemblance améliore l'exactitude mais au prix d'une moins grande rapidité). De plus, les contrastes statistiques n'atteignant pas le seuil de significativité, il est difficile de conclure à l'existence d'un effet pour le traitement de C₁. Notre hypothèse trouve donc ici des arguments en sa faveur pour ce qui est d'une différence des effets de la ressemblance infra-phonémique selon le rang de la consonne cible.

Comme nous l'avons rappelé au paragraphe 3 du chapitre 1, une présentation simultanée des syllabes du pseudo-mot (Bedoin, 2003) permet d'observer chez des adultes une configuration de résultats différente de celle que nous relevons ici, avec une présentation divisée. En présentation simultanée, en cas de partage de voisement par C₁ et C₂, il se produit une facilitation pour l'identification de C₁, et une perturbation pour celle de C₂. Ces résultats avaient été interprétés en terme d'organisation des connaissances phonémiques selon des relations d'inhibition latérale entre les unités-phonèmes dont le poids varierait en fonction du nombre de traits phonologiques partagés. En exerçant des inhibitions vers les phonèmes similaires à C₁, les relations d'inhibition latérale permettraient de supprimer une compétition gênante pour identifier C₁, mais elles seraient défavorables au traitement de C₂, si C₂ est phonologiquement similaire (Bedoin & Krifi, 2009).

Or, ici, en présentation divisée, la ressemblance facilite l'identification de C₂. Une explication paraît possible : un autre mécanisme (inter-niveaux) intervient en lecture. Le modèle que nous avons proposé dans la partie théorique le décrit comme plus précoce. L'information visuelle extraite en lecture au niveau des lettres activerait, via des relations facilitatrices bottom-up, les unités-phonèmes, qui activeraient elles-mêmes des unités-traits phonologiques. Les traits stimuleraient, en retour, les phonèmes avec lesquels ils sont compatibles, renforçant l'activation de C₁ mais aussi de C₂ s'il est phonologiquement similaire. Ce mécanisme produirait alors des effets facilitateurs en cas de ressemblance phonologique entre une première consonne (amorce) et une deuxième consonne (cible). Ce mécanisme n'avait pas encore été observé avec le trait de voisement, mais avait été montré avec les traits de mode et de lieu d'articulation, en cas de SOA très court. Dans l'Expérience 3a, en proposant une présentation séparée des syllabes, nous avons répliqué cet effet pour le voisement.

La présence simultanée des deux syllabes n'est peut-être pas anodine à l'égard du déclenchement du mécanisme intra-niveau. Celui-ci peut se déclencher assez rapidement, comme nous l'avons constaté avec des SOA plus brefs que celui qui est utilisé dans cette expérience (voir Expérience 2a, avec un SOA de 33 ms). La mise en œuvre de relations d'inhibition latérale pourrait être favorisée par la concurrence directe entre les lettres en présence. Une présentation successive de chacune des syllabes n'encouragerait pas le développement de ce mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale et permettrait un traitement plus indépendant des deux syllabes. Le mécanisme intra-niveau ne se développerait pas suffisamment pour réduire les performances sur le traitement de C₂ en cas de partage de voisement avec C₁, si C₁ disparaît avant C₂. En revanche, la plus grande rapidité de déclenchement du premier mécanisme lui permettrait de se produire, même dans de telles conditions. Notre hypothèse 5 est donc vérifiée.

Ainsi, nous mettons en évidence dans cette série d'expériences l'existence de deux mécanismes intervenant en lecture chez les adultes bons lecteurs : un premier mécanisme facilitateur, précoce, entre unités-phonèmes et unités-traits phonologiques (relations inter-niveaux), qui laisserait place à un second mécanisme d'inhibition latérale entre unités phonémiques (relations intra-niveau), plus tardif.

2.5. Expérience 3b (SOA = 66 ms, présentation divisée)

2.5.1. Méthode

a. Participants . Dix-huit adultes ont participé à cette expérience (22% hommes, 78% filles ; âge moyen = 26 ans 6 mois, écart-type = 6 ans 10 mois). Tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) afin de connaître leur latéralité manuelle : comme précédemment, nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 88%, écart-type = 11%). Tous étaient de langue maternelle française et avaient une vue normale avec ou sans correction.

b. Stimuli, Matériel et Procédure. Les stimuli sont les mêmes que ceux de l'Expérience 3a. La seule différence est que la durée de présentation de chaque syllabe du pseudo-mot est ici de 66 ms. Le matériel et la procédure sont identiques à ceux utilisés dans l'Expérience 3a.

2.5.2. Résultats

Nous avons réalisé les mêmes analyses de variance que dans l'Expérience 3a, et avons exclu les temps déviants (1.8% des réponses correctes).

L'analyse des taux d'erreurs montre que seul l'effet du Rang est significatif, $F1(1, 17) = 11.70, p = .0033$, $F2(1, 22) = 3.95, p = .0594$: les performances pour identifier C₁ sont meilleures que pour identifier C₂. Le rang et la ressemblance n'interagissent pas.

L'analyse des temps de réponse confirme l'effet du Rang, $F1(1, 17) = 9.34, p = .0545$, $F2(1, 22) = 4.95, p = .0484$, avec une identification plus rapide de C₁ que de C₂. L'interaction Rang * Ressemblance est significative, $F1(1, 17) = 4.68, p = .0450$, $F2(1, 22) = 3.88, p = .0597$. L'étude des contrastes montre que la ressemblance de voisement facilite l'identification de C₂, $F1(1, 17) = 9.77, p = .0062$, mais pas celle de C₁, comme l'illustre la Figure 15.

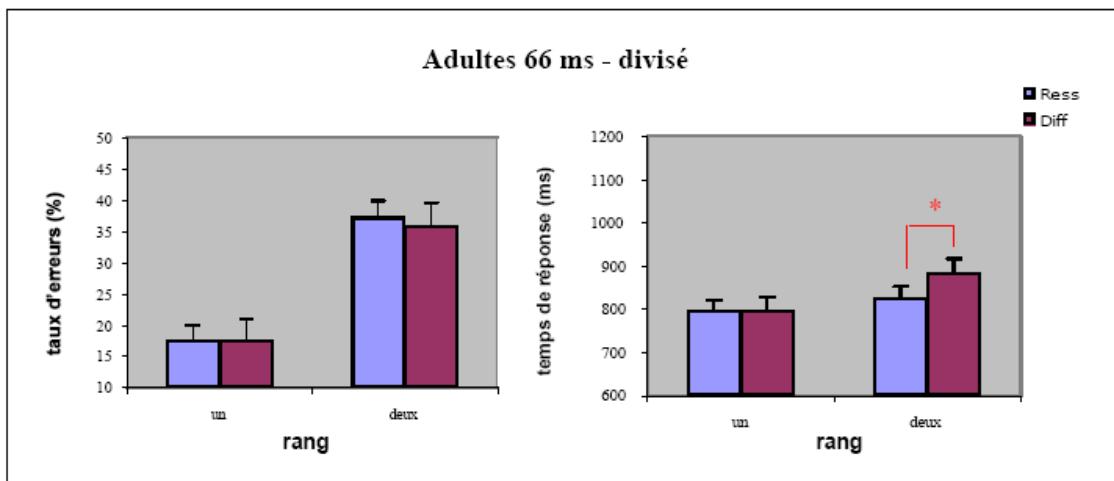


Figure 15 : taux d'erreurs (et erreur standard) et temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible et la ressemblance de voisement, pour l'Expérience 3b (divisée – 66 ms).

2.5.3. Discussion

Comme dans l'expérience précédente (Expérience 3a), les lecteurs détectent plus facilement C₁ que C₂ dans un stimulus écrit, reflétant bien un traitement relativement séquentiel des deux syllabes du pseudo-mot présentées successivement (Juphard et al., 2006).

Comme précédemment, la ressemblance de voisement affecte la détection de C₂, avec une durée de présentation des syllabes ici de 66 ms. Nous observons un amorçage facilitateur classique, témoignant d'effets basés sur des relations inter-niveaux entre les unités-phonèmes et les unités-trait. La configuration des résultats de ces deux Expériences 3a et 3b conforte donc notre hypothèse 5 : nous disposons maintenant de données témoignant du premier mécanisme décrit dans notre modèle chez l'adulte (Bedoin, 2003 ; Bedoin & Krifi, 2009). Dans ce modèle, les unités-lettres activeraient rapidement les unités-phonèmes, activant elles-mêmes les unités-trait phonologiques, qui renforcerait les activations des phonèmes et des lettres en retour. Ainsi, ce premier mécanisme produirait des effets facilitateurs en cas de ressemblance phonologique entre C₁ et C₂.

Nous confirmons ici, avec un temps de présentation de chaque syllabe de 66 ms, que la mise en œuvre de relations d'inhibition latérale pourrait être favorisée, voire conditionnée, par la concurrence directe entre les lettres en présence. Une présentation successive de chacune des syllabes n'encouragerait pas le développement de ce mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale et permettrait un traitement plus indépendant des deux syllabes. Le mécanisme intra-niveau ne se développerait pas suffisamment pour réduire les performances sur le traitement de C₂ en cas de partage de voisement avec C₁, si C₁ disparaît avant C₂. Il laisserait place au premier mécanisme de notre modèle, le mécanisme inter-niveaux (Krifi-Papoz, 2009).

L'ensemble de ces cinq expériences (Expériences 2a, 2b et 2c, et Expériences 3a et 3b) permet donc de mettre en évidence l'existence de deux mécanismes phonologiques en lecture chez les adultes bons lecteurs. Le premier mécanisme, intervenant précocement, est basé sur des relations inter-niveaux (bottom-up) : les lettres, extraites du stimulus

écrit, activent les phonèmes correspondants et concurrents, activant eux-mêmes les traits phonologiques, qui renforcent les phonèmes et les lettres en retour. Ce premier mécanisme produit un effet facilitateur pour le traitement d'une deuxième consonne si elle partage des traits avec une première. Nous le montrons ici particulièrement pour le partage du voisement. Le second mécanisme, plus tardif, est basé sur des relations intra-niveau d'inhibition latérale entre phonèmes : par le biais de ces relations, une première consonne inhiberait ses concurrents, c'est-à-dire les consonnes partageant des traits phonologiques avec elle, permettant ainsi de contrer les phénomènes de compétition en lecture. Ce second mécanisme ne peut donc que donner lieu à une gêne pour le traitement d'une deuxième consonne si elle partage le trait de voisement avec une première.

3. Sensibilité au voisement en production chez les adultes : Expérience 4

A cette étape de nos recherches, nous avons observé pour le mode et le lieu d'articulation plusieurs effets compatibles avec les prédictions d'un modèle décrivant le traitement successif de syllabes écrites comme soumis aux influences de deux mécanismes impliquant des traits phonologiques. Le premier mécanisme reposerait sur des connexions verticales, activatrices, grâce auxquelles les traits activés par une première consonne stimuleraient les phonèmes partageant ces traits. Il donnerait lieu à un amorçage facilitateur entre deux stimuli successifs présentant une ressemblance infra-phonémique. L'autre mécanisme, déclenché un peu plus tard, reposerait sur des connexions horizontales (relations d'inhibition latérale) qui compenseraient le biais induit par le mécanisme précédent. Il aurait pour effet de rendre plus difficile l'identification d'un phonème partageant des traits avec un phonème précédent.

Jusqu'ici, les données obtenues en manipulant la ressemblance de voisement entre des syllabes successives s'expliqueraient surtout par ce deuxième mécanisme dans le cas de tâches simples, car nous avons relevé seulement des effets de type inhibiteur sur le second stimulus en cas de partage de voisement. Cela pourrait être dû à un déclenchement particulièrement rapide des relations d'inhibition latérale basées sur le partage de traits de voisement ; cet engagement rapide du deuxième mécanisme masquerait très vite les traces du premier. Les Expériences 3a et 3b ont tout de même permis de montrer l'implication du premier mécanisme en cas de partage de voisement, à condition d'entraver la mise en jeu du deuxième mécanisme par une présentation individuelle des syllabes du stimulus CVCV.

L'objectif de l'Expérience 4 est d'apporter une preuve supplémentaire à l'implication du premier mécanisme basé sur le partage du voisement. Le but dans cette expérience est donc d'aménager des conditions favorables à l'observation des effets du premier mécanisme, en cas de ressemblance de voisement, pour confirmer qu'il se produit tout de même, comme c'est le cas pour la ressemblance de mode ou de lieu d'articulation. Afin d'accroître les chances d'accéder aux effets de ce premier mécanisme, la présentation des stimuli C₁VC₂V sera particulièrement rapide, et la tâche très exigeante. Les participants devront produire immédiatement à voix haute l'une des deux syllabes du pseudo-mot écrit (C₁V ou C₂V) selon une consigne préalable.

Dans une telle tâche de production, l'intervention attendue d'un mécanisme d'amorçage phonologique facilitateur pourrait se traduire par deux phénomènes :

1/ Nous attendons une plus grande exactitude de production de C₂ dans la condition où cette consonne a le même trait de voisement que C₁ (hypothèse 6).

2/ A partir du modèle, nous pouvons aussi prédire que la proportion d'erreurs ne préservant pas le voisement de la cible C₂ sera plus élevée dans la condition où C₂ et C₁ ont un voisement différent, que dans la condition où ils partagent le trait de voisement (hypothèse 7). En effet, après l'extraction rapide du voisement de C₁, d'autres phonèmes contenant ce trait devraient être pré-activés. Si C₁ et C₂ n'ont pas le même voisement, cela devrait induire beaucoup d'erreurs consistant à produire pour C₂ un phonème dont le voisement est celui de C₁. Par contre, si C₁ et C₂ partagent le même voisement, ce même mécanisme peut entraîner des erreurs, mais celles-ci préserveront le voisement de C₂, qui est le même que celui de C₁. Les erreurs consistant à appliquer indûment à une consonne un trait phonologique extrait d'un phonème précédent sont documentées en production de la parole, sous le terme d'« harmonie consonantique ». Le modèle qui fonde nos hypothèses permet de prédire des erreurs par harmonie consonantique *progressive*, et non *régressive*, car le voisement de C₂ pourrait s'assimiler à celui de C₁, sur la base du mécanisme d'amorçage facilitateur décrit en psychologie cognitive.

3.1. Méthode

a. Participants . 24 étudiants en psychologie ont participé à cette expérience (63% de filles et 37% garçons, âge moyen = 30 ans 4 mois, écart-type = 5 ans 4 mois). Tous étaient bons lecteurs, de langue maternelle française, et avaient une vue normale avec ou sans correction. Ils étaient tous droitiers : tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971). Nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 89%, écart-type = 4%).

b. Stimuli. La liste expérimentale était constituée de 144 items, dont 96 pseudo-mots disyllabiques de structure CVCV et 48 syllabes isolées, les voyelles étant toujours le phonème /y/ (écrit <u> en français). Douze consonnes étaient utilisées pour créer les items, et elles étaient réparties en trois catégories pour le lieu : la catégorie 1 contenait /p, b, f, v/, la catégorie 2 contenait /t, d, s, z/ et la catégorie 3 /k, g, ʃ, ʒ/. Dans tous les pseudo-mots disyllabiques, les deux consonnes partageaient le même mode d'articulation (occlusif ou fricatif). La liste expérimentale était divisée en 4 blocs : dans deux d'entre eux les participants devaient rappeler la syllabe de gauche, C₁ (72 items), et dans les deux autres la seconde syllabe, C₂ (72 items). Dans les 4 blocs, les stimuli étaient répartis en trois conditions expérimentales : la condition avec partage du trait de voisement par les deux consonnes du pseudo-mot (qui ne différaient donc que par le lieu), la condition où les valeurs de voisement des deux consonnes étaient différentes (en plus de la différence de lieu), la condition où la cible était présentée de manière isolée, avec une simple indication de sa position (e.g., --bu, ou bu--). Chaque consonne, sourde ou sonore, était ainsi présentée dans trois contextes différents, et répétée deux fois dans chaque contexte. Le Tableau V présente un exemple pour chaque condition expérimentale, chacune contenant 12 stimuli :

Tableau V : Exemples pour les 4 conditions expérimentales de l'Expérience 4 (SN = sonore ; SD = sourd).

Rang de la cible	Première consonne (C ₁)			Deuxième consonne (C ₂)		
Condition	Isolé	Partage du voisement	Différence de voisement	Isolé	Partage du voisement	Différence de voisement
Exemple pour une cible sonore	(SN - - -) du--	(SN - SN) dugu	(SN - SD) duku	(- - - SN) --du	(SN - SN) gudu	(SD - SN) kudu
Exemple pour une cible sourde	(SD- - -) tu--	(SD-SD) tuku	(SD-SN) tugu	(- - - SD) --tu	(SD - SD) kutu	(SN- SD) gutu

c. Matériel et Procédure. Chacun des participants était testé individuellement dans une pièce insonorisée, installé à 57 cm de l'écran d'un ordinateur portable Macintoshbook.

Comme l'illustre le Tableau VI, chaque essai commençait par l'apparition, au centre de l'écran, d'un point de fixation (+) en gras, style Courier, et taille 48, d'une durée de 1500 ms, immédiatement remplacé par un pseudo-mot écrit en minuscules, en style Courier et taille 24 (un stimulus de 6 lettres couvrant 2.6° d'angle visuel), et présenté 33 ms. Ce pseudo-mot était immédiatement remplacé par un masque (XXXXXXX) d'une durée de 16 ms. Il était demandé au participant de prononcer la première syllabe dans 2 blocs et la deuxième dans les 2 autres blocs. Les réponses orales étaient enregistrées. En raison de la difficulté de la tâche, il était proposé aux participants un bloc d'entraînement jusqu'à ce qu'ils atteignent au moins 50% de bonnes réponses, avant de débuter l'expérience. Si un participant ne réussissait pas à atteindre 50% de bonnes réponses au bout de trois blocs d'entraînement, il n'était pas retenu pour l'expérience (11% des participants). L'expérience durait 40 minutes. L'ordre des blocs variait systématiquement entre les participants.

Tableau VI : Procédure utilisée pour l'Expérience 4.

Événements	+	Pseudo-mot	XXXXXXX	RAPPEL
Temps de présentation	1500 ms	33 ms	16 ms	Jusqu'à la réponse

3.2. Résultats

Nous avons réalisé une analyse de variance à mesures répétées avec 2 facteurs intra-individuels : le Rang de la syllabe cible (C₁V, C₂V) et la Condition (isolée, ressemblance de voisement, différence de voisement). Cette analyse a porté sur les taux d'erreurs.

L'analyse montre un effet du Rang, $F(1, 23) = 23.84, p = .0001$, avec des réponses plus exactes pour la première syllabe que pour la deuxième. L'interaction Rang * Condition est significative, $F(2, 46) = 9.66, p = .0003$. Pour le rappel de la syllabe C₂V, la présence d'une syllabe en première position augmente le taux d'erreurs, que ce soit en cas de ressemblance de voisement, $F(1, 46) = 32.89, p = .0001$, ou de différence de voisement, $F(1, 46) = 55.04, p = .0001$. Par contre, pour le rappel de la syllabe C₁V, la présence d'une autre syllabe sur la droite n'a pas d'effet, qu'elle présente une ressemblance de voisement, $F(1, 46) < 1$, ou non, $F(1, 46) = 2.68, p = .11$. Enfin, comme l'illustre la Figure 16, le rappel de C₂V suscite moins d'erreurs lorsque C₁ et C₂ se ressemblent du point de vue du voisement que lorsqu'elles diffèrent du point de vue du voisement, cette différence n'atteignant toutefois pas le seuil de significativité, $F(1, 46) = 2.84, p = .09, \eta^2 = 0.06$. Il n'y a pas d'effet significatif du partage de voisement pour le rappel de la première syllabe, $F(1, 46) < 1$.

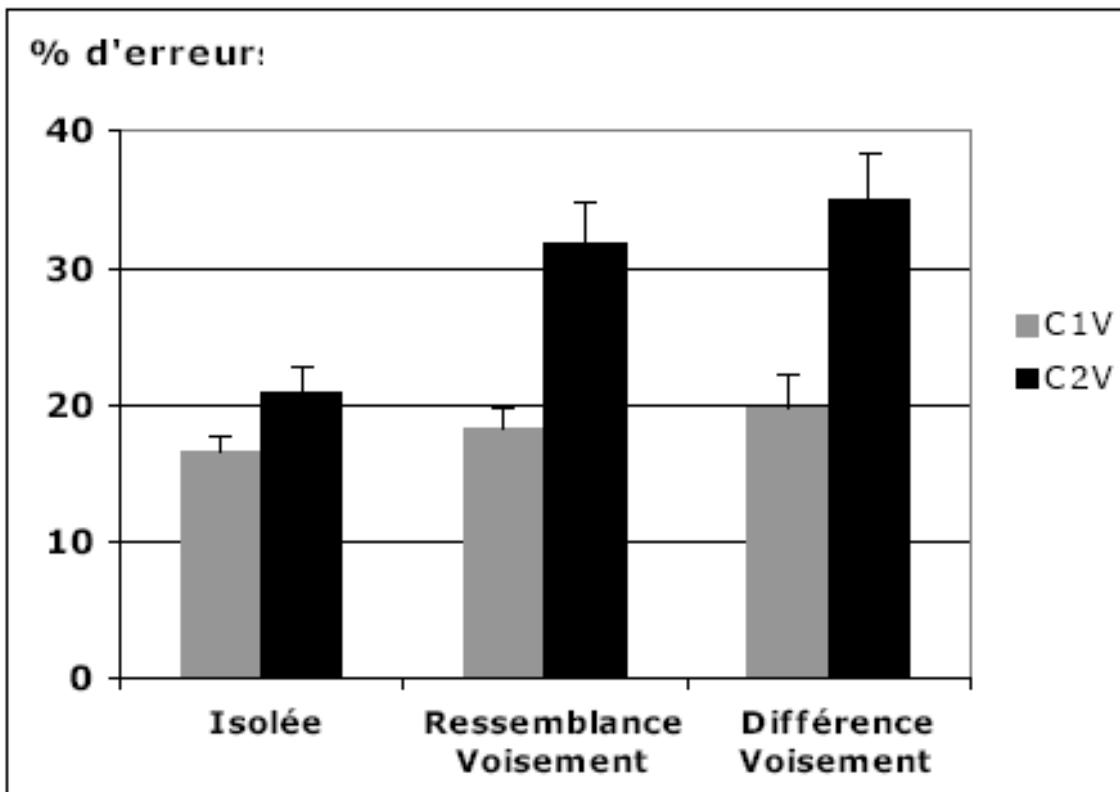


Figure 16 : Pourcentage d'erreurs (et erreur standard) pour la production de la syllabe cible (C1V ou C2V) en fonction de la condition (ressemblance ou différence de voisement entre C1 et C2, ou isolée).

Nous avons procédé à une autre analyse qui évalue s'il y a un effet d'harmonie consonantique, avec extension du trait de voisement de l'une des consonnes sur l'autre. Cette analyse mesurait, pour les stimuli disyllabiques, le pourcentage de réponses incorrectes qui préservait le trait de voisement de la syllabe cible. Les facteurs rang et ressemblance interagissent, $F(1, 23) = 5.63, p = .0264$: parmi les erreurs faites pour le rappel de C₂V, le pourcentage de réponses préservant le trait de voisement de C₂ tend fortement à être plus important en cas de ressemblance de voisement avec C₁ qu'en cas de différence de voisement, $F(1, 23) = 4.03, p = .0565, \eta^2 = 0.15$ (effet suffisant pour être considéré comme de grande taille, Cohen, 1988) (Figure 17). Par contre, il n'y a pas d'effet de la ressemblance de voisement sur la proportion d'erreurs préservant le voisement de la cible C₁V, $F(1, 23) = 1.82, p = .19$.

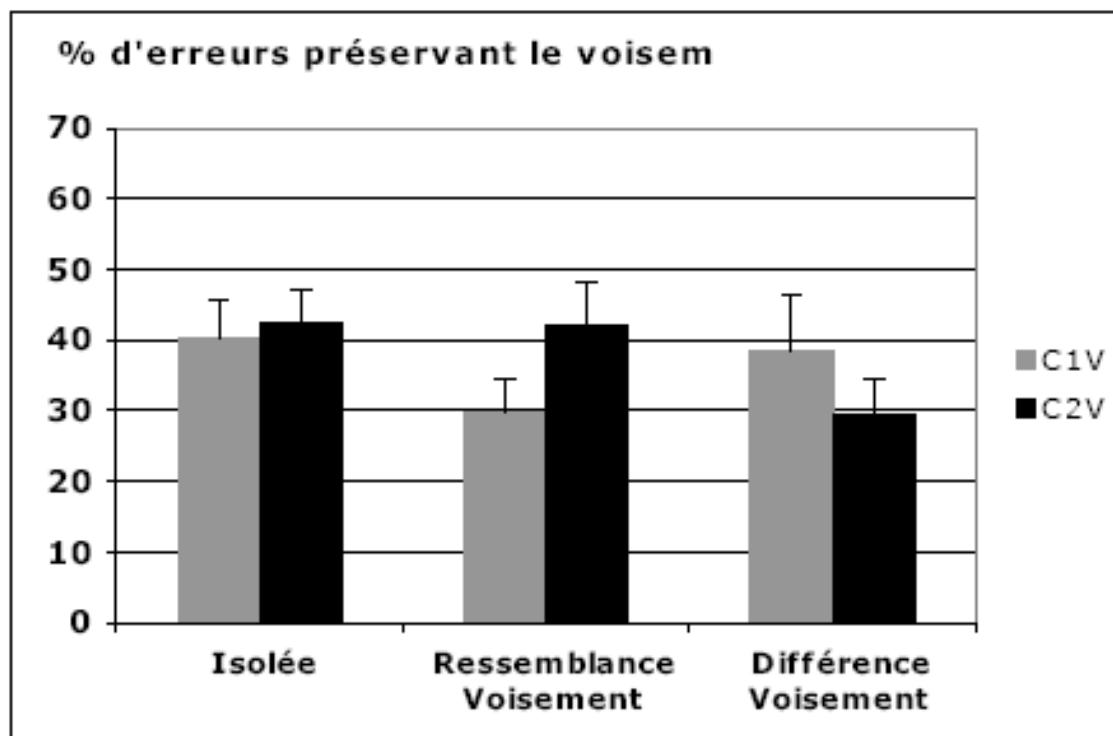


Figure 17 : Pourcentage de réponses (et erreur standard) préservant le trait de voisement de la syllabe cible (C1V ou C2V) parmi les réponses incorrectes.

3.3. Discussion

Nous observons dans cette expérience un effet du Rang, c'est-à-dire une meilleure identification de la première syllabe par rapport à la deuxième. Cela suggère que les stimuli ont été traités séquentiellement, comme cela a déjà été montré dans la lecture de pseudo-mots en français (Juphard, Carbonnel, Ans & Valdois, 2006).

Cette Expérience 4 montre que la prononciation de la deuxième syllabe est affectée par celle d'une première syllabe, alors que l'inverse n'est pas vrai. Plus particulièrement, il apparaît que les performances pour la lecture de la deuxième syllabe sont modulées par sa ressemblance de voisement avec la première syllabe. Les performances pour C2V sont plus élevées en cas de partage de voisement. Cet effet de ressemblance phonologique, qui va dans le sens de notre hypothèse (hypothèse 6), n'est toutefois pas significatif. Il doit donc être interprété avec prudence et ne suffit pas pour affirmer qu'un amorçage phonologique facilitateur classique intervienne précocement, sur la base du partage du voisement, dans le traitement d'un stimulus écrit.

L'analyse de la proportion des réponses erronées qui préservent le trait de voisement de C₂ révèle quant à elle des effets plus fiables. Conformément à notre attente (hypothèse 7), le pourcentage d'erreurs préservant le voisement est en effet plus important en cas de ressemblance de voisement entre C₁ et C₂ qu'en cas de différence. Cet effet est cohérent avec l'hypothèse de l'intervention rapide d'un amorçage phonologique facilitateur, basé sur le partage du voisement, en lecture (Bedoin, 2003).

Cet effet concorde également avec notre prédition concernant un phénomène d'harmonie consonantique progressive, et non régressive, à des étapes précoces du traitement de stimuli écrits. Cette assimilation asymétrique du trait de voisement pourrait être la source de nombreuses erreurs de lecture. Selon notre modèle, si l'on considère que cette assimilation relève d'un premier mécanisme phonologique, l'existence d'une second mécanisme phonologique pourrait être justifiée par sa capacité à contrecarrer les erreurs de lecture suscitées par le premier (Bedoin & Krifi, 2009). Rappelons que ce second mécanisme serait basé sur des relations d'inhibition latérale dont le poids est proportionnel à l'importance du partage de traits par les phonèmes du stimulus. Ce mécanisme produirait l'effet contraire au phénomène d'assimilation progressive, ici source d'erreurs. En mettant à jour la tendance primordiale à produire des erreurs de lecture par harmonie consonantique progressive, l'Expérience 4 conforte l'idée selon laquelle le mécanisme inhibiteur est véritablement utile au lecteur, pour qui il contrecarre une source d'erreurs.

Des travaux similaires ont été réalisés dans notre équipe en manipulant cette fois la ressemblance des consonnes en terme de mode d'articulation (Bedoin & dos Santos, 2008). Comme pour le voisement, le pourcentage d'erreurs préservant le mode dans le rappel de la deuxième syllabe tend à être plus important en cas de partage de mode entre C₁ et C₂. Néanmoins, cet effet d'harmonie consonantique progressive entre C₁ et C₂ pour le trait de mode est de taille moins importante que pour le voisement. Toutefois, comme pour le voisement, cet impact de la ressemblance de mode est plus important sur le rappel de la deuxième syllabe que sur celui de la première. De plus, cette étude de Bedoin et dos Santos (2008) montre que, d'une manière générale, à travers l'ensemble des réponses, le trait de mode est mieux préservé que le trait de voisement. Ainsi, la hiérarchie de la préservation de traits phonologiques dans ce genre d'expérience suggère une meilleure efficience de l'extraction du mode en lecture, effet qui sera discuté plus loin (discussion générale : chapitre 4) au regard de la littérature concernant les différences de statut des catégories de traits phonologiques.

4. Sensibilité à différents types de traits phonologiques en lecture chez l'adulte : Expériences 5a, 5b, 5c

L'objectif de cette série de trois expériences est de poursuivre l'étude de la sensibilité des lecteurs adultes au partage de traits phonologiques par les consonnes de stimuli écrits.

Contrairement aux expériences précédentes, la tâche imposera cette fois un codage plus précis de la position des lettres. Dans les Expériences 1, 2 et 3, une réponse pouvait être considérée comme correcte dès que le participant décidait que la lettre cible était présente dans le pseudo-mot qui la contenait. Il pouvait cependant fournir une telle réponse correcte en croyant avoir vu la lettre cible à un emplacement où elle n'était pourtant pas. Pour limiter ce problème, la cible est cette fois une syllabe présentée dans une position précise, et la question porte sur sa présence à cette place dans le pseudo-mot. Par exemple, la cible BA est présentée sous la partie gauche d'un trait lorsque la question est « la syllabe BA était-elle la première syllabe du pseudo-mot ? », alors qu'elle est présentée sous la partie droite d'un trait si la question porte sur la seconde syllabe.

Outre l'introduction de cette précaution supplémentaire, cette série d'expériences aborde un nouvel aspect des effets de ressemblance infra-phonémique en lecture. Il s'agit de vérifier que les lecteurs sont sensibles au partage de différents types de traits phonologiques par les consonnes de stimuli écrits, et non plus seulement à la ressemblance de voisement. L'Expérience 5a tentera tout d'abord de répliquer l'effet du partage de traits de voisement, puis l'Expérience 5b testera la sensibilité des lecteurs au partage du trait de mode. Ces deux expériences sont associées à plusieurs hypothèses, basées sur le modèle de lecture que nous proposons et selon lequel les adultes bons lecteurs ont élaboré une organisation des phonèmes intégrant des relations d'inhibition latérale dont le poids varie avec les traits phonologiques partagés par les phonèmes :

- Hypothèse 8 : les lecteurs adultes identifieront moins bien la consonne C_2 dans un pseudo-mot C_1VC_2V présenté rapidement si C_1 et C_2 partagent la même valeur de voisement que si elles diffèrent sur ce point, même lorsque la tâche impose un traitement précis de la position des lettres (Expérience 5a).
- Hypothèse 9 : les lecteurs adultes identifieront mieux la consonne C_1 dans un pseudo-mot C_1VC_2V présenté rapidement si C_1 et C_2 partagent la même valeur de voisement que si elles diffèrent sur ce point, même lorsque la tâche impose un traitement précis de la position des lettres (Expérience 5a).
- Hypothèse 10 : les lecteurs adultes identifieront moins bien la consonne C_2 dans un pseudo-mot C_1VC_2V présenté rapidement si C_1 et C_2 partagent la même valeur de mode (fricatif ou occlusif) que si elles diffèrent sur ce point (Expérience 5b).
- Hypothèse 11 : les lecteurs adultes identifieront mieux la consonne C_1 dans un pseudo-mot C_1VC_2V présenté rapidement si C_1 et C_2 partagent la même valeur de mode (fricatif ou occlusif) que si elles diffèrent sur ce point (Expérience 5b).

Nous nous intéressons à la sensibilité des lecteurs à d'autres traits que le voisement, non seulement pour étendre la portée de l'interprétation des effets de ressemblance infra-phonémique en lecture, mais aussi parce que cela offre l'opportunité de tester la nature véritablement phonologique des effets observés. Etant donné que des travaux réalisés en perception de parole et en production de parole montrent que l'influence de la ressemblance infra-phonémique varie selon les types de traits impliqués, nous prédisons que l'effet du partage de traits phonologiques en lecture suit des règles de même nature. Les travaux portant sur ces aspects en perception et production de parole ne permettent pas de dégager une hiérarchie très claire entre les traits de mode, de voisement et de lieu d'articulation. Nous avons toutefois vu que l'examen de la littérature permet d'ériger le mode d'articulation au sommet de cette hiérarchie, la position relative du lieu et du voisement étant plus variable selon les situations expérimentales. L'hypothèse générale que nous défendons dans cette thèse et selon laquelle l'identification de lettres dans des stimuli écrits est modulée par le partage de traits phonologiques entre la lettre cible et celles du contexte, conduit à formuler l'hypothèse suivante :

- Hypothèse 12 : étant donnée la prépondérance du mode d'articulation sur les traits de lieu d'articulation et de voisement observée dans diverses expériences évaluant la sensibilité des auditeurs et des locuteurs au partage de traits phonologiques par des phonèmes successifs, les lecteurs seront davantage sensibles au partage de traits phonologiques par les consonnes d'un stimulus écrit s'ils relèvent du mode d'articulation plutôt que du lieu d'articulation ou du voisement.

Dans cette série, l'Expérience 5c introduit pour la première fois la ressemblance de lieu d'articulation comme variable. Elle compare directement l'influence du partage de traits de mode, de voisement et de lieu, en proposant une condition contrôle où les deux consonnes ne partagent aucun trait, et trois conditions dans lesquelles un seul trait est partagé (dans une condition il s'agit du mode, dans une autre du lieu et dans une autre du voisement). Les résultats de cette expérience pourraient donc apporter de nouveaux éléments permettant de discuter les Hypothèses 8 à 12.

Pour finir, contrairement aux Expériences 5a et 5b, dans lesquelles les deux consonnes partagent toujours au minimum le même mode d'articulation, ce n'est pas le cas dans l'Expérience 5c. Il sera ainsi possible d'évaluer si d'éventuels effets de partage de voisement dans l'Expérience 5a perdurent dans une situation où les consonnes ne partagent pas, à la base, le même mode (Expérience 5c). Cela témoignerait de la stabilité de l'effet. De même, nous pourrons évaluer si d'éventuels effets de partage de mode dans l'Expérience 5b perdurent dans une situation où les consonnes ne partagent pas le même voisement (Expérience 5c).

4.1. Sensibilité au partage de traits phonologiques de voisement : Expérience 5a

4.1.1. Méthode

a. Participants. L'expérience a été proposée à 18 étudiants en sciences humaines (27% de garçons et 73% de filles ; âge moyen = 21 ans 6 mois ; écart-type = 2 ans 6 mois), de langue maternelle française et présentant une vue normale avec ou sans correction. Tous ont rempli un formulaire de consentement et une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971). Seuls les participants droitiers, c'est-à-dire dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 88%, écart-type = 13%), ont été sélectionnés.

b. Stimuli. La liste contient au total 384 items constitués à partir de 192 pseudo-mots différents de structure C₁VC₂V, composés de 4 phonèmes et la voyelle est toujours un /y/, correspondant à la lettre « u » en français. Les stimuli expérimentaux sont 96 pseudo-mots pour lesquels la réponse exacte est positive parce qu'ils contiennent la cible. La consonne cible est la première (C₁) dans la moitié des stimuli (48), et la deuxième (C₂) dans l'autre moitié. Les deux consonnes du stimulus présentent toujours une différence de lieu d'articulation, mais partagent le même mode. Dans la moitié des items, ces deux consonnes partagent la même valeur de voisement, dans l'autre moitié elles diffèrent sur cette valeur de voisement (facteur manipulé dans cette expérience). Ainsi, pour les 48 stimuli contenant la cible en position C₁, comme pour les 48 contenant la cible en C₂, 8 conditions expérimentales ont été créées :

a) quatre conditions avec partage du voisement :

- les deux consonnes sont des fricatives sonores (6),
- les deux consonnes sont des fricatives sourdes (6)
- les deux consonnes sont des occlusives sonores (6)
- les deux consonnes sont des occlusives sourdes (6)

b) quatre conditions avec différence de voisement :

- les deux consonnes sont fricatives, C_1 est sourde, C_2 est sonore (6)
 - les deux consonnes sont fricatives, C_1 est sonore, C_2 est sourde (6)
 - les deux consonnes sont occlusives, C_1 est sourde, C_2 est sonore (6)
 - les deux consonnes sont occlusives, C_1 est sonore, C_2 est sourde (6)

Pour C₁ et C₂, nous avons utilisé les mêmes consonnes (/p, t, k, f, s, ʃ, b, d, g, v, z, ʒ/). Pour une même condition, chacune des 6 consonnes cibles possibles est proposée dans deux pseudo-mots (e.g., pour la cible P en C₁ : *pudu* et *pugu*), dans lesquels elle est associée à deux consonnes différentes (ici, /d/ et /g/). Par ailleurs, cette consonne cible est également proposée en deuxième position, associée aux mêmes combinaisons de consonnes (e.g., *dupu* et *gupu*).

A cette liste de 96 items appelant une réponse positive, s'ajoutent 96 items distracteurs. Ils contiennent les mêmes consonnes que les stimuli expérimentaux, mais la question porte sur une consonne cible différente, non présente dans le pseudo-mot proposé. Ainsi, 50% des réponses attendues sont positives et 50% sont négatives.

Afin d'obtenir une quantité de données plus conséquente, chaque item est présenté deux fois dans l'expérience (pour un total de 384 items). Les 384 items sont répartis en 6 blocs séparés de pauses et comptant chacun 64 items. L'ordre des blocs varie systématiquement entre les participants selon la méthode des carrés latins.

c. Matériel et Procédure. Chaque participant est testé individuellement dans une pièce insonorisée, les yeux à 57 cm de l'écran d'un ordinateur portable Macintosh ibook. Comme l'illustre le Tableau VII, chaque essai commence par la présentation pendant 1500 ms d'un point de fixation centré sur l'écran (+) en gras, style Courrier, taille 18. Il est suivi du pseudo-mot centré, écrit en minuscule en style Courrier, taille 24, couvrant 1.4 degré d'angle visuel et présenté 50 ms. Ce pseudo-mot est immédiatement remplacé par un masque (XXXXXX) de 16 ms. Enfin, la syllabe cible apparaît, écrite en majuscule en style Courrier, taille 24, un peu en dessous du pseudo-mot avec une indication de son emplacement :

pour le rang 1 : BU et BU pour le rang 2.

Cette syllabe reste à l'écran jusqu'à ce que le participant décide si elle était présente ou non dans le pseudo-mot à l'emplacement indiqué. Il dispose de deux clefs pour répondre le plus exactement et le plus rapidement possible, en appuyant avec l'un des deux index. L'expérience commence après 10 essais, dure environ 45 minutes et est ponctuée de 5 pauses.

Tableau VII : Procédure utilisée pour l'Expérience 5a.

Événements	Point de fixation central	Pseudo-mot	Masque	Syllabe cible
Temps de présentation	1500 ms	50 ms	16 ms	Jusqu'à la réponse
Exemple	+	buku	XXXXXX	BU

4.1.2. Résultats

Nous avons réalisé une analyse de variance à mesures répétées avec 4 facteurs intra-individuels : le Rang de la consonne cible (C_1 ou C_2), la Ressemblance de voisement entre C_1 et C_2 (ressemblance ou différence), le Voisement de la cible (sonore ou sourd) et le Mode de la cible (occlusif ou fricatif), sur les taux d'erreurs ainsi que sur les temps de réponse. Nous avons enlevé les temps déviants, c'est-à-dire ceux qui sont supérieurs à la moyenne des temps de réponse plus deux écarts-type et ceux qui sont inférieurs à la moyenne des temps de réponse moins deux écarts-type.

L'analyse des temps de réponse montre l'effet du Rang, $F(1, 17) = 96.26, p = .0001$, témoignant d'une meilleure identification de C_1 que de C_2 . L'interaction Rang * Ressemblance n'est pas significative, mais l'interaction Mode * Rang * Ressemblance atteint le seuil de significativité, $F(1, 17) = 8.24, p = .0120$. L'analyse des contrastes montre que cela s'explique par le fait que les sujets mettent plus de temps pour identifier C_2 en cas de ressemblance de voisement avec C_1 , à condition que ces consonnes soient occlusives, comme l'illustre la Figure 18, $F(1, 17) = 10.04, p = .0068, \eta^2 = .37$.

L'analyse des taux d'erreurs montre un effet du Rang, $F(1, 17) = 27.87, p = .0001$, avec une meilleure identification de C_1 que de C_2 . On observe également un effet du Voisement, $F(1, 17) = 15.41, p = .0015$: les consonnes sourdes sont identifiées avec plus d'exactitude que les consonnes sonores. Les facteurs rang et ressemblance n'interagissent pas, et l'interaction Mode * Rang * Ressemblance n'est pas significative. Il n'y a cependant pas d'échange rapidité-exactitude pour ce qui est de l'effet observé sur les temps de réponse.

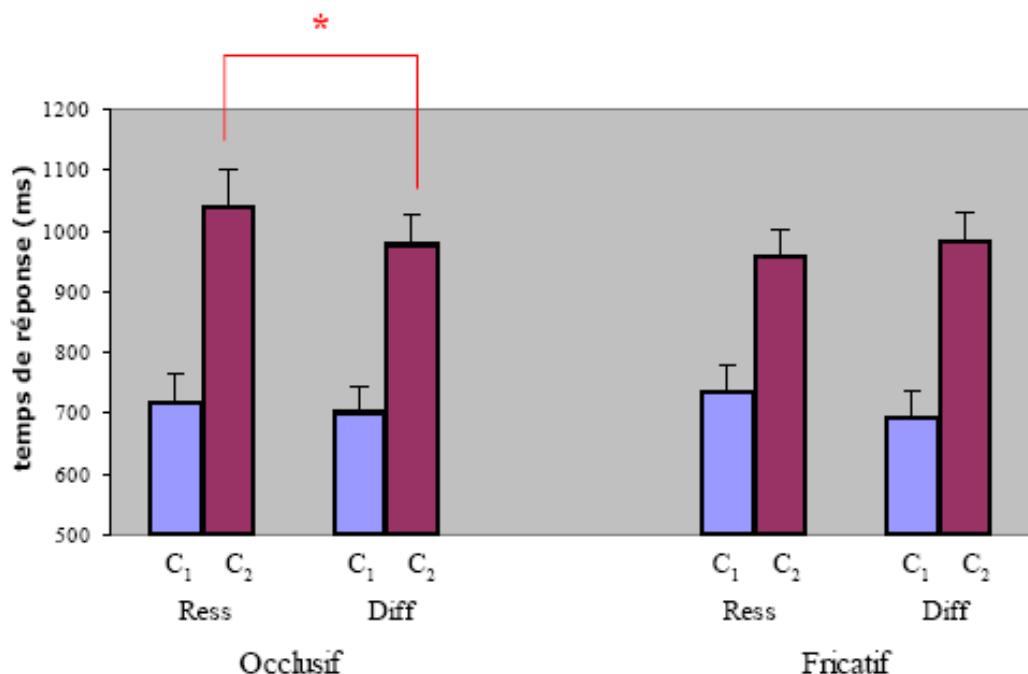


Figure 18 : temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible (C₁ ou C₂), le mode (occlusif ou fricatif) et la ressemblance de voisement (ressemblant ou différent) pour l'Expérience 5a.

4.1.3. Discussion

Nous observons un effet massif du rang de la consonne : la première consonne (C₁) est identifiée à la fois plus rapidement et plus précisément que de la deuxième (C₂). Bien qu'elles soient peu nombreuses, les lettres sont difficilement identifiables en parallèle, de façon automatique, car elles constituent un pseudo-mot qui n'a pas de représentation lexicale. Aussi cet effet du rang des lettres est vraisemblablement dû à la séquentialité de leur traitement de gauche à droite. Les participants doivent utiliser la voie analytique et donc opérer un traitement séquentiel (Juphard, Carbonnel, Ans & Valdois, 2006).

L'objectif de l'expérience était de tenter de répliquer les effets de partage du trait de voisement par les deux consonnes d'un stimulus CVCV écrit dans une tâche imposant un traitement précis de la position de chaque lettre. A cet égard, nos hypothèses sont partiellement vérifiées. En effet, le partage du voisement par les deux consonnes ralentit l'identification de la deuxième consonne, conformément à l'hypothèse 8. Cet effet n'apparaît cependant que si les consonnes sont toutes les deux occlusives mais pas si elles sont fricatives. L'effet négatif de la ressemblance de voisement sur la deuxième consonne est conforme à ce que prédit l'hypothèse de la mise en jeu de relations d'inhibition latérale au niveau phonémique (Bedoin & Krifi, 2009), mais les résultats de cette expérience suggèrent que cette ressemblance de voisement n'est pas toujours traitée de la même façon : le mode d'articulation des consonnes impliquées module cet effet. Ce résultat montre donc un statut prépondérant du mode, qui est cohérent avec certaines données de la littérature : Peters (1963) montre que le mode est un critère majeur pour estimer la ressemblance entre deux consonnes entendues, ou pour les discriminer (Stevens, 2002).

En revanche, nous ne retrouvons pas d'effet de la ressemblance de voisement pour la première consonne, en particulier pas de facilitation dans l'identification de la première consonne en cas de ressemblance de voisement : notre hypothèse 9 n'est donc pas vérifiée.

Dans cette partie expérimentale, il s'agit de vérifier que les lecteurs sont sensibles au partage de différents traits phonologiques par les consonnes de stimuli écrits, et non plus seulement au partage du voisement. L'Expérience 5a a apporté des arguments favorables à la sensibilité au partage du voisement, avec un effet pouvant s'expliquer par la mise en jeu de relations d'inhibition latérale entre phonèmes. Nous proposons l'Expérience 5b afin de tester la sensibilité des lecteurs au partage du trait de mode, avec la même hypothèse que pour le voisement, basée sur le modèle de lecture que nous proposons et selon lequel les adultes bons lecteurs ont élaboré une organisation des phonèmes intégrant des relations d'inhibition latérale dont le poids varie avec les traits phonologiques partagés par les phonèmes.

4.2. Sensibilité au partage de traits phonologiques de mode : Expérience 5b

4.2.1. Méthode

a. Participants. L'expérience a été proposée à 24 étudiants en sciences humaines (25% de garçons et 75% de filles ; âge moyen = 21 ans 8 mois ; écart-type = 2 ans 4 mois), de langue maternelle française et présentant une vue normale avec ou sans correction. Là encore, tous ont rempli un formulaire de consentement et une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971). Seuls les participants droitiers, c'est-à-dire dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité = 86%, écart-type = 13%), ont été retenus.

b. Stimuli. La liste des stimuli est construite de la même façon que celle de l'Expérience 5a et contient au total 384 items construits à partir de 192 pseudo-mots C₁VC₂V différents, dont 96 pour lesquels une réponse positive est attendue. La consonne cible est la première consonne dans la moitié des cas (48) et la deuxième dans l'autre moitié (48). Le principe est cette fois de proposer deux consonnes qui diffèrent pour le lieu, mais qui partagent toujours la même valeur de voisement. A cette ressemblance de voisement s'ajoute ou non une ressemblance de mode (facteur manipulé dans cette expérience). Pour chaque ensemble de 48 stimuli, il y a donc 4 conditions expérimentales : 12 stimuli contiennent deux consonnes fricatives, 12 deux consonnes occlusives, 12 une fricative puis une occlusive, et 12 une occlusive puis une fricative. Pour C₁ et C₂, nous avons utilisé les mêmes consonnes fricatives (/f, s, v, z, ʃ, ʒ/) et les mêmes consonnes occlusives (/b, d, g, k, p, t/). Comme dans l'Expérience 5a, pour une condition donnée, une consonne cible dans une position donnée est proposée dans deux pseudo-mots différents. Cette cible est présentée un même nombre de fois en première et en deuxième position. Nous avons ajouté aux 96 items expérimentaux 96 items distracteurs, appelant une réponse négative, et conçus sur le même principe que dans l'expérience précédente. Afin d'obtenir une quantité de données plus conséquente, chaque item est présenté deux fois dans l'expérience (pour un total de 384 items). Les stimuli sont répartis en 6 blocs comptant chacun 64 items et ponctués de 5 pauses. L'expérience débute après 10 items d'essai. L'ordre des blocs varie systématiquement entre les participants selon la méthode des carrés latins.

c. Matériel et Procédure. Le matériel et la procédure sont les mêmes que dans l'Expérience 5a.

4.2.2. Résultats

Nous avons réalisé une analyse de variance à mesures répétées avec 4 facteurs intra-individuels : le Rang de la consonne cible (C_1 ou C_2), la Ressemblance de mode entre les deux consonnes (ressemblance ou différence), la valeur de Mode de la cible (occlusif ou fricatif) ainsi que la valeur de Voisement de la cible (sonore ou sourde), à la fois sur les taux d'erreurs et sur les temps de réponse. Nous avons exclu les temps déviants selon la même procédure que dans l'expérience précédente. L'analyse des temps de réponse révèle l'effet du Rang, $F(1, 23) = 25.05, p = .0001$, qui indique que C_1 est identifiée plus rapidement que C_2 . L'interaction Rang * Ressemblance est significative, $F(1, 23) = 5.27, p = .0312$. L'étude des contrastes montre, comme l'illustre la Figure 19, que la réponse pour C_2 est significativement plus lente en cas de ressemblance de mode qu'en cas de différence, $F(1, 23) = 10.62, p = .0035, \eta^2 = .32$.

Selon l'analyse des taux d'erreurs, le Rang a un effet significatif, $F(1, 23) = 30.05, p = .0001$, les performances pour identifier C_1 étant meilleures que pour identifier C_2 . L'interaction Rang * Ressemblance n'est pas significative, mais l'interaction Rang * Ressemblance * Mode * Voisement est significative, $F(1, 23) = 10.63, p = .0034$: l'analyse des contrastes révèle que la ressemblance de mode gêne le traitement de C_2 uniquement lorsqu'elle est fricative et sonore, ce qui explique 43% de la variance, $F(1, 23) = 17.65, p = .0003, \eta^2 = .43$.

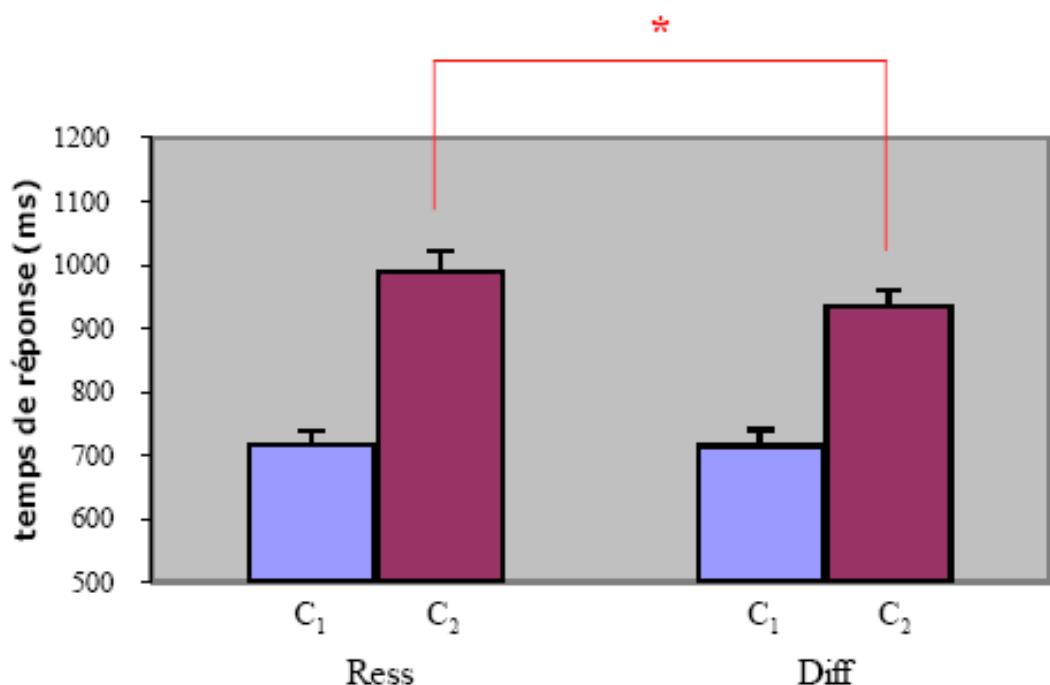


Figure 19 : temps de réponse (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible (C_1 ou C_2) et la ressemblance de mode (ressemblant ou différent) pour l'Expérience 5b.

4.2.3. Discussion

Comme dans l'expérience précédente, les résultats montrent un effet important du rang de la consonne, indiquant que les lecteurs effectuent un traitement séquentiel des pseudo-mots : la première consonne est mieux et plus rapidement identifiée que la deuxième. Cet effet rejoue les données de la littérature (Juphard et al., 2006).

Par ailleurs, comme dans l'Expérience 5a, il apparaît que la ressemblance de mode est gênante pour l'identification de la deuxième consonne du stimulus, même si cette fois les consonnes se ressemblent du point de vue du voisement. Cet effet peut être interprété par la mise en jeu de relations inhibitrices entre phonèmes de même mode. Les résultats de cette expérience sont donc cohérents avec notre hypothèse 10. Cela apporte donc un argument en faveur de la mise en jeu d'une organisation des connaissances phonémiques basées sur des relations d'inhibition latérale déterminées par des caractéristiques infra-phonémiques. La comparaison entre les Expériences 5a et 5b montre que l'effet du mode est prépondérant par rapport à celui du voisement, car il ne dépend pas du voisement de la cible, alors que l'effet du voisement est modulé par le mode de la consonne cible (Expérience 5a).

Les résultats ne montrent pas d'effet de la ressemblance de voisement sur la première consonne, en particulier pas de facilitation dans son identification en cas de ressemblance de voisement. Notre hypothèse 11 n'est donc pas vérifiée.

Les deux Expériences 5a et 5b ne testaient les effets de ressemblance infra-phonémique que pour les catégories Voisement et Mode ; l'Expérience 5c propose une comparaison des effets de ressemblance de lieu, de mode et de voisement entre les deux consonnes présentées, pour découvrir des éléments sur une éventuelle hiérarchie. Dans l'Expérience 5a, l'effet de ressemblance de voisement était modulé par une caractéristique de mode. Dans l'Expérience 5c, C₁ et C₂ ne partagent pas le même mode dans les conditions où nous manipulons la ressemblance de voisement, contrairement à l'Expérience 5a. C'est pourquoi dans l'Expérience 5c l'effet de ressemblance de voisement pourrait en être affecté.

4.3. Sensibilité aux traits phonologiques de voisement, de mode et de lieu : Expérience 5c

4.3.1. Méthode

a. Participants. L'expérience a été proposée à 24 étudiants en sciences humaines (29% de garçons et 71% de filles ; âge moyen = 21 ans 3 mois ; écart-type = 2 ans 7 mois), de langue maternelle française et présentant une vue normale avec ou sans correction. Tous ont rempli un formulaire de consentement et une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971). Seuls les participants droitiers, c'est-à-dire dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité = 87%, écart-type = 16%), ont été retenus.

b. Stimuli. La liste des stimuli est construite de la même façon que celles des Expériences 5a et 5b, et contient 384 items de structure C₁VC₂V, construits à partir de 192 pseudo-mots différents. Les 96 stimuli expérimentaux requièrent une réponse positive, avec une question portant sur C₁ pour la moitié des stimuli (48) ou sur C₂ pour l'autre moitié. Chaque ensemble de 48 stimuli est réparti en 4 conditions expérimentales :

- 12 items contiennent 2 consonnes partageant seulement le trait de lieu (labial ou dental),
- 12 items contiennent 2 consonnes partageant seulement le trait de mode (occlusif ou fricatif),
- 12 items contiennent 2 consonnes partageant seulement le trait de voisement (sourd ou sonore),
- 12 items contiennent 2 consonnes ne partageant aucun trait.

Les consonnes utilisées sont : /p, t, b, d, f, s, v, z/. Dans les Expériences 1, 2 et 3, nous avions rapproché le lieu d'articulation des vélaires /k et g/ et celui des post-alvéolaires /t/ et /d/ dans une même catégorie. Leur lieu d'articulation est cependant trop différent pour le considérer comme semblable dans une expérience où la similarité de lieu est l'un des principaux facteurs (dans les Expériences 5a et 5b, les deux consonnes d'un item étaient toujours différentes pour le lieu, et le problème ne se posait donc pas). C'est pourquoi nous n'avons proposé dans l'Expérience 5c que des labiales et des dentales.

Un même item (e.g., *butu*) est présenté deux fois : dans un cas il faut identifier la première consonne (/b/), dans l'autre la deuxième (/t/). A cette liste de stimuli appartenant une réponse positive, s'ajoute le même nombre de distracteurs (96 stimuli) qui requièrent une réponse négative. Chaque item est présenté deux fois dans l'expérience et l'ensemble des 384 items est réparti en 6 blocs de 64 items, ponctués de 5 pauses. L'expérience commence après 10 items d'essai. L'ordre des blocs varie systématiquement entre les participants selon la méthode des carrés latins.

c. Matériel et Procédure. Le matériel et la procédure sont les mêmes que dans les Expériences 5a et 5b.

4.3.2. Résultats

Nous avons réalisé une analyse de variance à mesures répétées avec 2 facteurs intra-individuels : le Rang (C_1 ou C_2), et le type de Ressemblance (lieu, mode, voisement ou aucune), à la fois sur les taux d'erreurs et sur les temps de réponse. Nous avons exclu les temps déviants selon la même procédure que dans les expériences précédentes.

L'analyse des temps de réponse montre un effet du Rang, $F(1, 23) = 110.43, p = .0001$, avec de meilleures performances pour C_1 que pour C_2 . En revanche, le facteur rang n'interagit pas avec le facteur ressemblance.

L'analyse des taux d'erreurs confirme l'effet du Rang, $F(1, 23) = 71.98, p = .0001$, avec de meilleures performances pour identifier C_1 que C_2 . Par ailleurs, l'interaction Rang * Ressemblance est significative, $F(3, 23) = 4.44, p = .0065$. Comme l'illustre la Figure 20, le partage d'un trait phonologique entraîne toujours davantage d'erreurs sur C_2 que dans une condition où aucun trait n'est partagé. Plus précisément, l'étude des contrastes montre que le pourcentage d'erreurs pour les cibles C_2 est significativement plus élevé en cas de ressemblance de mode, $F(1, 23) = 8.08, p = .0059, \eta^2 = .26$, ainsi qu'en cas de ressemblance de lieu, $F(1, 23) = 3.96, p = .0500, \eta^2 = .15$, que lorsqu'aucun trait n'est partagé. L'effet de la ressemblance de mode sur C_2 explique 26% de la variance, alors que l'effet de la ressemblance de lieu n'en explique que 15%. La ressemblance de voisement a aussi un effet négatif, mais non significatif. En revanche, l'identification de C_1 est, comme on l'attendait, facilitée en cas de partage d'un trait phonologique. L'effet est significatif en

cas de ressemblance de lieu, $F(1, 23) = 6.55, p = .0130, \eta^2 = .22$, et il est marginal en cas de ressemblance de mode, $F(1, 23) = 2.30, p = .13, \eta^2 = .09$.

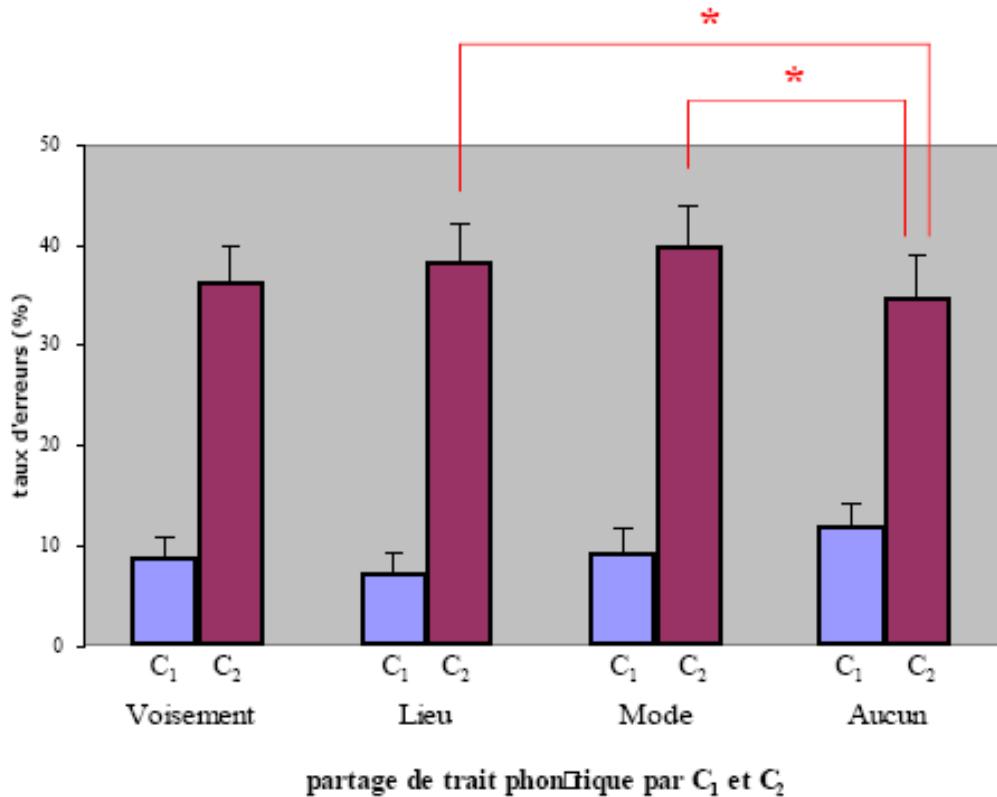


Figure 20 : taux d'erreurs (et erreur standard) selon le rang de la consonne cible (C_1 ou C_2) et le type de trait phonologique partagé par C_1 et C_2 (voisement, lieu, mode ou aucun) dans l'Expérience 5c.

4.3.3. Discussion

Comme dans les expériences précédentes, nous trouvons un effet massif du rang de la consonne : la première consonne est identifiée à la fois plus rapidement et plus précisément que la deuxième. Cet effet est vraisemblablement dû au fait que les lecteurs effectuent un traitement séquentiel des pseudo-mots présentés (Juphard et al., 2006).

Notre hypothèse générale était qu'il existe des effets de ressemblance infra-phonémique en lecture entre deux consonnes écrites d'un même pseudo-mot, se manifestant sur C_1 et sur C_2 . Le premier objectif de l'expérience était donc de tenter de montrer des effets opposés selon le rang de la consonne, en particulier un effet inhibiteur pour C_2 . C'est justement l'effet que nous retrouvons en cas de partage du trait de mode et en cas de partage du trait de lieu. En effet, l'identification de C_2 est perturbée si la consonne qui la précède partage le même mode ou le même lieu. L'effet du mode sur le traitement de C_1 n'atteint pas le seuil de significativité, mais va dans le sens d'une facilitation. La ressemblance phonologique n'a donc pas le même effet selon le rang de la consonne cible. Ces résultats peuvent être interprétés en termes de connaissances sur les phonèmes organisées selon des relations d'inhibition latérale. En effet, la mise en place

de ces relations intra-niveau produirait un effet négatif de la ressemblance de mode sur la deuxième consonne. Le traitement de la deuxième consonne est alors rendu difficile, et son effet négatif de masque est supposé se réduire et moins affecter l'identification de la première consonne (Bedoin & Krifi, 2008 ; Bedoin, 2003 ; Krifi, Bedoin & Herbillon, 2003). Cela concorde avec les données trouvées dans cette expérience pour le mode et le lieu. Néanmoins, l'effet du mode est très fort, plus fort que celui du lieu. L'effet de la ressemblance de mode sur C_2 explique une plus grande part de la variance que l'effet de la ressemblance de lieu. Notre hypothèse 12 trouve donc ici des arguments en sa faveur.

En revanche, nous retrouvons peu d'effet de la ressemblance de voisement entre les deux consonnes du stimulus dans cette expérience. Il se peut que cette absence soit due au contexte particulier dans lequel le voisement est ici manipulé. En effet, l'Expérience 5a teste également l'effet de la ressemblance de voisement, mais les consonnes partagent dans cette expérience le même mode à la base. Nous trouvons alors un effet significatif du voisement. Ici, les deux consonnes ne partagent qu'un seul trait phonologique : lorsque C_1 et C_2 partagent le même voisement, elles ne partagent pas le même mode en plus. Dans cette condition, nous ne retrouvons plus d'effet significatif du voisement. Par conséquent, si deux consonnes ne partagent que le même voisement, en l'absence de ressemblance de mode, cela n'entraîne pas de difficulté particulière pour identifier la deuxième consonne. Cela va dans le sens d'une certaine dépendance des effets de voisement par rapport à des caractéristiques de mode, comme dans l'Expérience 5a. Par ailleurs, cette absence d'effet du voisement ici n'est pas due à une trop grande différence générale entre deux phonèmes en terme de nombre de traits en commun puisque nous retrouvons un effet du lieu et surtout du mode dans des conditions expérimentales équivalentes.

Nous pouvons donc avancer quatre arguments en faveur d'une organisation hiérarchique des traits phonologiques en lecture, dans laquelle le mode serait au-dessus du voisement. Le premier argument est issu de l'Expérience 5a : l'effet négatif de la ressemblance de voisement pour le traitement de C_2 se limite aux consonnes occlusives, il est donc dépendant des caractéristiques de mode. Le deuxième argument est issu de la comparaison entre les résultats des Expériences 5a et 5c : l'effet du voisement dépend de la présence ou non d'une ressemblance de base en terme de mode. Le troisième argument est l'indépendance de l'effet de partage de mode par rapport aux caractéristiques de base des consonnes concernées en terme de voisement. Le quatrième argument est l'importance de la taille de l'effet du partage de mode par rapport à la taille des effets de partage d'autres traits (Expérience 5c). Les différents types de traits ne semblent donc pas être traités de la même manière : nous trouvons des effets explicables par l'intervention de relations d'inhibition latérale en cas de ressemblance de mode, de lieu ou de voisement, mais ces effets sont plus systématiques pour le mode. En cela, notre hypothèse 12 trouve ici des arguments en sa faveur, pour ce qui est d'une organisation hiérarchique des traits phonologiques.

L'ensemble de ces résultats est cohérent avec ceux d'autres travaux menés dans l'équipe (Bedoin & dos Santos, 2008 ; Bedoin & Krifi, 2009) et avec d'autres données de la littérature qui montrent un statut prédominant de la catégorie de mode. Rogers et Storkel (1998) montrent en effet en production de parole que la ressemblance infra-phonémique entre les mots à prononcer est source d'erreurs, et que le mode a justement une importance particulière à cet égard. De la même manière, Stevens (2002) montre que le mode est un critère majeur pour discriminer deux consonnes entendues. Dans d'autres études en clinique, le mode est le trait le mieux préservé en cas d'aphasie (Gow et Caplan, 1996).

5. Organisation de catégories de traits phonologiques : Expériences d'appariement de syllabes (Expériences 6a et 6b)

Nous avons mené l'Expérience 6 auprès de trois groupes : des adultes normo-lecteurs (Expérience 6a), des enfants normo-lecteurs de CE1 et de CE2 ainsi que des enfants dyslexiques (Expérience 6b). Nous souhaitions répondre essentiellement à des questions concernant l'organisation des traits dans le système de représentations phonologiques. Notre hypothèse générale était que les traits phonologiques du français ne sont pas représentés de manière linéaire, mais sont rassemblés en catégories telles que le mode d'articulation, le lieu d'articulation et le voisement.

Afin de tester la pertinence de telles catégories pour le système cognitif, nous avons élaboré une épreuve métalinguistique permettant d'évaluer si les participants faisaient des rapprochements entre des consonnes simplement sur la base du nombre de traits partagés ou si le partage de traits relevant de l'une ou l'autre de ces catégories introduisait des biais dans les choix. Le principe est de proposer une syllabe CV cible écrite, puis deux autres syllabes. La syllabe cible doit être appariée à l'une des deux autres en fonction de la proximité de leurs représentations phonologiques. La cible partage toujours un seul trait avec chacune des syllabes proposées. Dans trois blocs séparés, les deux propositions partagent avec la cible des traits de catégories différentes. L'analyse devrait permettre de savoir si les réponses dépendent seulement du nombre de traits partagés, auquel cas, dans cette situation de choix forcé, les réponses ne devraient pas différer du hasard. Si les participants ont une préférence pour appairer les syllabes qui partagent des traits d'une certaine catégorie, cela constituera un premier argument pour la pertinence de cette catégorie du point de vue de la cognition.

Un autre argument pourrait conforter l'hypothèse de véritables catégories de traits phonologiques. La catégorie de lieu est par exemple représentée dans l'expérience par trois valeurs (labial, dental, vélo-palatal). Un biais favorisant dans de mêmes proportions toutes les valeurs d'une même catégorie de traits, par rapport à une autre catégorie, serait le gage d'une cohérence des réponses et témoignerait d'un véritable comportement catégoriel.

Par ailleurs, nous avons vu que certaines données de la littérature suggèrent l'existence d'une organisation hiérarchique de telles catégories de traits phonologiques. En évaluant le poids implicitement attribué à trois catégories de traits fondamentaux pour les consonnes du français, nous testerons quelques hypothèses sur leurs relations. Peu de travaux portent directement sur cette question, mais ceux que nous avons synthétisés suggèrent que le mode d'articulation pourrait bien être la catégorie de trait la plus organisatrice chez les adultes et les enfants normo-lecteurs. Nous prédisons donc qu'ils appaireront plus fréquemment les syllabes en fonction du partage de mode, plutôt que du partage de lieu ou de voisement (hypothèse 13). Etant donnée la modalité de présentation visuelle du matériel, le lieu d'articulation pourrait avoir un statut plus important que le voisement (Hebgen, 1986), mais la relation hiérarchique entre lieu et voisement est sans doute moins claire que celle qui place vraisemblablement le mode au sommet.

Nous faisons aussi l'hypothèse que la hiérarchie des catégories de traits comme critère d'organisation des consonnes se mettrait en place progressivement chez les enfants pendant la période où ils apprennent à lire (hypothèse 14). Les exigences de cette activité, en termes de précision et d'organisation des connaissances phonologiques, amèneraient sans doute l'enfant à raffiner l'élaboration de cette hiérarchie. Nous supposons que les

enfants dyslexiques présentent une organisation différente de ces trois catégories de traits phonologiques, et des anomalies particulièrement marquées sont attendues chez les enfants présentant une dyslexie de type phonologique plutôt qu'une dyslexie de type surface (hypothèse 15).

Enfin, nous proposons ces Expériences 6a et 6b dans deux modalités : une modalité seulement visuelle et une modalité audio-visuelle dans le but de tester la persistance des résultats avec l'ajout d'informations auditives. La partie en audio-visuel a été proposée à un petit groupe d'adultes bons lecteurs et à un groupe d'enfants normo-lecteurs de CE2.

5.1. Organisation hiérarchique des types de traits chez les adultes normo-lecteurs : Expérience 6a

L'objectif de cette expérience est d'étudier l'organisation des traits phonologiques. Nous proposons de tester l'hypothèse théorique selon laquelle leur organisation cognitive est catégorielle, avec des poids différents pour chaque catégorie, permettant de décrire leur hiérarchie. Notre hypothèse opérationnelle est que, dans une tâche d'appariement de syllabes écrites CV, les choix des adultes normo-lecteurs ne seront pas guidés indifféremment par la ressemblance basée sur n'importe quel type de trait phonologique, mais préférentiellement par le mode d'articulation plutôt que par le voisement ou le lieu d'articulation, et par le lieu plutôt que par le voisement.

Pour tester cette hypothèse, l'Expérience 6a comporte trois blocs, opposant ces trois catégories de traits deux à deux : le mode et le lieu d'articulation dans le bloc 1, le mode et le voisement dans le bloc 2, le voisement et le lieu dans le bloc 3. Ces trois blocs sont proposés à chaque participant.

5.1.1. Méthode

a. Participants. Trente-six étudiants en Psychologie de l'Université Lumière Lyon 2 ont participé à cette expérience (17% garçons et 83% filles ; âge moyen = 25 ans 7 mois, écart-type = 8 ans 9 mois). Vingt-six étudiants ont passé l'Expérience 6a en modalité visuelle, et dix en modalité audio-visuelle. Tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) : nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (indice moyen de latéralité manuelle = 90%, écart-type = 8%). Tous étaient de langue maternelle française et avaient une vue normale avec ou sans correction. Ils estimaient ne pas avoir rencontré de problème particulier dans l'apprentissage de la lecture. Nous n'avons retenu que ceux qui n'avaient aucune connaissance en linguistique et psycholinguistique, ainsi 2 étudiants ont été exclus pour la version en modalité visuelle ($N = 24$) car ils avaient une formation universitaire en sciences du langage.

b. Stimuli. La liste était constituée de 3 blocs de 48 triplets de syllabes CV (soit un total de 144 triplets), toutes composées de la voyelle /a/ précédée d'une consonne qui était une des 12 occlusives ou fricatives de la langue française, selon la classification établie par Clements (tableau 1 de la partie théorique). Chaque essai expérimental était constitué de 3 syllabes CV : une syllabe-cible et deux syllabes-choix. Chacune des deux syllabes-choix partageait avec la syllabe-cible un seul trait phonologique. Dans le bloc 1, chaque triplet opposait la ressemblance de mode à la ressemblance de lieu ; dans le bloc 2, la ressemblance de mode à celle de voisement ; et dans le bloc 3, la ressemblance de voisement à celle de lieu.

Dans le bloc 1, concernant la ressemblance de mode, pour chaque syllabe-cible (e.g., /ka/) il y avait deux possibilités de syllabe-choix (e.g., /ba/ ou /da/) ; en revanche, pour la ressemblance de lieu, il n'y avait qu'une seule possibilité pour chaque consonne (e.g., /□a/ pour la cible /ka/). Ainsi, pour chaque cible (e.g., /ka/), deux triplets de syllabes étaient possibles (/ka/-/ba/-/□a/ ou /ka/-/da/-/□a/). Dans la liste, chacun de ces triplets était représenté 2 fois, avec contrebalancement de la disposition gauche-droite des syllabes-choix, chaque cible apparaissant ainsi 4 fois. Le Tableau VIII présente un exemple pour le bloc 1.

Tableau VIII : Exemple pour le bloc 1 (la syllabe en gras est la cible).

	Ressemblance de mode	Ressemblance de lieu
Exemple	/ka/ -/ba/	/ka/ - /□a/

Dans le bloc 2, concernant la ressemblance de voisement, pour chaque syllabe-cible (e.g., /pa/), il y a deux possibilités de syllabes-choix (e.g., /sa/ ou /ʃa/) ; deux syllabes-choix sont également possibles pour la ressemblance de mode (e.g., /da/ ou /ga/ pour la cible /pa/). Pour chaque cible (e.g., /pa/), quatre triplets sont donc possibles (/pa/-/sa/-/da/ ou /pa/-/sa/-/ga/, ou encore /pa/-/ʃa/-/da/ ou /pa/-/ʃa/-/ga/). Chaque cible apparaissait ainsi 4 fois. Le Tableau IX présente un exemple pour le bloc 2.

Tableau IX : Exemple pour le bloc 2 (la syllabe en gras est la cible).

	Ressemblance de voisement	Ressemblance de mode
Exemple	/pa/ -/sa/	/pa/ -/da/

Dans le bloc 3, le lieu d'articulation est représenté dans l'expérience par trois valeurs pour les consonnes occlusives (bilabiales - /p, b/ ; dentales – (t, d) ; vélaires - /k, g/) et trois valeurs pour les fricatives (labiodentales - /f, v/ ; dentales - /s, z/ ; post-alvéolaires /ʃ, ʃ/). Pour simplifier les analyses, nous avons réparti les consonnes en trois catégories, la première (que nous appellerons désormais *labiale*) rassemble /p, b, f, v/, la deuxième (désormais *dentale*) est composée de /t, d, s, z/ et la troisième (désormais *vélo-palatale*) contient /k, g, ʃ, ʃ/. Pour chaque syllabe-cible (e.g., /za/), deux syllabes-choix sont possibles pour la ressemblance de voisement (e.g., /ba/ ou /ga/) ; en revanche, concernant la ressemblance de lieu, une seule syllabe-choix est possible (e.g., /ta/ pour la cible /za/). Ainsi, pour chaque syllabe-cible (e.g., /za/), deux triplets de syllabes sont possibles (e.g., /za/-/ba/-/ta/ ou /za/-/ga/-/ta/). Dans la liste, chacun de ces triplets était représenté 2 fois, chaque cible apparaissant donc 4 fois. Le Tableau X présente un exemple pour le bloc 3.

Tableau X : Exemple pour le bloc 3 (la syllabe en gras est la cible).

	Ressemblance de voisement	Ressemblance de lieu
Exemple	/za/ -/ba/	/za/ -/ta/

c. Matériel et Procédure. Avant de commencer l'épreuve, les participants ont rempli un formulaire de consentement et la version abrégée du test de latéralité. Ils étaient testés individuellement dans une pièce insonorisée, assis à 57 cm de l'écran d'un ordinateur portable Macintosh iBook.

La syllabe-cible était présentée au centre de l'axe horizontal de l'écran de l'ordinateur, mais dans la partie inférieure de celui-ci, la première syllabe-choix en haut à gauche, et la seconde syllabe-choix en haut à droite. Chaque essai commençait par l'apparition d'un

point de fixation (+) en bas de l'écran, en gras, style Courier, taille 48, pendant 1500 ms. Il était immédiatement remplacé par la syllabe-cible, en style Courier et taille 24, présentée pendant 2000 ms avant l'apparition de la première syllabe-choix, qui apparaissait en haut à gauche de l'écran, en style Courier et taille 24, pendant 2000 ms avant la présentation de la deuxième syllabe-choix, présentée en haut à droite de l'écran, en style Courier et taille 24. A l'apparition de chaque nouvelle syllabe du triplet, la (les) précédente(s) restait(e)s à l'écran. Les trois syllabes restaient à l'écran jusqu'à ce que le participant ait appuyé sur l'une des deux clés de réponse désignées pour choisir entre les deux syllabes-choix celle qui, selon lui, ressemblait le plus à la syllabe-cible du point de vue de la représentation du son qui lui correspondait. Entre la réponse et l'apparition du point de fixation de l'essai suivant s'écoulaient 1500 ms. Dans la version seulement visuelle, il était demandé au participant de lire les syllabes « en les prononçant dans sa tête », de répondre le plus rapidement possible, et de ne se baser que sur la représentation du son. Dans la version audio-visuelle, le participant entendait chacune des syllabes dans un casque au moment où elle apparaissait à l'écran. L'expérience durait 25 minutes pour l'ensemble des trois blocs.

Dans chaque bloc de l'Expérience 6a, les 48 triplets étaient répartis en 4 mini-blocs, comptant chacun 12 essais. L'ordre des mini-blocs dans chaque bloc variait systématiquement entre les participants selon la méthode des carrés latins, et l'ordre des blocs (1,2,3) variait selon cette même méthode tous les 4 participants.

5.1.2. Analyse statistique des résultats

L'analyse des données a été réalisée en trois étapes.

Dans l'expérience, chaque catégorie de traits phonologiques était en concurrence avec deux autres catégories, mais ceci dans des blocs séparés. Par exemple, le mode était en concurrence avec le lieu dans le bloc 1 et avec le voisement dans le bloc 2. Sur l'ensemble des réponses dans ces deux blocs, un test binomial a évalué si le mode était choisi plus fréquemment que le hasard ne permettait de l'attendre ($> 50\%$ des réponses). Ce type de test a été appliqué pour les trois catégories de traits, pour commencer à estimer si les choix favorisaient certaines de ces catégories.

Afin de prendre en compte la variabilité inter-individuelle, et d'obtenir des indices plus précis sur une éventuelle hiérarchie entre les catégories, nous avons traité les données par des analyses de la variance. Les pourcentages de choix ont avant tout fait l'objet d'une transformation $2 * \text{ArcSin} \sqrt{X}$, visant à stabiliser les variances (Winer, Brown & Michels, 1991). Il n'était pas possible de traiter les données des trois blocs en une seule analyse, car les mesures ne sont pas toujours indépendantes. Par exemple, les pourcentages de choix orientés l'un vers le lieu et l'autre vers le mode sont dépendants l'un de l'autre dans une partie de l'expérience (dans le bloc 1). Pour contourner ce problème, nous avons réalisé trois analyses séparées portant chacune sur une seule variable dépendante, par exemple le pourcentage de choix orientés vers le mode, et nous avons comparé des pourcentages issus de blocs distincts, traités par de mêmes participants, mais de manière indépendante. Le facteur était la catégorie de trait concurrente à celle mesurée en variable dépendante. Dans notre exemple, l'analyse du pourcentage de réponses orientées vers le mode opposait deux conditions : celle où la concurrence venait du voisement et celle où elle venait du lieu d'articulation. Les réponses analysées dans ces deux conditions étaient donc bien issues de blocs indépendants, bloc 1 (Mode-Lieu) et bloc 2 (Mode-Voisement). Cela devrait nous renseigner sur la différence de concurrence exercée par le voisement et par le lieu, dans des contextes équivalents puisque, dans les deux cas, il s'agissait d'une concurrence avec le mode. Concrètement, sur l'ensemble des résultats, une analyse permettait ainsi de savoir s'il y avait une différence de concurrence exercée par le voisement et le lieu, une autre analyse comparait les concurrences exercées par le mode et le lieu, et une autre comparait les concurrences exercées par le mode et le voisement. Nous avons estimé la taille de ces différences en calculant les η^2 partiels, avec la formule recommandée par Rosenthal, Rosnow et Rubin (2000). Cela devait permettre de comparer ensuite la taille des différences entre elles, en suivant le principe de Cohen (1988) : la taille de l'effet est petite si $\eta^2 = .01$, moyenne si $\eta^2 = .059$ et grande si $\eta^2 = 0.138$. Selon notre hypothèse d'une attraction forte par le critère de ressemblance de mode, la concurrence exercée par le mode devait être supérieure à celle exercée par le voisement d'une part, mais aussi par le lieu d'autre part ; la comparaison des η^2 partiels pourrait ensuite révéler si cette relation hiérarchique attendue est plus marquée entre le mode et le voisement ou entre le mode et le lieu, les données de la littérature apportant des éléments contradictoires sur ce point. La différence de concurrence exercée par le lieu et le voisement par rapport au mode pourrait aussi apporter des indices à ce sujet.

La troisième phase d'analyse est destinée à décrire plus précisément le type de dominance exercée par chaque catégorie de traits. Si des traits comme occlusif et fricatif, par exemple, représentent la catégorie de mode de manière homogène, on s'attend à ce que des tests binomiaux révèlent que les traits occlusif et fricatif soient l'un et l'autre choisis plus fréquemment que le hasard ne permettrait de l'attendre. Un test de Wilcoxon testera enfin s'il existe ou non une différence entre les choix orientés vers chacun des traits représentant la catégorie, ce test permettant une prise en compte du nombre restreint de participants. Ces analyses nous fourniront des indices sur l'homogénéité des traits dans chaque catégorie étudiée. La dominance d'un choix orienté vers une certaine catégorie, doublée d'une forte homogénéité des traits qui représentent cette catégorie, renforcerait l'idée d'une position élevée de la catégorie elle-même dans la hiérarchie.

5.1.3. Résultats

Les tests binomiaux révèlent tout d'abord que, lorsque la ressemblance de mode est l'une des alternatives, celle-ci est choisie plus fréquemment que l'autre. Cet effet est significatif aussi bien dans la version visuelle (Binomial $< .0001$, $p = .50$) que dans la

version audio-visuelle (Binomial $< .0001$, $p = .50$). Par contre, la ressemblance de lieu et la ressemblance de voisement guident chacune moins fréquemment les choix que les autres types de ressemblance en concurrence, respectivement (Binomial = .0003, $p = .50$ et Binomial $< .0001$, $p = .50$). Nous proposons en Figure 21 une représentation graphique des scores observés, transformés en pourcentages de choix. Ces résultats offrent une première approximation de la hiérarchie entre l'attractivité des trois critères proposés et font essentiellement ressortir la forte attraction exercée par le partage de traits de mode d'articulation comme critère de rapprochement des consonnes. Dans la version visuelle, le lieu d'articulation arrive en seconde position en tant que critère de ressemblance choisi, alors que dans la version audio-visuelle l'avantage du lieu sur le voisement disparaît (Figure 21 bis). L'analyse des données ne saurait cependant se limiter à cela, car la tâche étant toujours un choix forcé entre deux de ces critères, les trois mesures présentées ici ne sont pas indépendantes.

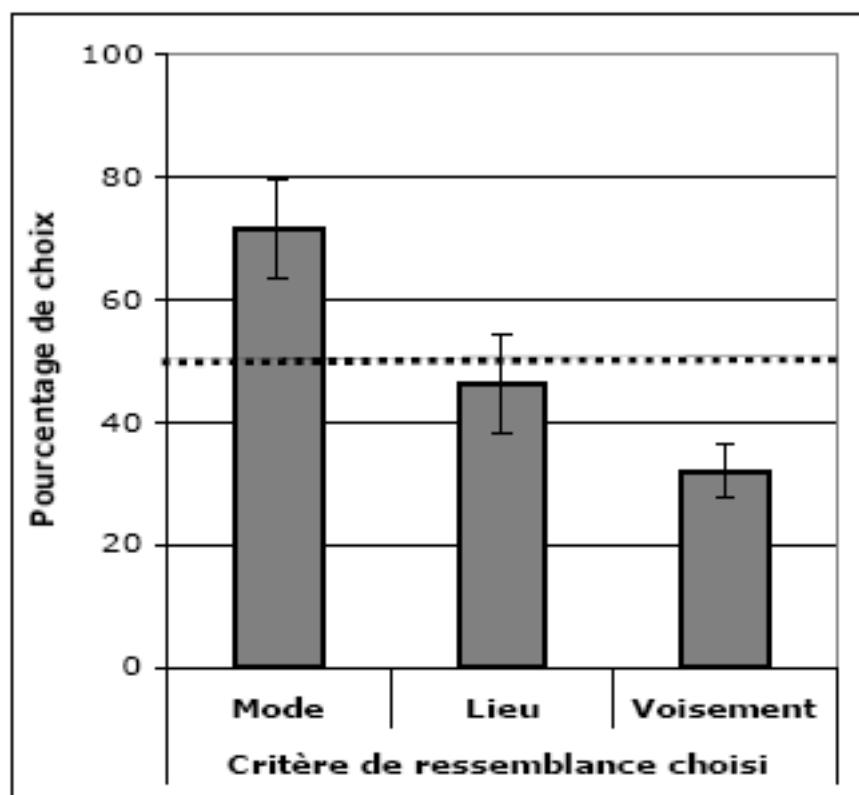


Figure 21 : Pourcentages de choix dont font l'objet chacun des trois critères d'appariement (ressemblance de mode, de lieu ou de voisement) dans l'Expérience 6a. Les pointillés représentent la valeur qu'aurait prédit un choix effectué au hasard (50%). Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95%. (Version visuelle)

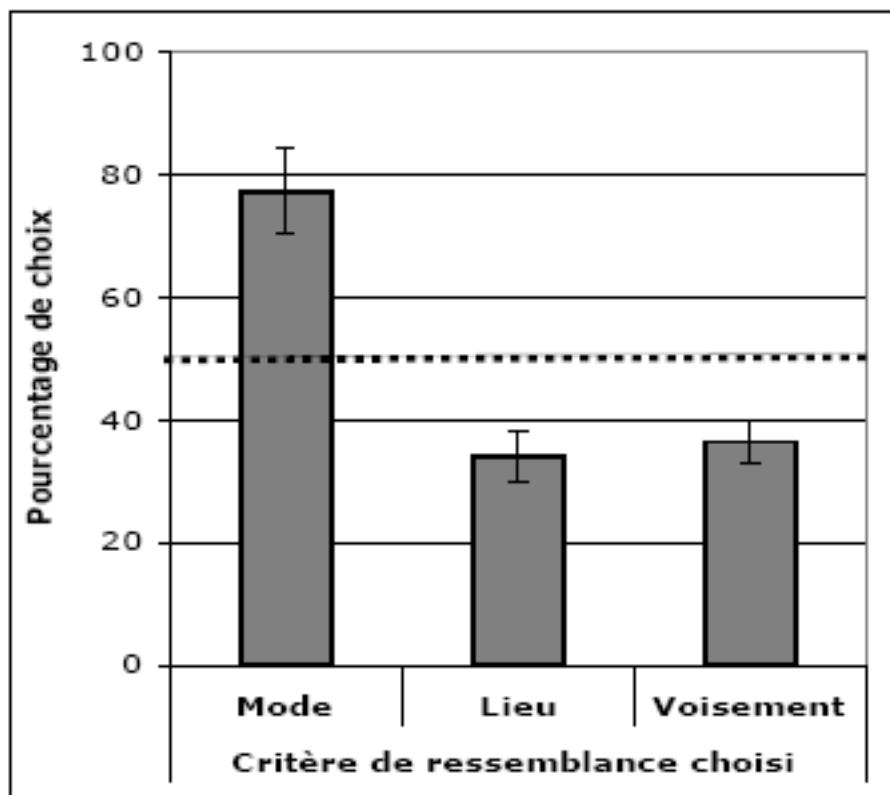


Figure 21 bis : Pourcentages de choix dont font l'objet chacun des trois critères d'appariement (ressemblance de mode, de lieu ou de voisement) dans l'Expérience 6a. Les pointillés représentent la valeur qu'aurait prédit un choix effectué au hasard (50%). Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95%. (Version audio-visuelle)

Une analyse de variance à mesures répétées a été réalisée sur le pourcentage de choix de lieu avec le facteur intra-individuel Concurrence (ressemblance de mode, ressemblance de voisement). Elle nous apprend que, face à la ressemblance de lieu, la concurrence exercée par la ressemblance de mode est plus forte que la concurrence exercée par la ressemblance de voisement, et la taille de cet effet peut être considérée comme grande, $F(1, 23) = 29.08, p < .0001, \eta^2 = 0.56$. L'analyse de variance comparant le pourcentage de choix de ressemblance de voisement selon sa concurrence avec les ressemblances de mode ou de lieu montre que la ressemblance de mode exerce aussi une concurrence plus forte que la ressemblance de lieu. Bien qu'importante, la valeur η^2 révèle que la taille de cet effet est cependant plus petite que celle de l'effet précédent, $F(1, 23) = 13.29, p = .0013, \eta^2 = 0.37$. La présence d'une ressemblance de mode constitue donc pour les participants adultes un concurrent plus attractif qu'une ressemblance de lieu ou de voisement et cette dominance est particulièrement nette par rapport au voisement. Enfin, l'analyse qui compare l'effet de concurrence exercé par les ressemblances de lieu et de voisement sur la ressemblance de mode confirme, par un effet toutefois tout juste significatif, que la ressemblance de lieu constitue un concurrent plus fort que la ressemblance de voisement, $F(1, 23) = 4.25, p = .0507, \eta^2 = 0.16$, ce qui renforce l'idée d'une plus forte attraction des adultes par la ressemblance de lieu que par la ressemblance de voisement. Le Tableau XI (p.157) rappelle, pour les adultes et les enfants, les valeurs des η^2 pour ces trois comparaisons.

Dans l'ensemble, ces premières analyses font donc ressortir une préférence claire pour la ressemblance de mode, la ressemblance de lieu étant quant à elle plus attractive que la ressemblance de voisement. Des analyses complémentaires permettront de détailler le type d'attraction exercé par chaque catégorie de traits.

a) Le mode d'articulation

Le mode est représenté dans l'expérience par les traits occlusif et fricatif. D'une manière générale, que ce soit dans la version visuelle ou dans la version audio-visuelle, le partage du trait occlusif est choisi plus fréquemment comme critère d'appariement que tout autre trait proposé en concurrence (Binomial $< .0001$, $p = .50$), et il en est de même pour le partage du trait fricatif (Binomial $< .0001$, $p = .50$), comme le montre la Figure 22. Le test de Wilcoxon ne montre pas de différence entre les pourcentages de choix de mode dans les cas où il est représenté par le trait occlusif ou fricatif, $T = -0.03$, $p = .97$.

Des tests binomiaux réalisés indépendamment par bloc, et pour chacune des versions, révèlent que l'attraction pour la ressemblance de mode est plus marquée que celle qu'exerce le partage du lieu (bloc Mode-Lieu, Binomial $< .0001$, $p = .50$) ou du voisement (bloc Mode-Voisement, Binomial $< .0001$, $p = .50$), et cette préférence pour le mode est plus marquée en concurrence avec le voisement qu'en concurrence avec le lieu, $T = -2.30$, $p = .02$ (Figure 23). Pour affiner l'analyse, les pourcentages de choix orientés par le partage du trait occlusif, d'une part, et fricatif, d'autre part, sont comparés séparément au pourcentage de choix orientés par le partage du lieu et au pourcentage de choix orientés par le partage du voisement. La Figure 23 montre que le pourcentage de réponses guidées par le partage du trait occlusif est significativement plus élevé que le pourcentage de réponses guidées par le partage du lieu, ou le partage du voisement, (Binomial $< .0001$, $p = .50$, dans les deux cas). Il en est de même pour le trait fricatif (Binomial $< .0001$, $p = .50$, dans les deux cas). De plus, les tests de Wilcoxon ne font ressortir aucune différence significative entre les pourcentages de réponses orientées par le partage des traits occlusif et fricatif, que ce soit en opposition à une ressemblance de lieu ou de voisement. Ces indices plaident en faveur d'une homogénéité des réponses guidées par la ressemblance de mode, que ce type de trait soit représenté par des couples de consonnes occlusives ou fricatives.

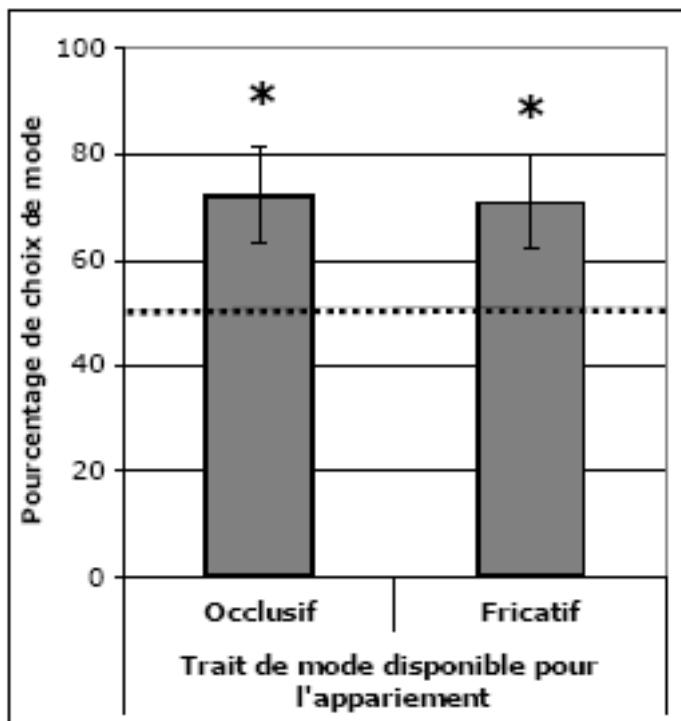


Figure 22 : Pourcentages de choix de ressemblance de mode pour appairer, quand le mode est représenté par le trait occlusif ou fricatif. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. Les étoiles représentent les pourcentages qui se différencient du hasard. (Version visuelle)

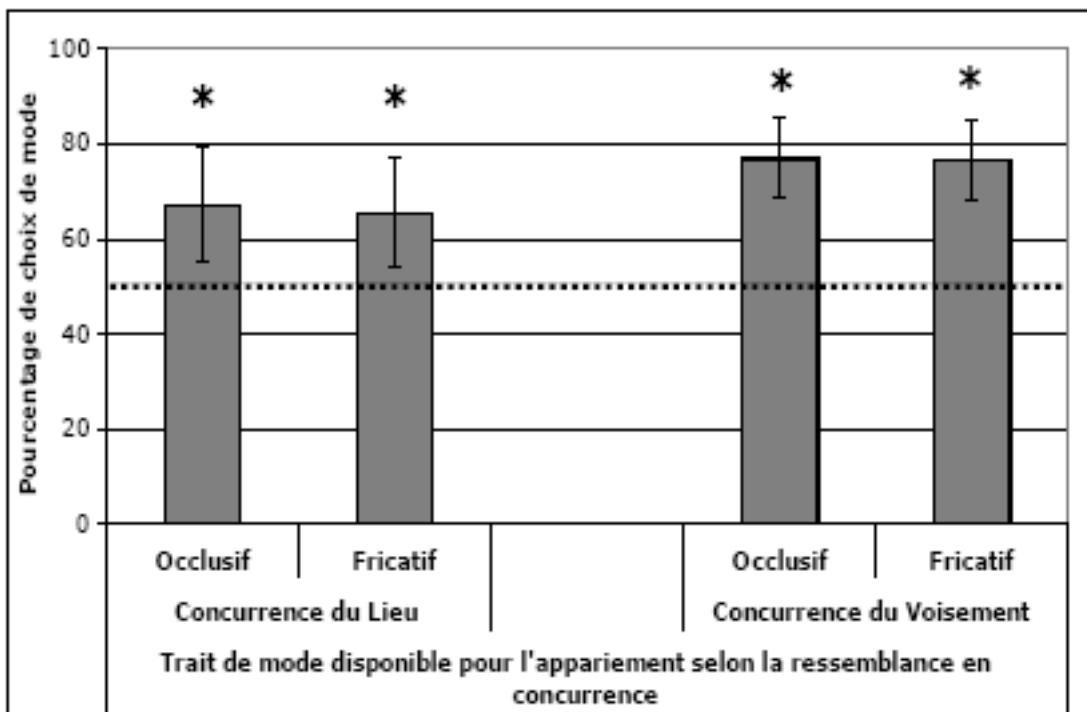


Figure 23 : Pourcentages de choix de ressemblance de mode comme critère d'appariement quand le mode est représenté par le trait occlusif ou fricatif, quand

la concurrence vient d'une ressemblance de lieu (à gauche) ou de voisement (à droite). Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. Les étoiles représentent les pourcentages qui se différencient du hasard. (Version visuelle)

La Figure 24 montre que la préférence pour la ressemblance de mode plutôt que de voisement est significative quand la ressemblance concurrente est le partage du trait sourd (Binomial $< .0001$, $p = .50$) ou du trait sonore (Binomial $< .0001$, $p = .50$), cette préférence pour le mode étant toutefois moins marquée quand elle s'oppose à une ressemblance sur le trait sonore plutôt que sourd, $T = -2.50$, $p = .0123$ dans la version visuelle, et $T = -2.33$, $p = .0230$ dans la version audio-visuelle. Ce point, qui suggère une attraction plus forte par le partage du trait sonore plutôt que sourd, sera repris dans la discussion sur la faible homogénéité des traits sourd et sonore pour représenter la catégorie voisement.

Lorsqu'elle est en concurrence avec une ressemblance de lieu, la ressemblance de mode est par contre préférée, que la ressemblance en concurrence permette de rapprocher deux consonnes labiales (Binomial $< .0001$, $p = .50$), deux dentales (Binomial $< .0001$, $p = .50$) ou deux vélo-palatales, (Binomial $< .0001$, $p = .50$), et aucune différence n'apparaît entre ces trois conditions (Figure 25), aussi bien dans la version visuelle que dans la version audio-visuelle.

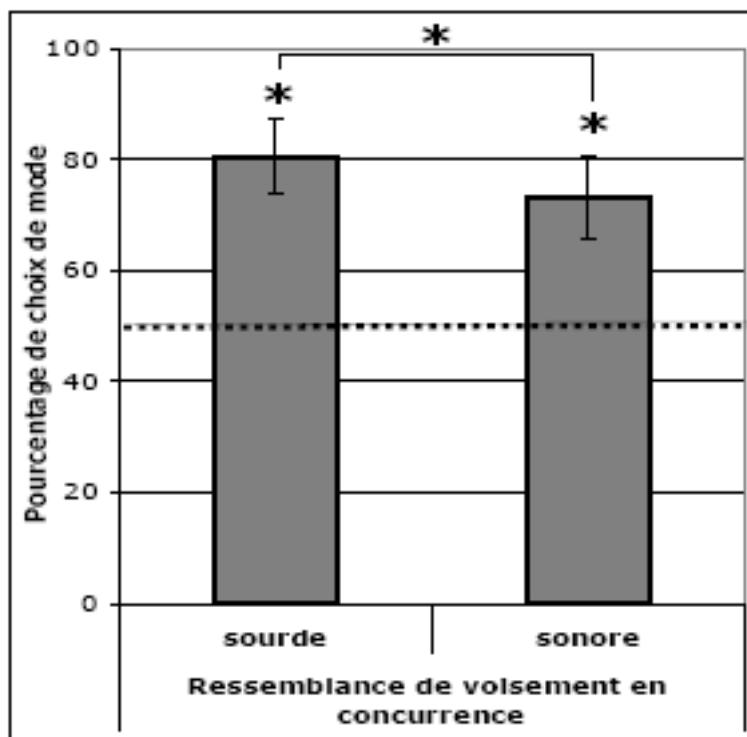


Figure 24 : Pourcentages de choix de ressemblance de mode pour apparier quand ce trait est en concurrence avec la ressemblance de voisement représentée par les traits sourd et sonore. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. Les étoiles représentent les pourcentages différents du hasard. (Version visuelle)

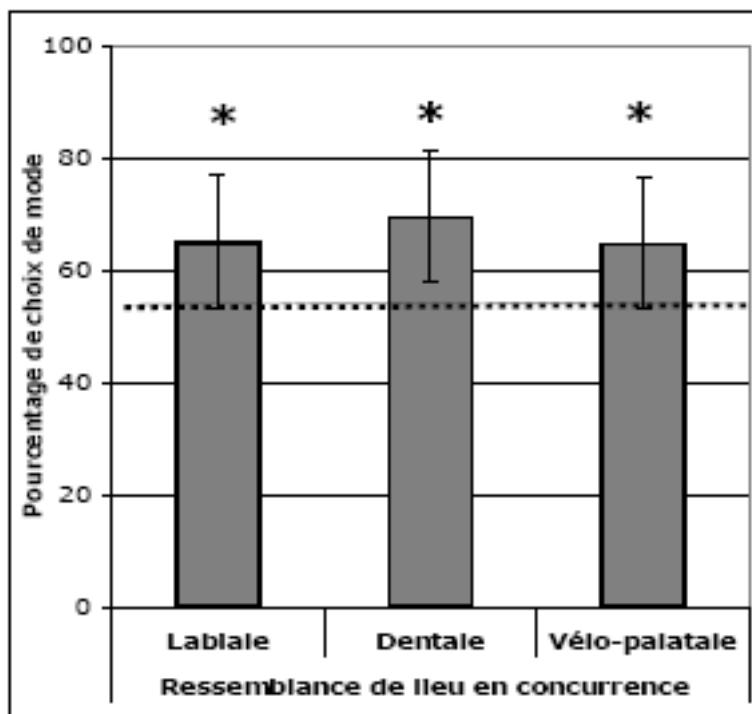


Figure 25: Pourcentages de choix de ressemblance de mode pour apparier quand ce trait est en concurrence avec la ressemblance de lieu représentée par le trait labial, dental ou vélo-palatal. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. Les étoiles représentent les pourcentages différents du hasard. (Version visuelle)

b) Le lieu d'articulation

D'après les tests binomiaux, la ressemblance sur chacun des traits de lieu considérés individuellement n'est jamais la plus choisie, quand les concurrents sont considérés dans leur ensemble. Par ailleurs, comme l'illustre la Figure 26, les trois traits de lieu ne se distinguent pas les uns des autres quant à leur attractivité et les tests de Wilcoxon ne font ressortir aucune différence significative entre les pourcentages de choix qu'ils suscitent : ils semblent en cela représenter la catégorie de lieu de manière relativement homogène.

La préférence pour le lieu d'articulation est plus forte quand elle est en concurrence avec le voisement qu'avec le mode, $T = -3.70$, $p = .0002$. Cette disproportion s'explique sans doute par la très forte attraction exercée par le mode, que le lieu soit représenté par les traits labial, dental ou vélo-palatal (voir Figure 27, panel de gauche, et Figure 27 bis, panel de gauche) ou que le mode soit représenté par le trait occlusif ou fricatif (voir Figure 28) dans les deux versions visuelle et audio-visuelle.

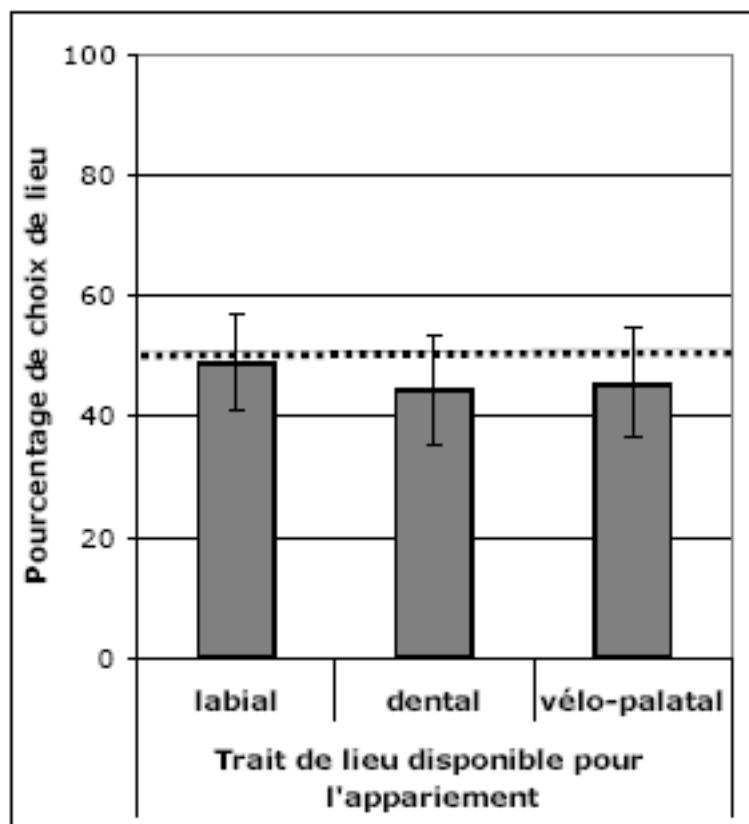


Figure 26 : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu pour appairer, quand le lieu est représenté par le trait labial, dental ou vélo-palatal. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. (Version visuelle)

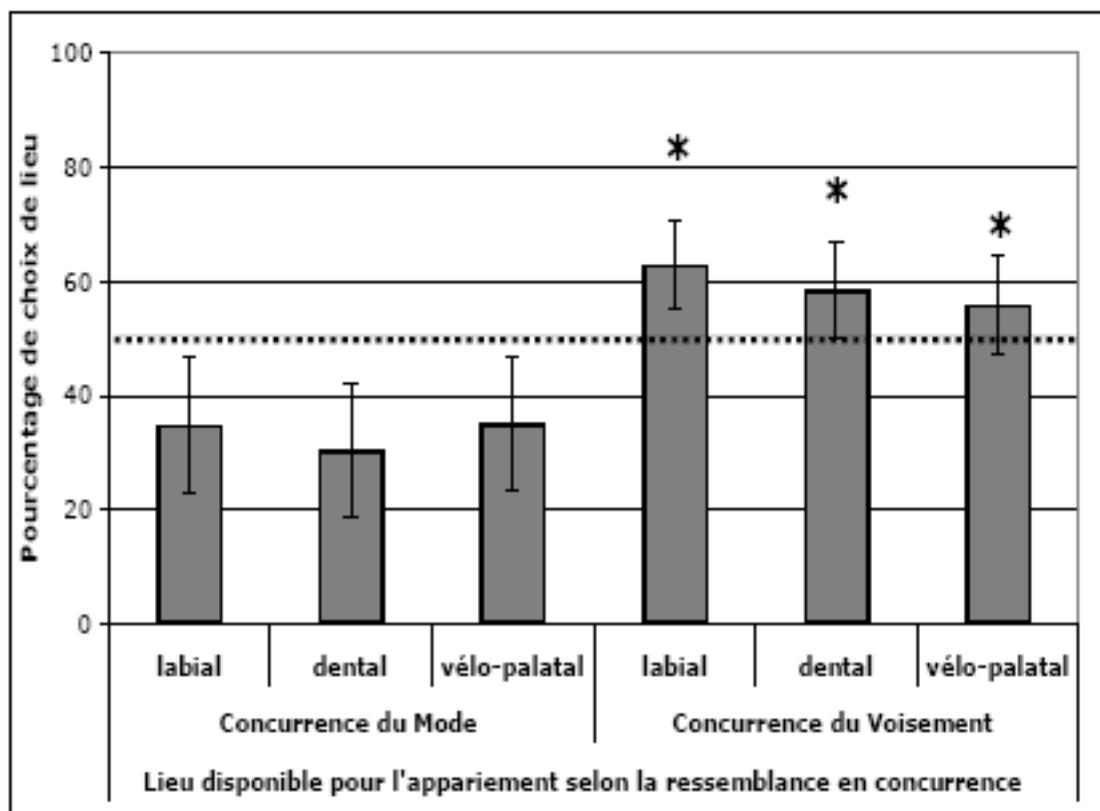


Figure 27 : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu pour appairer, quand il est représenté par le trait labial, dental ou vélo-palatal, lorsque la concurrence vient d'une ressemblance de mode (à gauche) ou de voisement (à droite). Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. Les étoiles représentent les pourcentages supérieurs au hasard. (Version visuelle)

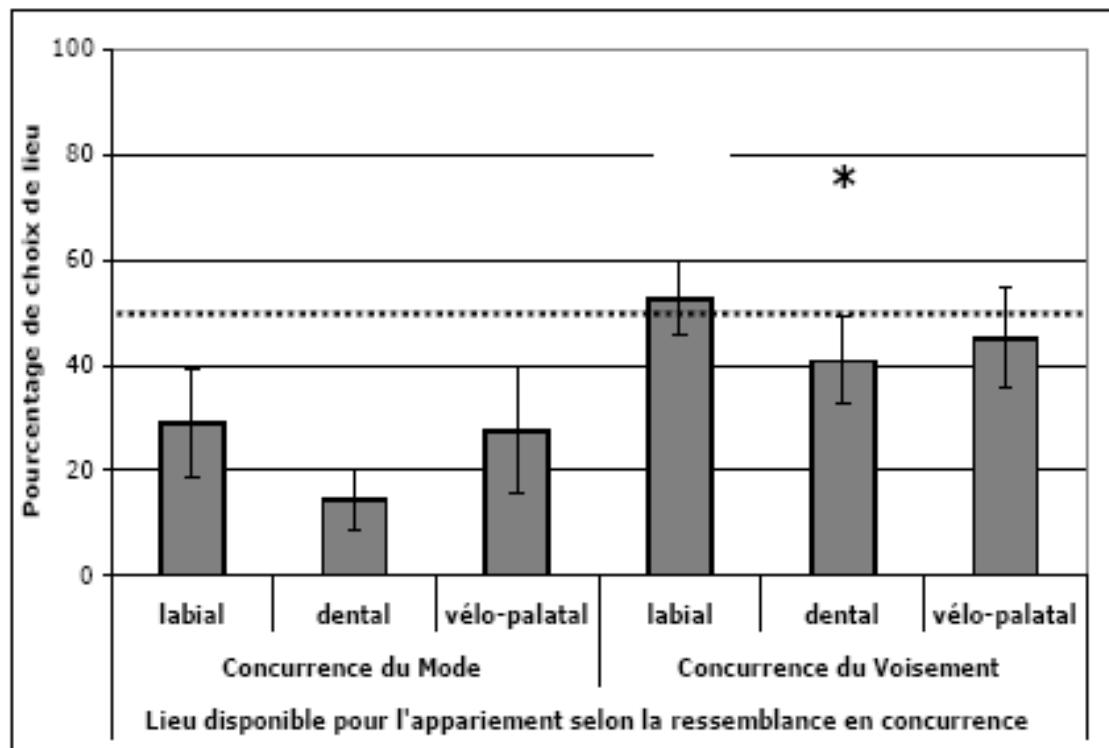


Figure 27 bis : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu pour apparier, quand il est représenté par le trait labial, dental ou vélo-palatal, quand la concurrence vient d'une ressemblance de mode (à gauche) ou de voisement (à droite). Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. L'étoile représente les pourcentages différents du hasard. (Version audio-visuelle)

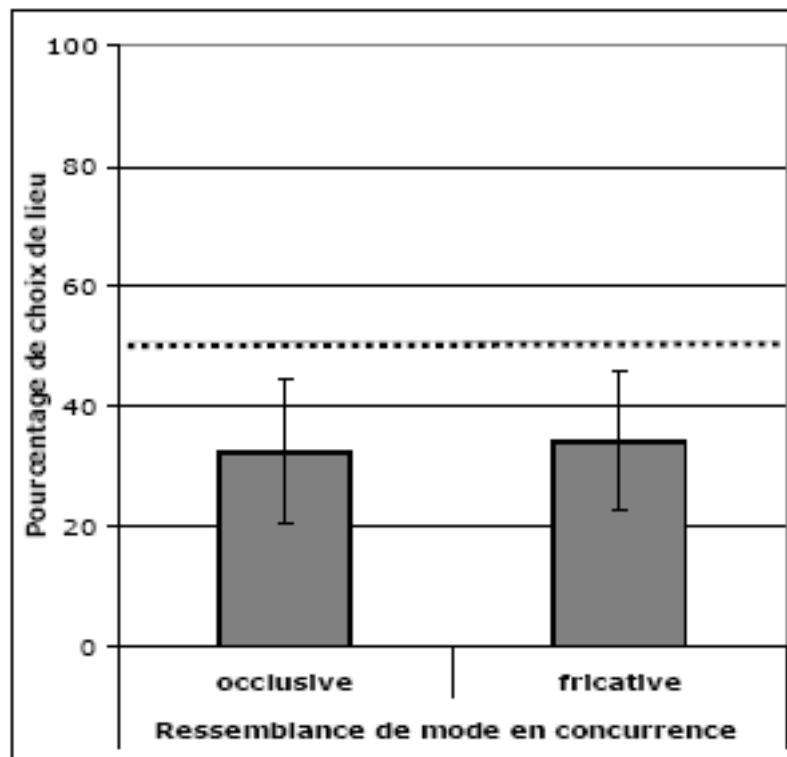


Figure 28 : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu pour appairer quand ce trait est en concurrence avec la ressemblance de mode représentée par le trait occlusif ou fricatif. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. (Version visuelle)

Toutefois, la ressemblance de lieu attire plus de choix que la ressemblance de voisement dans la version visuelle (bloc Voisement-Lieu, Binomial $< .0001$, $p = .50$). Dans cette dernière opposition entre lieu et voisement, la Figure 27 montre que la ressemblance entre deux consonnes labiales est plus attractive que la ressemblance de voisement (Binomial $< .0001$, $p = .50$), c'est aussi le cas pour la ressemblance entre deux dentales (Binomial $= .0004$, $p = .50$), ou entre deux vélo-palatales (Binomial $< .0108$, $p = .50$). Les différences observées sur la Figure 27 suggèrent que les choix dans la version visuelle sont d'autant plus orientés vers la ressemblance de lieu que ce lieu est antérieur, mais la différence entre les pourcentages de réponses guidées par les traits labial et vélo-palatal n'atteint toutefois pas le seuil de significativité. En revanche, dans la version audio-visuelle, la ressemblance de lieu n'attire pas plus de choix que la ressemblance de voisement (bloc Voisement-Lieu, Binomial $= .21$, $p = .50$). Au contraire, la Figure 20 bis montre que la ressemblance de voisement est plus attractive que la ressemblance entre deux consonnes dentales (Binomial $= .0005$, $p = .50$). Pour les deux autres traits de lieu (labial et vélo-palatal), il n'y a pas de préférence significative pour le lieu ou pour le voisement. Les différences observées sur la Figure 20 bis suggèrent que les choix des participants dans la version audio-visuelle sont d'autant plus orientés vers la ressemblance de voisement que ce lieu est dental, mais la différence entre les pourcentages de réponses guidées par les traits labial et dental, ou dental et vélo-palatal n'atteint toutefois pas le seuil de significativité.

Enfin, la préférence pour la ressemblance de lieu plutôt que de voisement est significative aussi bien quand le voisement est représenté par le trait sonore (Binomial $= .0055$, $p = .50$) que par le trait sourd (Binomial $< .0001$, $p = .50$) dans la version visuelle,

et il n'y a pas de différence significative entre ces deux cas, $T = -1.55$, $p = .12$ (Figure 29). En revanche, dans la version audio-visuelle, le lieu a tendance à être préféré au voisement seulement lorsque le voisement est représenté par le trait sourd (Binomial = .0880, $p = .50$), alors que le voisement est préféré au lieu lorsqu'il s'agit du trait sonore (Binomial = .0002, $p = .50$), comme le montre la Figure 29 bis. Il y a de plus une différence significative entre les deux traits de voisement, $T = -2.42$, $p = .0185$.

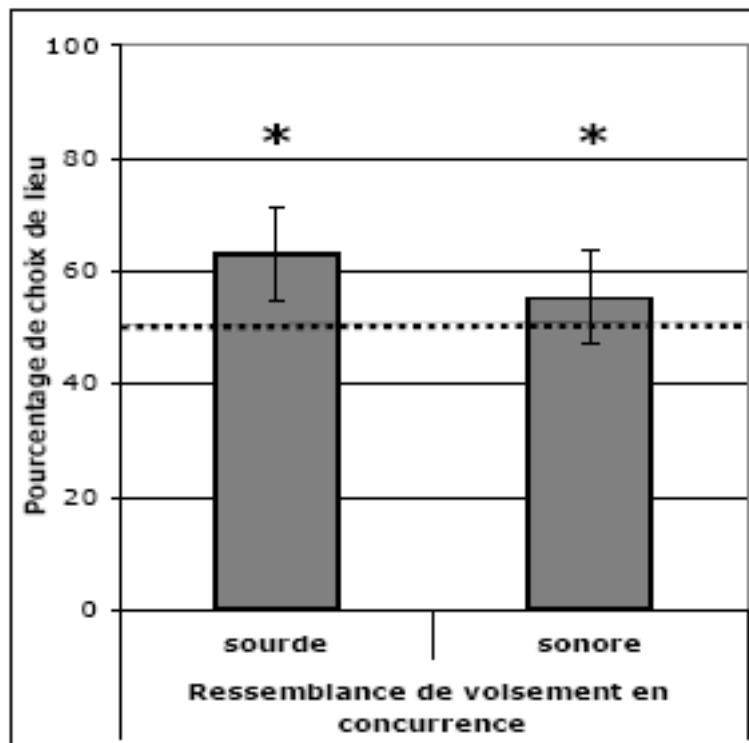


Figure 29 : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu comme critère d'appariement quand ce trait est en concurrence avec la ressemblance de voisement représentée par les traits sourd et sonore. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. Les étoiles représentent les pourcentages qui se différencient du hasard. (Version visuelle)

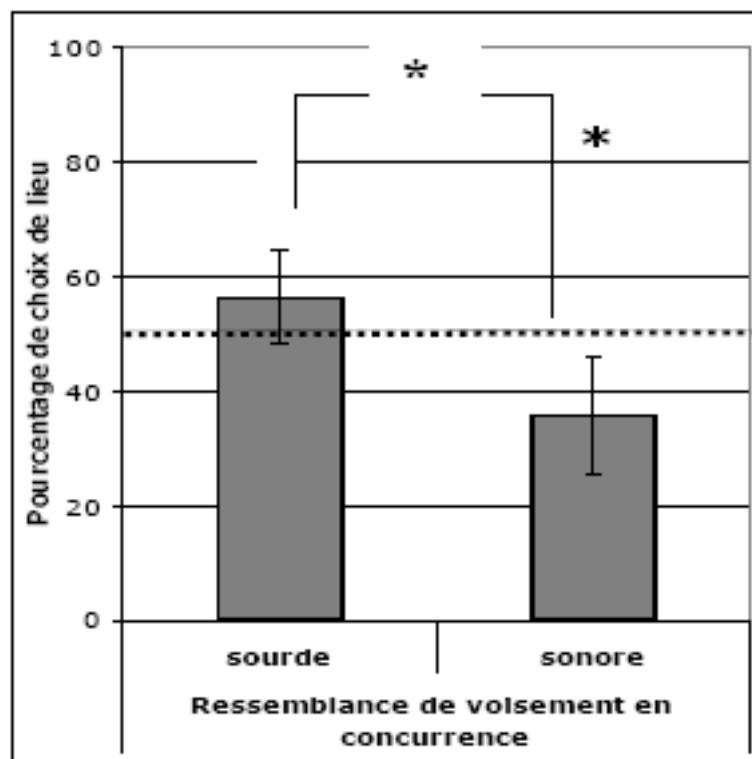


Figure 29 bis : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu comme critère d'appariement quand ce trait est en concurrence avec la ressemblance de voisement représentée par les traits sourd et sonore. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. Les étoiles représentent les pourcentages qui se diffèrent du hasard. (Version audio-visuelle)

En bref, dans la version visuelle, la ressemblance de lieu est traitée de façon relativement homogène, quel que soit le trait qui représente cette catégorie : elle semble avoir un statut intermédiaire entre la position élevée du mode et celle du voisement. Dans la version audio-visuelle, la catégorie de lieu semble également assez homogène ; en revanche, elle n'occupe pas vraiment de statut intermédiaire entre le mode, qui est toujours au sommet des choix, et le voisement qui occupe une place plus importante dans cette modalité audio-visuelle. En condition audio-visuelle, la différence entre les statuts du lieu et du voisement s'estompe.

c) Le voisement

Il est représenté par les traits sourd et sonore. D'une manière générale, le partage du trait de voisement est moins utilisé comme critère d'appariement que l'ensemble des autres critères, que les consonnes soient sonores ou sourdes, comme le montre la Figure 30, bien que le partage du trait sonore attire plus de choix que le partage du trait sourd dans les deux versions visuelle et audio-visuelle, respectivement $T = -2.09$, $p = .0367$ et $T = -2.15$, $p = .0320$. Cette différence entre l'attractivité des traits sourd et sonore est observée sur la Figure 31 en concurrence avec le mode comme avec le lieu, bien qu'elle soit significative seulement dans son opposition avec le mode, $T = -2.58$, $p = .0123$. Les autres comparaisons ne sont pas représentées graphiquement, car la partie droite de la Figure 23 montrait déjà que le partage du voisement avait peu de succès face au partage du mode, que le mode soit représenté par le trait occlusif ou fricatif, et la partie droite de la Figure 27 montrait

aussi que le voisement était moins choisi que le lieu dans la version visuelle, que celui-ci soit représenté par le trait labial, dental ou vélo-palatal. Toutefois, dans la version audio-visuelle, si le voisement a toujours peu de succès par rapport au mode en terme de choix (aussi bien pour le trait sourd que pour le trait sonore), il est plus choisi que le lieu lorsque la ressemblance de voisement est basée sur le trait sonore : Binomial = .0002, $p = .50$ (Figure 31 bis).

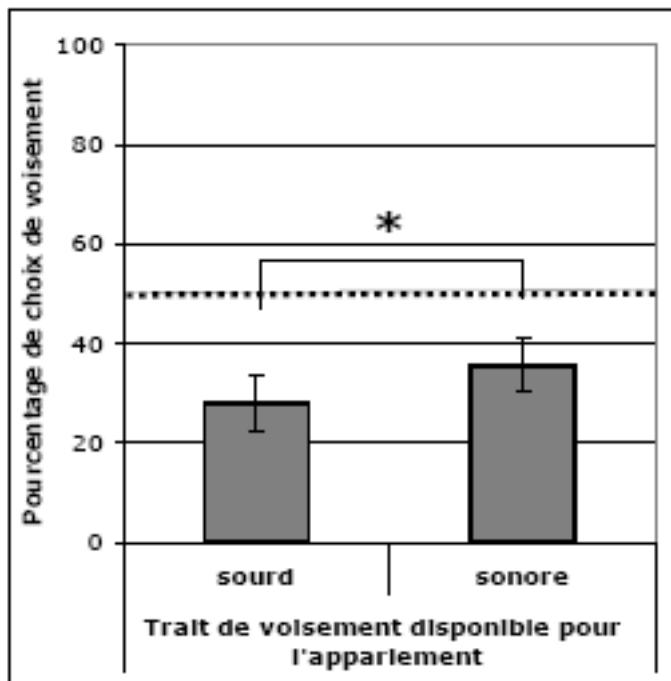


Figure 30 : Pourcentages de choix de ressemblance de voisement pour appairer quand il est représenté par le trait sourd ou sonore. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. (Version visuelle)

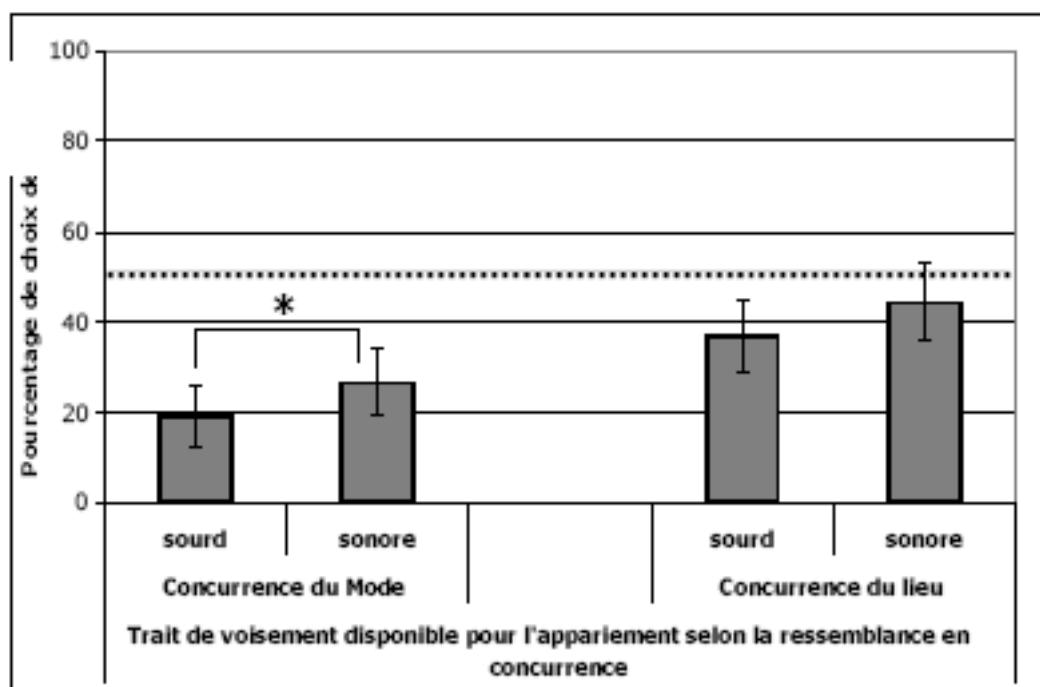


Figure 31 : Pourcentages de choix de ressemblance de voisement comme critère d'appariement quand il est représenté par le trait sourd ou sonore, lorsque la concurrence vient d'une ressemblance de mode (à gauche) ou de lieu (à droite). Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. (Version visuelle)

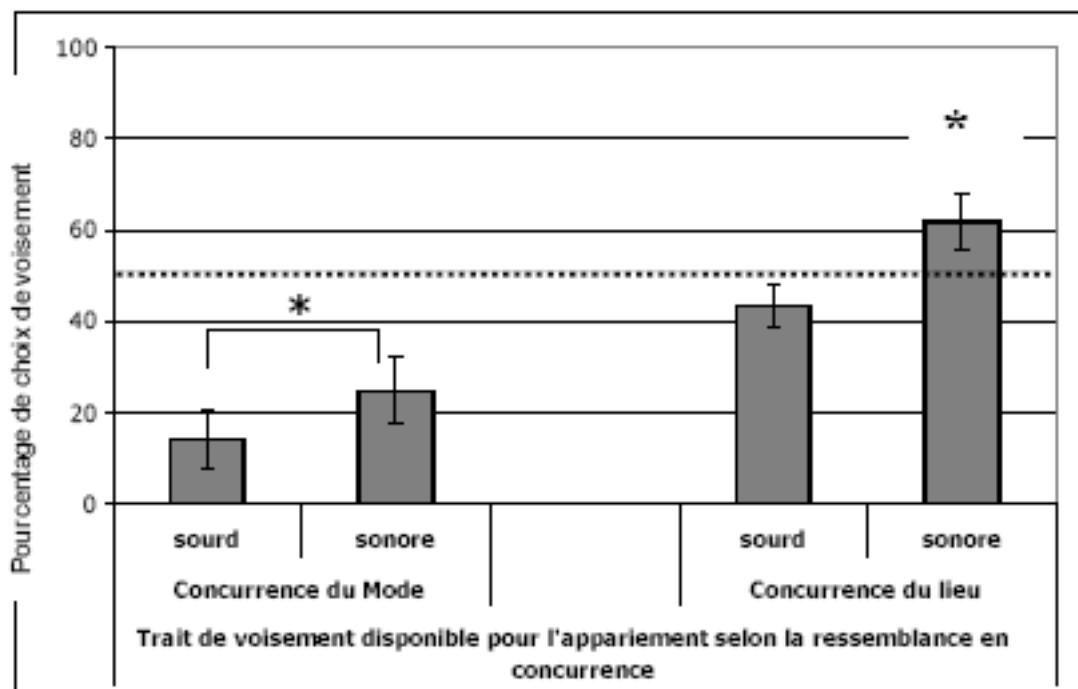


Figure 31 bis : Pourcentages de choix de ressemblance de voisement comme critère d'appariement quand il est représenté par le trait sourd ou sonore, lorsque la

concurrence vient d'une ressemblance de mode (à gauche) ou de lieu (à droite). Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95%. (Version audio-visuelle)

5.1.4. Discussion des résultats chez les adultes

L'objectif de cette expérience était d'obtenir des indices au sujet d'une éventuelle hiérarchie dans l'importance accordée à trois types de traits (mode, lieu d'articulation et voisement). Nous avons pour cela estimé les préférences pour différents types de ressemblance entre les représentations phonologiques générées par les participants à partir de consonnes écrites. Ces participants étaient choisis pour ne pas avoir de connaissances dans les disciplines phonologie et phonétique, afin d'évaluer le rôle d'une éventuelle organisation implicite des types de traits. Dans le plan de l'expérience, nous avons privilégié l'évaluation de toutes les comparaisons de manière intra-individuelle, et chaque participant a répondu à trois blocs opposant chacun deux types de traits. L'opposition directe des trois catégories de traits aurait induit une tâche qui nous semblait très difficile, en particulier pour les enfants et les patients qu'il était envisagé de tester. La série d'oppositions entre les catégories de traits considérés deux à deux ne permet en revanche qu'une estimation indirecte d'une organisation entre ces catégories, et nous avons proposé d'accumuler une série d'indices, issus de plusieurs analyses, pour mieux comprendre comment chacune des trois catégories de traits testées trouve sa place dans une hiérarchie.

Le point le plus marquant dans les résultats des adultes est le privilège accordé à la ressemblance de mode d'articulation entre les consonnes des syllabes CV présentées, que ce soit en modalité visuelle ou en modalité audio-visuelle. Cela conduit à proposer de placer ce type de trait au sommet de la hiérarchie des catégories étudiées. A l'issue de notre expérience, plusieurs arguments peuvent en effet être avancés au sujet de ce statut privilégié. Tout d'abord, d'après les tests binomiaux appliqués au niveau le plus général, comme indépendamment dans les blocs Mode-Lieu et Mode-Voisement, les choix d'appariement de syllabes se sont fait plus fréquemment en fonction du mode qu'en fonction de l'ensemble des autres critères proposés en concurrence. De plus, la concurrence exercée par la présence d'une ressemblance de mode est toujours plus forte que celle qu'exerce le partage de tout autre trait. Les deux autres catégories de traits sont choisies moins fréquemment que le hasard ne permettrait de le prédire, ce qui souligne encore l'importance accordée implicitement à la ressemblance de mode dans cette expérience. De plus, le privilège accordé à la ressemblance de mode se reflète de façon homogène dans les choix d'appariement conduisant à rapprocher aussi bien deux consonnes occlusives que deux consonnes fricatives. Ces deux traits sont traités dans l'expérience avec une importance qui ne diffère jamais, même lorsqu'elle est examinée en détail dans chacun des blocs, ce qui plaide en faveur d'une catégorie de mode cohérente. La prédominance du mode sur le lieu et le voisement retrouvée dans cette expérience est en accord avec les modèles plaçant le mode au sommet d'une hiérarchie de catégories de traits dans la mesure où il définit la représentation d'un segment à l'intérieur d'une syllabe (Van der Hulst, 2005), et dans la mesure où il sert de base, en tant que trait « articulator-free », à la discrimination des traits « articulator-bound » que sont le lieu et le voisement (Stevens, 2002). Nos résultats sont également cohérents avec ceux d'autres travaux où le mode est montré comme étant une catégorie de trait plus importante que le lieu et le voisement pour juger de la similarité de syllabes (Peters, 1963), mais aussi où la ressemblance de mode entre des paires de mots conduit à l'effet le plus négatif sur les latences de production de parole (Rogers & Storkel, 1998).

Des rapports hiérarchiques se profilent aussi entre les traits de lieu et de voisement, qui ne prennent cependant jamais le pas sur les traits de mode. Plusieurs indices suggèrent que le partage du trait de lieu est un critère plus suivi que le partage du trait de voisement pour la tâche d'appariement de consonnes lorsque la modalité de présentation est seulement visuelle. Ce résultat est en accord avec les données de Hebben (1986), qui montre que le lieu d'articulation aurait un statut plus important que le voisement. En présence d'une ressemblance de mode, la ressemblance de lieu exerce une attraction plus importante que la ressemblance de voisement. Lorsque les ressemblances de lieu et de voisement sont directement comparées dans le bloc Voisement-Lieu, les adultes effectuent davantage d'appariements selon le lieu. Cette préférence ne s'explique pas par un trait de lieu en particulier, qu'il soit labial, dental ou vélo-palatal. Bien qu'elle soit moins marquée que la préférence pour le mode, notamment selon les indications fournies par la comparaison de la taille des effets, la préférence pour la ressemblance de lieu plutôt que de voisement se dessine donc à travers les résultats des adultes en modalité visuelle. Ces résultats sont en contradiction avec certaines données de la littérature accordant un statut important au voisement, comme les travaux de Miller et Nicely (1955) qui montrent la robustesse du voisement en perception de parole dans le bruit, ou encore ceux de Peters (1963) et Jaeger (1992) qui mettent en évidence le rôle primordial du voisement respectivement en jugement de similarité et dans les productions d'enfants où les erreurs de substitution de lieu sont les erreurs de « langue qui a fourché » les plus fréquentes. Néanmoins, les données de la littérature concernant le poids des catégories de lieu et de voisement sont encore équivoques. En effet, Miceli et al. (1978) montrent que les participants sont plus sensibles au lieu qu'au voisement dans des tâches de discrimination en perception de parole, alors que des tâches de jugement de similarité de paires de consonnes ont montré que le voisement contribuait soit également (Perecman et Kellar, 1981) soit davantage à ce jugement que le lieu (Peters, 1963). Ces résultats controversés sont certainement en lien avec le type de tâche demandée. Dans notre tâche proposée ici, les résultats à propos du lieu et du voisement varient en fonction de la modalité de présentation (visuelle ou audio-visuelle).

En effet, en modalité audio-visuelle, le lieu perd de son attractivité par rapport au voisement : les rapports hiérarchiques entre voisement et lieu sont moins évidents qu'en modalité purement visuelle. Cette perte d'attractivité du lieu se fait au profit du voisement, en particulier lorsque le trait est sonore. Cela suggère que les rapports hiérarchiques entre le lieu et le voisement ne sont pas complètement stables, en tout cas moins nettement que pour le mode qui apparaît clairement au sommet de la hiérarchie.

Les données de l'Expérience 6a apportent donc des arguments favorables à notre hypothèse (hypothèse 13) concernant l'organisation cognitive des traits en catégories et permettent de tracer les premières lignes d'une hiérarchie. Elles apportent la preuve du statut prédominant du mode pour guider intuitivement les réponses dans une tâche d'appariement de syllabes écrites, à la fois en versions visuelle et audio-visuelle. Le voisement et le lieu semblent jouer un rôle secondaire, avec une attractivité un peu plus importante pour le lieu. Nous pensons que ces catégories de traits phonologiques se construisent peu à peu avec le niveau scolaire chez les enfants normo-lecteurs, et qu'une telle hiérarchie se met progressivement en place. Les enfants avec trouble d'apprentissage de la lecture, ici dyslexiques, pourraient présenter des anomalies dans l'organisation de ces catégories de traits.

5.2. Organisation hiérarchique des catégories de traits chez les enfants avec ou sans trouble d'apprentissage de la lecture : Expérience 6b

Les enfants normo-lecteurs et dyslexiques ont passé exactement la même expérience que les adultes, seulement en version visuelle pour les enfants dyslexiques et les enfants normo-lecteurs de CE1, ceux de CE2 passant les deux versions. L'Expérience 6b vise à étudier d'une part la mise en place progressive d'une hiérarchie de catégories de traits comme critère organisateur des consonnes, telle que nous l'avons suggérée chez l'adulte à partir des résultats de l'Expérience 6a. Nous faisons l'hypothèse (hypothèse 14) que les jeunes lecteurs ne possèdent pas d'emblée une telle hiérarchie, et qu'il est possible d'assister à sa mise en place chez des apprentis-lecteurs sans difficulté particulière. Notre hypothèse opérationnelle est que, dans une tâche d'appariement de syllabes écrites CV, la configuration de résultats, compatible avec l'existence d'une hiérarchie de catégories de traits comme critère organisateur des consonnes (i.e., prépondérance de la catégorie mode, et préférence du lieu d'articulation par rapport au voisement) apparaît progressivement et évolue pendant les deux années de cours élémentaire.

D'autre part, cette Expérience 6b a pour objectif de mettre en évidence et de mieux comprendre les anomalies des traitements phonologiques des enfants dyslexiques, et de préciser les éventuelles spécificités de l'organisation des catégories de traits phonologiques par rapport à celles d'enfants ne présentant pas leurs difficultés. Nous faisons l'hypothèse que les enfants dyslexiques présentent une organisation des trois catégories de traits phonologiques (mode d'articulation, lieu d'articulation et voisement) différente de celle des enfants normo-lecteurs, mais surtout différente en fonction du type de dyslexie (hypothèse 14). Nous opérationnaliserons ceci en comparant les résultats dans l'épreuve d'appariement de syllabes écrites d'enfants dyslexiques avec troubles phonologiques et d'enfants dyslexiques sans troubles phonologiques, appariés deux à deux en âges chronologique et lexique.

5.2.1. Méthode

a. Participants. 30 enfants normo-lecteurs de CE1 et de CE2 (10 de chaque niveau pour la version visuelle et 10 enfants de CE2 supplémentaires pour la version audio-visuelle) scolarisés dans une école lyonnaise⁴ ont participé à cette expérience (CE1 : 50% garçons et 50% filles ; âge moyen = 7 ans 7 mois, écart-type = 5 mois ; CE2 : 70% garçons et 30% filles ; âge moyen = 8 ans 11 mois, écart-type = 6 mois). Tous ont rempli une version abrégée du test de latéralité manuelle Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) : nous n'avons gardé que les droitiers dont le degré de latéralité est supérieur à 75% (CE1 : indice moyen de latéralité manuelle = 91%, écart-type = 12% ; CE2 : moyenne = 92%, écart-type = 7%). Tous étaient de langue maternelle française et avaient une vue normale avec ou sans correction.

La passation individuelle de l'expérience était précédée de la passation individuelle d'un test de lecture, l'Alouette (Lefavrais, 1965) permettant d'évaluer leur âge lexique (CE1 : âge lexique moyen = 7 ans 3 mois, écart-type = 4 mois ; CE2 : âge lexique moyen = 8 ans 4 mois, écart-type = 5 mois). Aucun enfant retenu pour l'expérience ne présentait un retard ni une avance de plus de 15 mois par rapport à son âge chronologique.

De plus, 31 enfants dyslexiques ont participé à cette expérience (68% de garçons, 32% de filles ; âge chronologique moyen = 10 ans 11 mois, écart-type = 1 an 4 mois). Ces

⁴ Ecole primaire publique Jean Moulin, Caluire (69).

enfants étaient testés à l'Hôpital Debrousse⁵ dans le cadre d'un programme de recherche et d'un bilan neuropsychologique pour lesquels ils étaient convoqués une demi-journée. Tous étaient de langue maternelle française et avaient, avec ou sans correction, une vue normale. 85% d'entre eux étaient droitiers et 15% gauchers (indice moyen de latéralité manuelle = 84%, écart-type = 23%).

Ces enfants ont passé les mêmes tests de lecture (âge lexique moyen = 7 ans 11 mois ; écart-type moyen = 10 mois), et de latéralité manuelle que les enfants normo-lecteurs. Ils ont également été soumis à un bilan complet de lecture et d'écriture permettant de diagnostiquer le type de dyslexie. Ce bilan comportait une dictée de mots et non-mots, une épreuve de lecture de mots et non-mots, 7 épreuves de conscience phonologique (extraites de l'Odedys et du BALE, Laboratoire Cogni-Sciences et Apprentissages – IUFM Grenoble, 1999), et une à trois épreuves visuo-attentionnelles (Valdois et al., 2003).

Parmi les 31 enfants dyslexiques testés, 12 présentaient une dyslexie avec troubles phonologiques, et 19 une dyslexie sans troubles phonologiques (dyslexie de surface). Parmi eux, 10 avec troubles phonologiques et 10 sans troubles phonologiques ont été appariés deux à deux en âges chronologique et lexique (enfants avec troubles phonologiques : âge chronologique moyen = 11 ans 4 mois, âge lexique moyen = 7 ans 10 mois ; enfants sans troubles phonologiques : âge chronologique moyen = 10 ans 10 mois, âge lexique moyen = 8 ans).

b. Stimuli, Matériel et Procédure. La liste expérimentale, le matériel et la procédure étaient les mêmes que ceux de l'Expérience 6a. Chaque enfant normo-lecteur passait l'expérience individuellement pendant le temps scolaire, mais en dehors de la classe dans une pièce isolée et calme. Chaque enfant dyslexique passait à l'hôpital individuellement cette Expérience 6b, le test d'un autre étudiant (Luc Keïta) n'impliquant pas de traitements verbaux, et également les épreuves du bilan neuropsychologique permettant de typer leur dyslexie.

5.2.2. Résultats

Pour chaque bloc de l'expérience, nous avons effectué le même type d'analyses que celles de l'Expérience 6a, pour chaque niveau scolaire et pour chaque type de dyslexie développementale. A noter que les résultats des enfants de CE2 (les seuls enfants ayant passé les deux versions visuelle et audio-visuelle de l'Expérience 6b) en version audio-visuelle sont identiques à ceux obtenus en version visuelle. Pour des raisons de clarté, nous ne présenterons donc ici que les graphiques représentant les résultats des 5 groupes de sujets (adultes, enfants normo-lecteurs de CE1 et CE2, enfants dyslexiques de surface et phonologiques) en version visuelle.

Les pourcentages de choix orientés vers l'une ou l'autre catégorie de traits phonologiques sont représentés sur la Figure 32 pour les enfants sans déficit de lecture en CE1, CE2, les enfants des deux types de dyslexie et les adultes. Il apparaît que la hiérarchie des catégories de traits est plus marquée chez les adultes que chez les enfants des 4 groupes.

⁵ Unité de Neuropédiatrie, Lyon 5^{ème} (69).

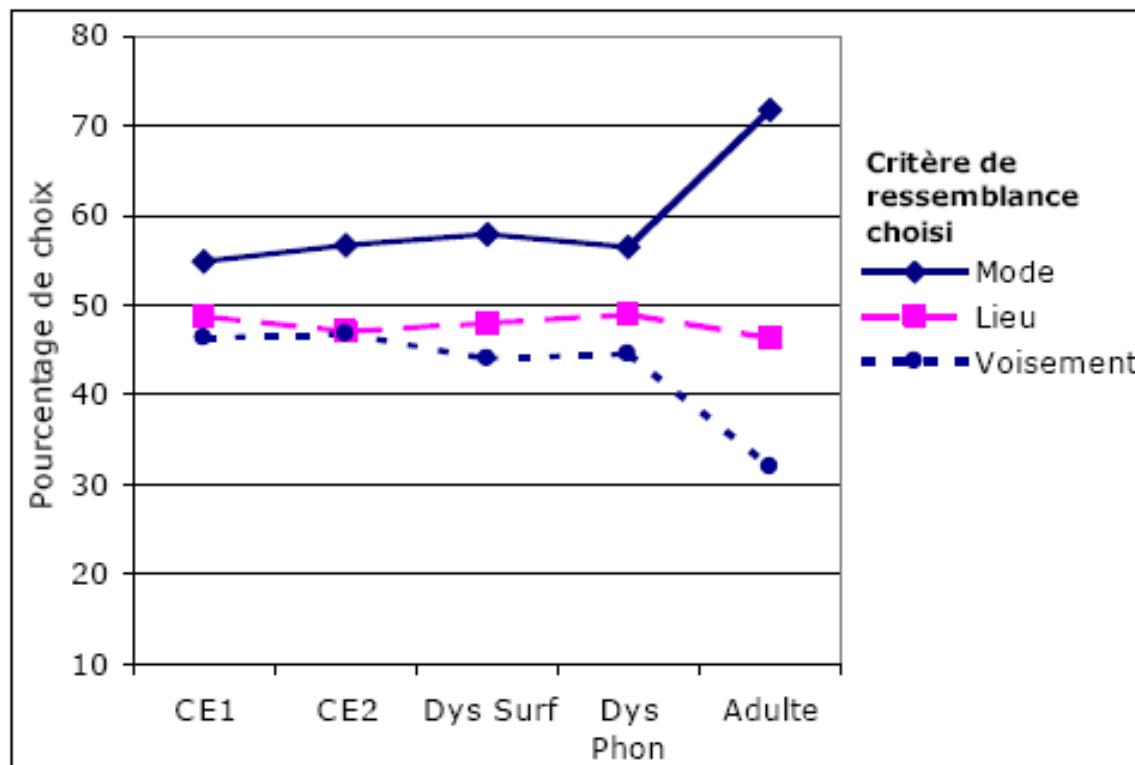


Figure 32 : Pourcentages de choix dont ont fait l'objet chacun des trois critères d'appariement (ressemblance de mode, de lieu ou de voisement). Des réponses fournies au hasard correspondraient à un pourcentage de 50%.

Les tests binomiaux montrent cependant que deux aspects de cette hiérarchie sont déjà présents, bien qu'atténués, chez les enfants de CE1, CE2 et les deux groupes d'enfants dyslexiques. Le mode est choisi plus fréquemment que ne permettrait de le prédire le hasard, et le voisement l'est toujours moins que le hasard (les valeurs correspondant à ces tests sont précisées dans le Tableau XI).

Tableau XI : Résultats des analyses avec le test binomial sur les 5 groupes de participants.

	Critère de ressemblance choisi	Binomial		Valeur de p
		Fobservées	Fthéoriques	
CE1	Mode	527	480	.001
	Lieu	468	480	.229
	Voisement	445	480	.003
CE2	Mode	544	480	<.0001
	Lieu	452	480	.038
	Voisement	449	480	.025
Dyslexiques de surface	Mode	556	480	<.0001
	Lieu	461	480	.896
	Voisement	423	480	.0001
Dyslexiques phonologiques	Mode	542	480	<.0001
	Lieu	470	480	.270
	Voisement	428	480	.0004
Adultes	Mode	1652	1152	<.0001
	Lieu	1068	1152	.0025
	Voisement	736	1152	<.0001

Par contre, le pourcentage d'appariements guidés par la ressemblance de lieu varie entre les groupes. Le choix de ce critère n'est pas différent du hasard en CE1, mais dès le CE2 et encore chez les adultes, il est significativement moins choisi que si les réponses étaient données au hasard. Par contre, bien que plus âgés que les enfants de CE2, les enfants dyslexiques des deux groupes ne diffèrent pas du hasard pour le choix de la ressemblance de lieu. Pour ce qui est du poids accordé à la ressemblance de lieu, les enfants atteints de l'une ou l'autre forme de dyslexie ont donc un profil immature et se laissent davantage guider par ce critère que les enfants de CE2 et les adultes sans problème de lecture.

La Figure 33 représente les pourcentages de choix d'appariement selon la ressemblance de mode dans le cas où elle est en concurrence avec la ressemblance de lieu (bloc Mode-Lieu) ou de voisement (bloc Mode-Voisement). La ressemblance de mode est préférée dans les deux cas chez les enfants de CE1 (respectivement Binomial = .0380, $p = .50$ et Binomial = .0080, $p = .50$), les enfants de CE2 (respectivement Binomial = .0008, $p = .50$ et Binomial = .0046, $p = .50$), chez les adultes (respectivement Binomial < .0001, $p = .50$ et Binomial < .0001, $p = .50$) et même chez les dyslexiques de surface (respectivement Binomial = .038, $p = .50$ et Binomial < .0001, $p = .50$), mais pas chez les dyslexiques phonologiques. Pour ces derniers, le mode est préféré quand il est opposé au voisement (Binomial < .0001, $p = .50$), mais pas dans l'opposition au lieu (Binomial = .11, $p = .50$). Il semble donc que la ressemblance de lieu soit anormalement attractive, au détriment de la ressemblance de mode, dans le cas particulier de la dyslexie phonologique.

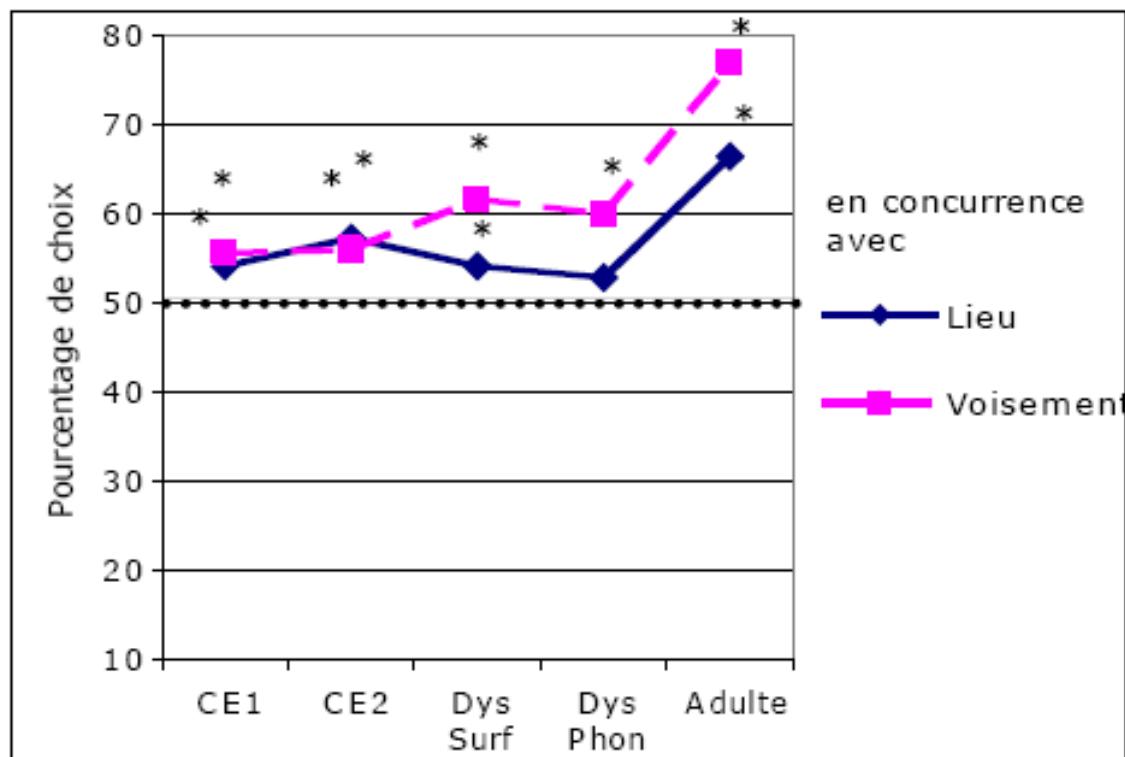


Figure 33 : Pourcentage de choix d'appariement selon le mode, en concurrence avec la ressemblance de lieu ou de voisement chez les 5 groupes de participants. Les étoiles représentent les cas où le choix de mode dépasse le hasard ($p < .05$).

Sur la Figure 34, qui illustre les pourcentages de choix de ressemblance de lieu, nous retrouvons une représentation des choix pour l'opposition entre lieu et mode (complémentaire de la Figure 33), mais également une courbe qui montre que le pourcentage de réponse orientées par la ressemblance de lieu reste au niveau du hasard dans sa concurrence avec la ressemblance de voisement dans les 4 groupes d'enfants. Il s'agit peut-être d'un indice d'immaturité chez les dyslexiques car les adultes préfèrent véritablement la ressemblance de lieu à la ressemblance de voisement, mais il est difficile d'en être sûr en l'absence de groupe apparié en âge chronologique.

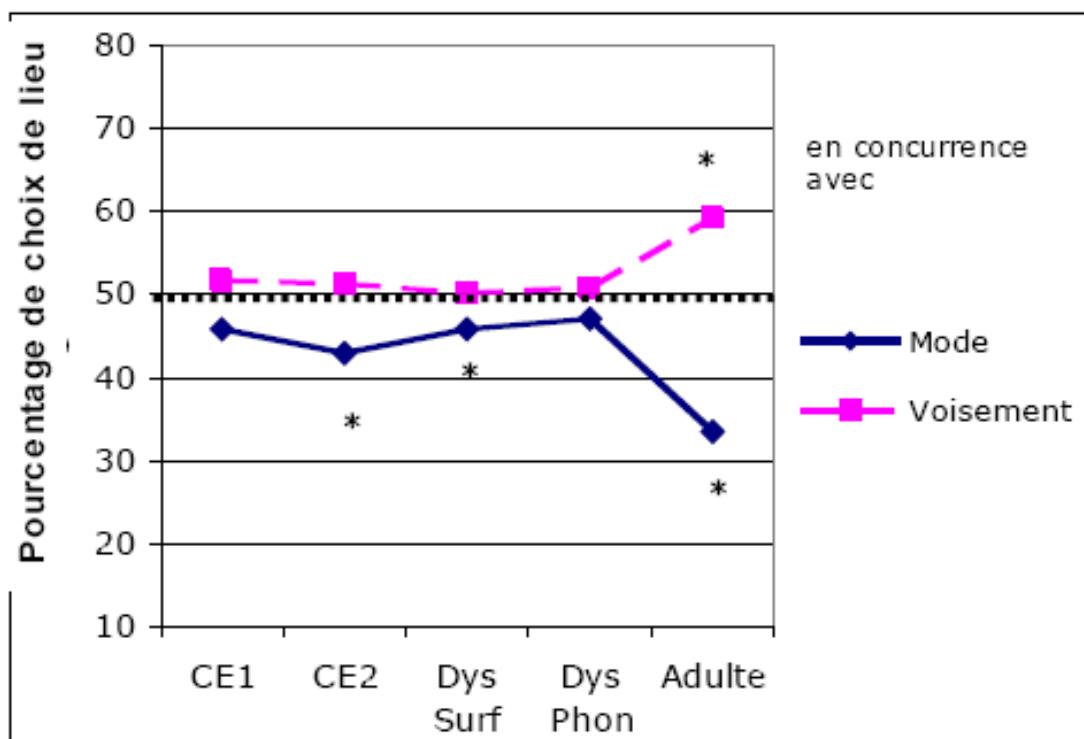


Figure 34: Pourcentage de choix d'appariement selon le lieu, en concurrence avec la ressemblance de mode ou de voisement chez les 5 groupes de participants. Les étoiles représentent les cas où le choix de mode diffère du hasard ($p < .05$).

D'après ces premières analyses, il apparaît donc essentiellement que les enfants dyslexiques se distinguent par une attirance qui reste trop forte par la ressemblance de lieu (phénomène qui disparaît normalement en CE2). Chez les dyslexiques phonologiques, cette attirance exceptionnellement forte pour le lieu les conduit à négliger le mode. De plus, pour les deux types de dyslexiques, bien que l'attraction par le lieu soit très forte, elle ne prend pas clairement le pas sur celle du voisement. Par cette absence de préférence pour le lieu plutôt que le voisement, et bien qu'ils aient entre 10 et 12 ans, les enfants dyslexiques de notre étude se rapprochent donc davantage des enfants normo-lecteurs plus jeunes (7-9 ans) que des adultes.

Des analyses de variance à mesures répétées ont été réalisées pour comparer la concurrence exercée par les catégories de traits, considérées deux à deux, et cette fois vraiment comparables dans leur opposition à une même autre ressemblance. Elles permettent donc de commencer à dessiner l'organisation des catégories de traits. Chez l'adulte, nous avons vu que la concurrence exercée par la ressemblance de mode est plus forte que celle qu'exerce la ressemblance de voisement et, dans une mesure un peu moindre, la ressemblance de lieu, le lieu étant lui-même un concurrent plus puissant que le voisement. Chez les enfants, les seules différences observées vont dans le même sens, mais ne se retrouvent pas dans tous les groupes. Le Tableau XII présente la taille des effets (éta-carré partiel) pour chacune de ces différences dans les 5 groupes testés, lorsque la différence atteint le seuil de significativité ($p = .05$).

Tableau XII : Valeurs de l'éta carré partiel pour les différences significatives ($p < .05$) entre la concurrence exercée par chacune des ressemblances (ressemblance de mode, de lieu ou de voisement) pour chaque groupe.

	Mode > Lieu	Mode > Voisement	Lieu > Voisement
CE1	n.s.	n.s.	n.s.
CE2	n.s.	.40	n.s.
Dyslexiques de surface	.37	.33	n.s.
Dyslexiques phonologiques	n.s.	n.s.	.47
Adultes	.37	.56	.16

Chez les enfants les plus jeunes, cette façon d'explorer les résultats ne fait pas ressortir de différence significative entre les concurrences exercées par l'une ou l'autre des ressemblances. Mais, comme l'indique le Tableau XII, en CE2 la ressemblance de mode est déjà plus attractive que la ressemblance de voisement. Cette différence, qui reste la plus importante chez l'adulte, est donc aussi la première à émerger chez l'enfant. En effet, en CE2, la concurrence exercée par le mode n'est pas encore statistiquement plus forte que la concurrence exercée par le lieu, phénomène que nous n'observons par contre chez l'adulte.

Chez les enfants dyslexiques de surface, la ressemblance de mode attire plus de choix que la ressemblance de voisement, mais aussi davantage que la ressemblance de lieu. Ces indices d'un attrait particulier pour le mode d'articulation montrent un début d'organisation des connaissances sur les traits phonologiques chez les enfants dyslexiques de surface. Par contre, les ressemblances de lieu et de voisement ne semblent pas (encore) avoir chez eux de poids différent, non seulement parce que les concurrences exercées par l'une et l'autre ne diffèrent pas dans leur opposition au mode, mais aussi parce que la taille de l'effet de dominance du mode est sensiblement la même, que ce soit par rapport au lieu ($\eta^2 = 0.37$) ou par rapport au voisement ($\eta^2 = 0.33$).

Le résultat le plus surprenant apparaît toutefois chez les dyslexiques phonologiques, chez qui la ressemblance de mode ne prime pas significativement sur les ressemblances de lieu ou de voisement dans cette analyse. Par contre, chez ces enfants, la ressemblance de lieu est un concurrent plus fort que la ressemblance de voisement, ce qui n'est pas le cas des dyslexiques de surface. Ces résultats confortent donc l'idée d'une prégnance particulièrement forte de la ressemblance de lieu pour les dyslexiques phonologiques, et d'une sensibilité anormalement faible à la ressemblance de mode. Cela semble révéler une immaturité phonologique propre à ce profil de dyslexie, car cette absence totale de prépondérance de la concurrence exercée par le mode les rapproche des CE1, mais les distingue des CE2 et des dyslexiques de surface.

En bref, pour ce qui est de la mise en place d'une hiérarchie des catégories de traits phonologiques, ces analyses de variances ne montrent pas de hiérarchie claire en CE1, puis la dominance du mode émerge, d'abord par rapport au voisement, mais seulement plus tard par rapport au lieu. Comme l'attraction par le lieu ne diffère ni de celle du mode, ni de celle du voisement, le lieu aurait un statut intermédiaire, qui se maintient chez les adultes où la hiérarchie Mode-Lieu-Voisement est plus établie. Chez les enfants dyslexiques de surface, le mode a aussi un statut privilégié, mais la hiérarchie est moins fine : le mode se distingue indifféremment du voisement et du lieu. Chez les enfants dyslexiques phonologiques, les rapports hiérarchiques des catégories sont plus atypiques, avant tout parce que la ressemblance de mode ne domine ni la ressemblance de lieu, ni la ressemblance de voisement, mais aussi parce que la concurrence exercée par la ressemblance de lieu prend

significativement le pas sur celle qu'exerce la ressemblance de voisement. Cette dernière différence, qui semble secondaire pour les autres groupes, est un effet de grande taille chez les dyslexiques phonologiques.

Des analyses complémentaires précisent si les traits phonologiques représentant chaque catégorie de traits suscitent des réponses homogènes de la part des enfants des 4 groupes.

Concernant le mode d'articulation, les Figures 35 et 36 représentent les pourcentages de choix guidés par le mode, selon le trait qui représente cette catégorie (occlusif ou fricatif). Elles reflètent une forte homogénéité de comportement vis-à-vis de l'un et l'autre traits de mode, sauf chez les enfants de CE1 qui se basent beaucoup moins sur le partage du trait fricatif que sur celui du trait occlusif pour effectuer les appariements ($T = -2.52$, $p = .0116$) lorsqu'il y a une concurrence avec la ressemblance de lieu. Même les deux groupes d'enfants dyslexiques échappent à cet aspect immature de la catégorie de mode, qui s'efface dès le CE2.

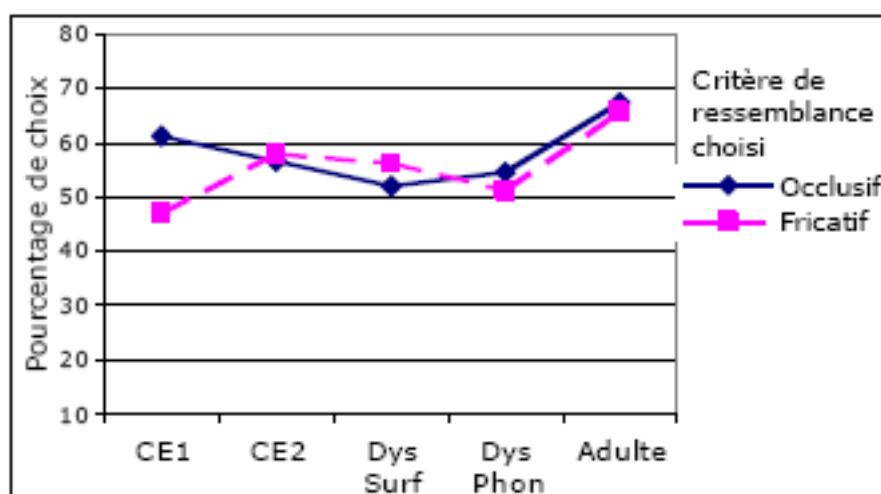


Figure 35 : Pourcentages de choix de ressemblance de mode pour appairer quand le mode est représenté par le trait occlusif ou fricatif, dans l'opposition à la ressemblance de lieu (bloc ML), pour les 5 groupes de participants.

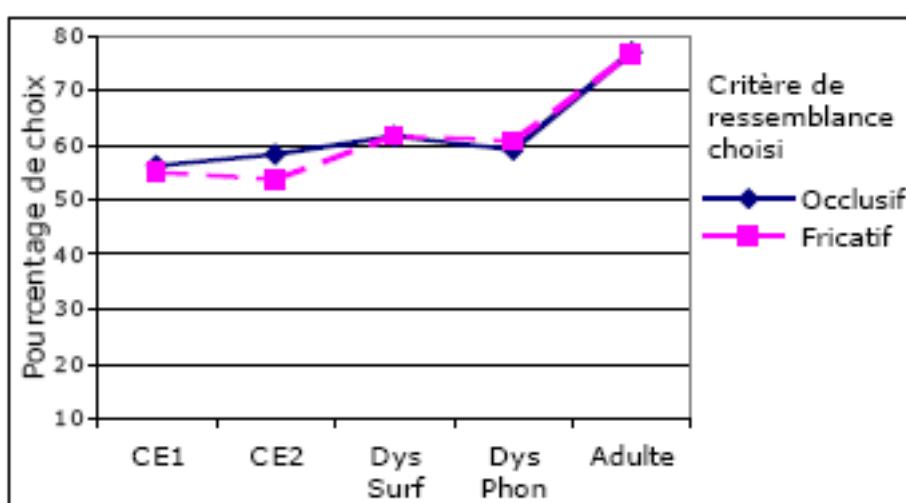


Figure 36 : Pourcentages de choix de ressemblance de mode pour appairer quand le mode est représenté par le trait occlusif ou fricatif, dans l'opposition à la ressemblance de voisement (bloc MV), pour les 5 groupes de participants.

Lorsqu'une ressemblance de lieu d'articulation est proposée, les Figures 37 et 38 montrent que les participants de CE1, les dyslexiques de surface et les adultes répondent d'une manière homogène, quel que soit le trait qui supporte la ressemblance de lieu (labial, dental, vélo-palatal). Nous observons tout de même que chez les enfants de CE2 les appariements sont davantage guidés par le lieu quand il est représenté par les traits labial ($T = -2.15, p = .03$) ou vélo-palatal ($T = -2.50, p = .01$) plutôt que dental. Ces deux effets calculés sur l'ensemble des blocs Mode-Lieu et Voisement-Lieu, sont également significatifs dans chacun de ces blocs, c'est-à-dire aussi bien dans le contexte d'une opposition au mode que dans celui d'une opposition au voisement (voir Figures 37 et 38). Ces différences semblent transitoires lors du développement normal, car elles ne sont pas encore observées chez les enfants de CE1 et ont disparu chez les adultes. Cependant, chez les enfants plus âgés mais dyslexiques phonologiques (et non chez les dyslexiques de surface), l'une de ces différences demeure. Ces enfants apparient davantage en fonction du trait vélo-palatal qu'en fonction du trait dental, d'une manière générale ($T = -2.19, p = .03$) et plus particulièrement dans le contexte d'une opposition au voisement ($T = -2.16, p = .03$). Les deux groupes de dyslexiques diffèrent sur ce point précis. Ces analyses permettent de préciser que l'attraction particulière des enfants dyslexiques phonologiques pour la ressemblance de lieu s'explique surtout par leur sensibilité au partage de traits de lieu arrière, qualifiés ici de vélo-palataux.

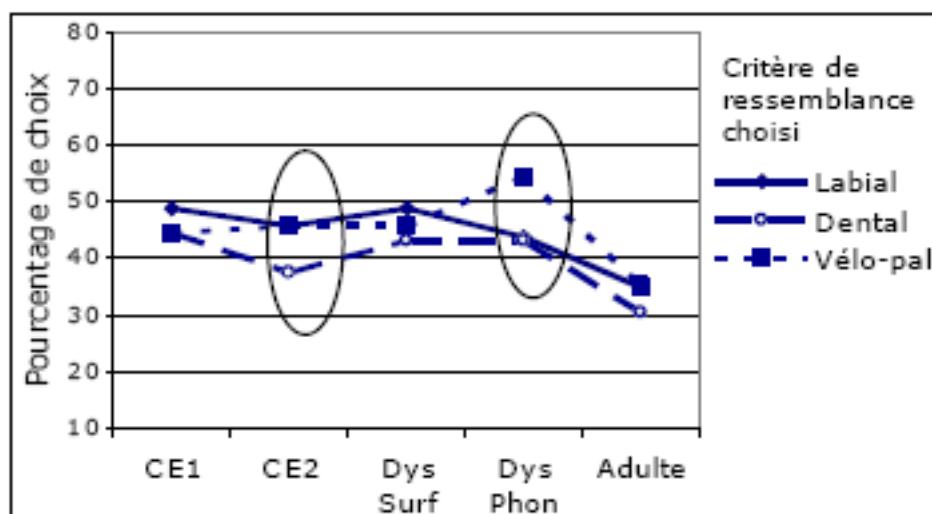


Figure 37 : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu pour appairer quand le lieu est représenté par le trait labial, dental ou vélo-palatal, dans l'opposition à la ressemblance de mode (bloc ML), pour les 5 groupes de participants

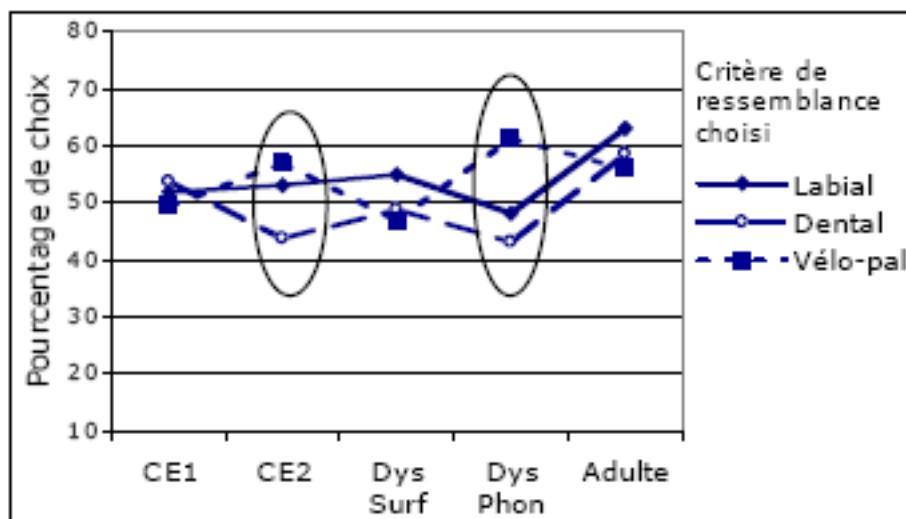


Figure 38 : Pourcentages de choix de ressemblance de lieu pour apparier quand le lieu est représenté par le trait labial, dental ou vélo-palatal, dans l'opposition à la ressemblance de voisement (bloc VL), pour les 5 groupes de participants.

Le principe du marquage est parfois utilisé pour tenter d'expliquer les erreurs verbales chez les enfants, tout au moins dans des situations de production. Pour un type de trait donné, certaines valeurs de trait ont un statut privilégié, parce qu'elles sont moins complexes, et le trait, qualifié de *non-marqué* (*unmarked*), serait utilisé par défaut. Par exemple, en anglais, pour les traits de lieu, le trait coronal serait le lieu non-marqué. Concrètement, cela se traduit par une acquisition plus précoce des consonnes contenant ce trait et une production particulièrement fréquente de telles consonnes chez les jeunes enfants. Les phonèmes de remplacement dans les erreurs de substitution ont aussi souvent des traits non marqués, et ces derniers sont fréquemment la cible de phénomènes d'harmonie consonantique. Les relations de marquage entre les traits sont censées être universelles (les caractéristiques phonologiques considérées comme non marquées sont les plus largement réparties dans les langues du monde) et/ou dépendantes de la facilité de perception ou d'articulation. Certains chercheurs estiment qu'elles peuvent quand même varier entre les langues, ou au cours du développement de l'enfant (Fikkert, 2007). Dans un tel cadre d'interprétation, nous pourrions peut-être donner un sens à la prépondérance du trait vélo-palatal pour les enfants dyslexiques phonologiques. Des études de cas d'enfants ayant des systèmes phonologiques atypiques montrent que, en cas de développement atypique du système phonologique, ce principe de marquage serait particulièrement perturbé pour les traits de lieu, mais plus rarement pour le mode et le voisement (Bernhardt & Stemberger, 2007). Le trait [dorsal] (et non coronal) aurait chez eux le statut de trait de lieu non-marqué, et les consonnes vélaires apparaissent alors souvent comme consonnes de remplacement dans les erreurs par substitution. Nous proposons un rapprochement avec nos données, qui montrent que les enfants dyslexiques phonologiques privilégient aussi, dans notre tâche, le trait de lieu le plus postérieur (vélo-palatal).

Enfin, pour ce qui est du voisement, les enfants dyslexiques phonologiques se distinguent encore une fois. Chez eux, comme chez les enfants de CE1, le partage du trait sourd sert plus souvent de critère d'appariement que le partage du trait sonore ($T = -2.12$, $p = .0343$ chez les dyslexiques phonologiques, $T = -2.00$, $p = .0450$ chez les CE1), ce qui n'est pas le cas des enfants de CE2, ni des adultes, ni des enfants dyslexiques de surface. Sur ce point, l'organisation des traits phonologiques semble particulièrement immature chez

les enfants dyslexiques phonologiques. Remarquons toutefois que ce privilège du trait sourd sur le trait sonore ne s'observe que dans l'opposition à une ressemblance de mode (Figure 39), et pas dans l'opposition à une ressemblance de lieu (Figure 40). Ici encore, le privilège particulièrement fort accordé par les enfants dyslexiques phonologiques pourrait être interprété dans le cadre de la théorie de la marque. Le trait sourd, non marqué, serait pour eux particulièrement saillant. Dans le cas de troubles neurologiques accompagnés de déficits phonologiques chez des adultes, certains travaux ont montré qu'il y avait moins d'erreurs sur les traits non-marqués que sur les traits marqués. Une recherche conduite auprès de 23 patients francophones atteints de diverses formes d'aphasie a analysé les erreurs de répétition de mots et de non-mots, dont certains contiennent des clusters consonantiques où les deux consonnes ont des lieux différents (Béland, Paradis & Bois, 1993). Les erreurs seraient surtout des simplifications, des réponses 'par défaut', dans lesquelles les traits marqués seraient remplacés par des traits non-marqués. Ce privilège des traits non-marqués, dans la pathologie, est assez cohérent avec la préservation de la capacité à apparier sur la base du partage du trait sourd chez les enfants de notre étude qui présentent un trouble phonologique.

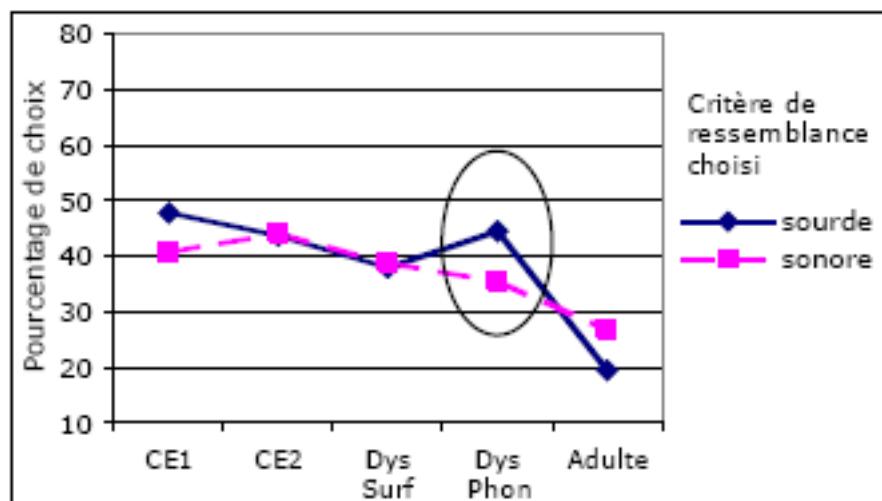


Figure 39 : Pourcentages de choix de ressemblance de voisement pour apparier quand le voisement est représenté par le trait sourd ou sonore, dans son opposition à une ressemblance de mode (bloc MV), pour les 5 groupes de participants.

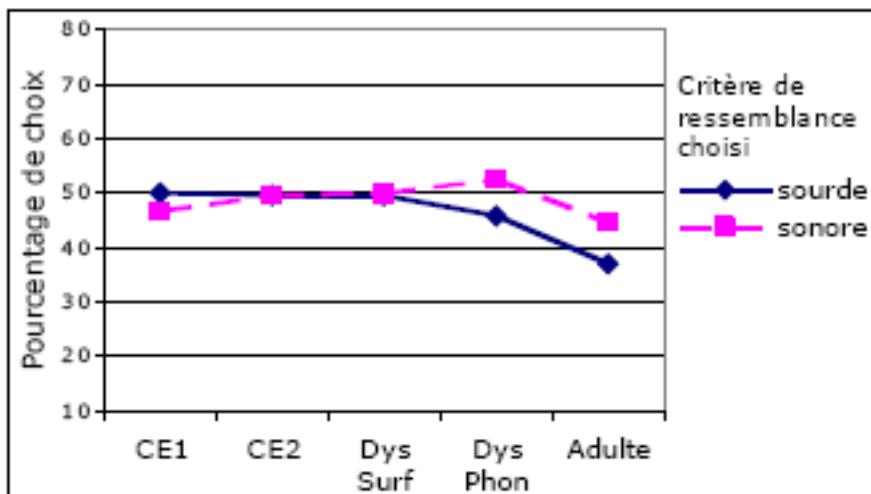


Figure 40 : Pourcentages de choix de ressemblance de voisement pour appairer quand le voisement est représenté par le trait sourd ou sonore, dans son opposition à une ressemblance de lieu (bloc VL), pour les 5 groupes de participants.

5.2.3. Discussion des résultats des enfants avec ou sans trouble de la lecture

La hiérarchie des catégories de traits est plus marquée chez les adultes que chez les enfants des 4 groupes (enfants normo-lecteurs et enfants dyslexiques). Cette hiérarchie continue donc à se mettre en place au-delà de 8 ans. Néanmoins, certains aspects de cette hiérarchie sont déjà présents, bien qu'atténués, chez les enfants de CE1, CE2 et les deux groupes d'enfants dyslexiques, et les résultats de ces épreuves révèlent une anomalie de l'organisation des catégories de traits chez les enfants dyslexiques phonologiques.

Dans le cas des **lecteurs les plus jeunes** de notre étude (scolarisés en CE1), les indices de hiérarchie entre les catégories de lieu, de mode et de voisement sont encore faibles, d'après les appariements réalisés. Deux phénomènes différencient cependant déjà leurs réponses du hasard : le partage du mode est pour eux attractif, alors que le partage du voisement l'est particulièrement peu. A cet âge, nous ne retrouvons toutefois pas de différence significative entre les concurrences exercées par l'une ou l'autre des ressemblances manipulées. Il n'y a donc pas de hiérarchie vraiment claire en CE1.

Puis la dominance du mode s'affirme **en CE2**, y compris dans les analyses comparant la force de concurrence exercée par ce trait et par d'autres. La dominance du mode s'affirme ainsi en CE2, tout d'abord par rapport au voisement. En cela, nos résultats contredisent l'hypothèse de Jaeger (1992) qui décrit le voisement comme un critère d'organisation plus important chez les jeunes lecteurs que chez les adultes. Cette différence pourrait s'expliquer par la différence de langue entre les enfants des deux études. En revanche, une sensibilité précoce à la ressemblance infra-phonémique basée sur le mode a été montrée chez des enfants de 9 mois (Jusczyk et al., 1999), et nos résultats montrent que le premier type de trait émergeant dans l'appariement de syllabes écrites chez des enfants de CE2 est aussi le mode. Chez les enfants de CE1, la catégorie de mode n'est pas aussi homogène que chez les enfants de CE2 et les adultes, puisque le mode n'est pas préféré indépendamment de la valeur du trait de mode (occlusif ou fricatif) partagé par les consonnes. Dès le CE2, les réponses sont toutefois déjà homogènes pour ces deux valeurs de mode. Par ailleurs, comme l'attraction par le lieu ne diffère ni de celle du mode, ni de celle du voisement en

CE1 et CE2, le lieu aurait à cet âge un statut intermédiaire, qui se maintient chez les adultes où la hiérarchie Mode-Lieu-Voisement est plus nettement dessinée.

Chez les enfants **dyslexiques de surface**, la ressemblance de mode est plus attractive que la ressemblance de voisement, mais aussi que la ressemblance de lieu. Ces indices d'un attrait particulier pour le mode d'articulation montrent un début d'organisation des connaissances sur les traits phonologiques chez les enfants dyslexiques de surface. Comme les dyslexiques phonologiques et les enfants les plus jeunes, les dyslexiques de surface ne laissent pas de côté la ressemblance de lieu, comme le font plus tard les adultes. Nous n'avons cependant pas pour l'instant les moyens de savoir quand cet amoindrissement de l'attraction par le partage de lieu disparaît (il faudrait pour cela tester des enfants normo-lecteurs plus âgés). Chez les dyslexiques de surface, les ressemblances de lieu et de voisement ne semblent pas (encore) avoir de poids différent. Dans cette forme de dyslexie, la hiérarchie des types de traits est immature essentiellement sur cet aspect : c'est une anomalie qui les distingue des dyslexiques phonologiques.

Le résultat le plus surprenant apparaît chez les **dyslexiques phonologiques**, chez qui les rapports hiérarchiques des catégories sont plus atypiques, avant tout parce que la ressemblance de mode ne domine ni la ressemblance de lieu, ni la ressemblance de voisement. Cette relative insensibilité au mode est particulièrement visible dans les cas de choix entre les ressemblances de mode et de lieu : les dyslexiques phonologiques sont le seul groupe pour lequel le mode n'est pas alors choisi. Les dyslexiques phonologiques pourraient bien accorder trop peu d'importance au mode, parce que le lieu est un aspect phonologique pour eux trop central. C'est ce que confirme l'analyse comparant l'effet de concurrence exercée par le partage du lieu ou du voisement, la ressemblance de lieu apparaissant alors comme excessivement attractive, même par rapport aux effets chez l'adulte. Ces résultats confortent donc l'idée d'une prégnance particulièrement forte de la ressemblance de lieu pour les dyslexiques phonologiques, et d'une sensibilité anormalement faible à la ressemblance de mode.

Par ailleurs, un autre élément doit être pris en compte dans une organisation hiérarchique des catégories de traits : l'homogénéité de chacune d'elles. La catégorie de mode présente une forte homogénéité dans les 5 groupes de participants testés, sauf chez les enfants de CE1 en raison d'une différence entre les consonnes occlusives et les consonnes fricatives. Cette différence s'efface en CE2, et n'est pas présente chez les enfants dyslexiques. La catégorie de lieu est homogène chez les enfants de CE1, chez les enfants dyslexiques de surface et chez les adultes. Elle n'est pas homogène chez les enfants de CE2 car ils sont davantage guidés par le lieu pour les traits labial et vélo-palatal que le lieu soit opposé au mode ou au voisement. Mais cette différence est transitoire et disparaît chez l'adulte. Concernant cette homogénéité de la catégorie de lieu, les enfants dyslexiques phonologiques se distinguent des dyslexiques de surface : l'attrait pour le lieu lorsque les consonnes sont vélo-palatales demeure chez eux, ce qui n'est pas le cas chez les dyslexiques de surface. L'attraction pour le lieu chez les dyslexiques phonologiques s'explique donc surtout par leur attirance pour le lieu arrière. Enfin, concernant l'homogénéité de la catégorie de voisement, les enfants dyslexiques phonologiques se distinguent encore (comme les enfants de CE1) par une différence entre les consonnes sonores et les consonnes sourdes, ce qui n'est pas le cas chez les enfants de CE2, chez les adultes ou chez les enfants dyslexiques de surface.

Ainsi, l'ensemble de ces expériences d'appariement de syllabes permet de mettre en évidence une organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques chez les adultes bons lecteurs et une émergence progressive de cette organisation chez les enfants

normo-lecteurs. Nos hypothèses 13 et 14 sont donc vérifiées. Nous montrons également une organisation différente des trois catégories de traits phonologiques chez les enfants dyslexiques, et des anomalies particulièrement marquées chez les enfants présentant une dyslexie de type phonologique plutôt qu'une dyslexie de type surface : notre hypothèse 15 est donc également vérifiée. Nous apportons ainsi un argument supplémentaire à la pertinence de la distinction entre les types de dyslexie chez l'enfant, dans la mesure où les enfants dyslexiques phonologiques présentent une organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques différente de celle des enfants dyslexiques de surface.

Chapitre 4 : Discussion générale

1. Rôle des connaissances infra-phonémiques en lecture : deux mécanismes en jeu

1.1. Proposition de modèle

Un des objectifs de ce travail est d'évaluer les effets de ressemblance infra-phonémique entre les consonnes d'un stimulus écrit dans les étapes précoces de son traitement. Des études en psycholinguistique ont suggéré que le code phonologique impliqué en lecture peut être décrit en terme de traits phonologiques (Bedoin, 1998a ; Bedoin, 2003 ; Bedoin & Chavand, 2000 ; Lukatela et al., 2001), mais d'autres preuves sont nécessaires.

Dans de précédentes expériences d'amorçage, nous avions montré que la ressemblance de voisement, de lieu ou de mode d'articulation entre des consonnes traitées séquentiellement gêne l'identification de la consonne cible lorsque celle-ci est présentée en seconde position, à condition d'utiliser un SOA de 66 ou 100 ms (Bedoin, 1998b ; Bedoin, 2002 ; Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003). Cet effet d'amorçage, où la similarité se traduit par une détérioration des performances, fait écho à l'*amorçage phonétique inhibiteur* observé en perception de parole lorsque le second stimulus partage des traits du précédent, dans un environnement bruité (Luce, Pisoni & Goldinger, 1990 ; Goldinger et al., 1992). Il n'est pas sans rappeler des effets d'amorçage inhibiteur également recueillis en production de parole en cas de partage de nombreux traits par des mots successifs (Rogers & Storkel, 1998 ; Yaniv et al., 1990 ; Meyer & Gordon, 1985). En lecture, cet effet a été interprété comme pouvant résulter de l'intervention de relations d'inhibition latérale entre phonèmes, relations dont le poids dépendrait des traits phonologiques partagés (Bedoin, 2003).

A l'inverse, toujours à l'écrit, une présentation plus rapide de l'amorce (SOA de 33 ms) induit un effet d'amorçage facilitateur, tout au moins en cas de ressemblance de lieu ou de mode (Bedoin & Krifi, 2009). Celui-ci pourrait être basé sur un mécanisme rapide de bas niveau, fondé sur des relations activatrices entre phonèmes et traits phonologiques, telles que proposées dans des modèles décrivant des connexions excitatrices bidirectionnelle entre le niveau des phonèmes et celui des traits (McClelland & Rumelhart, 1981).. Toutefois, dans le cas particulier d'une ressemblance de voisement, avec une présentation aussi rapide la similarité se traduit chez les adultes bons lecteurs par un amorçage inhibiteur, comme si les relations d'inhibition latérale basées sur le voisement intervenaient particulièrement vite. De premiers indices faisaient tout de même soupçonner, en cas du partage de voisement comme pour les autres traits, l'implication d'un premier mécanisme, induisant une facilitation particulièrement transitoire, difficile à mettre en évidence expérimentalement. En effet, nous avions observé un amorçage facilitateur en cas de ressemblance de voisement chez des jeunes enfants normo-lecteurs (CE1) et chez des enfants dyslexiques, dont les traitements sont globalement plus lents ou encore incomplets (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003). Cela suggérait que la ressemblance de mode, de lieu ou de voisement pouvait produire un amorçage facilitateur, basé sur un premier mécanisme phonologique de bas niveau, remplacé par un second mécanisme phonologique de type

inhibiteur (particulièrement rapide en cas de ressemblance de voisement) qui masquerait ses effets.

Dans cette thèse, nous proposons ainsi un modèle de lecture, inspiré du modèle d'activation interactive de McClelland et Rumelhart (1981), articulant deux mécanismes basés sur les traits phonologiques : un mécanisme impliquant des relations activatrices entre les phonèmes et les traits phonologiques, et un mécanisme basé sur des relations d'inhibition latérale entre phonèmes partageant des traits phonologiques. Dans ce modèle, l'hypothèse d'un rôle des traits dans les traitements phonologiques en lecture tient une place centrale : elle n'est pas étrangère à des idées développées en perception de la parole par un modèle comme TRACE de McClelland et Rumelhart (1981) ou le modèle de la cohorte de Marslen-Wilson (1987).

Nous proposons que les unités-lettres activent les unités-phonèmes, activant elles-mêmes des traits phonologiques, comme dans le modèle TRACE. Un trait pourrait alors renforcer en retour les phonèmes avec lesquels il est compatible, par des relations ascendantes activatrices. Ces activations seraient à l'origine d'un renforcement du phonème correspondant effectivement à la lettre présentée, mais elles produiraient aussi l'activation d'autres phonèmes avec lesquels le trait activé est compatible, ce qui créerait un ensemble de compétiteurs pour le phonème à identifier. Les compétiteurs issus de ce mécanisme seraient suffisamment activés pour être particulièrement bien reconnus par la suite. Cela expliquerait que, dans les premières étapes de traitement d'un stimulus écrit (S2), le partage de traits phonologiques avec un stimulus préalable (S1) facilite l'identification du stimulus (S2), effet observé jusqu'ici en cas de partage de traits de mode ou de lieu d'articulation (Bedoin & Krifi, 2009 ; Chavand, 1998 ; Chavand & Bedoin, 1998 ; Lukatela et al., 2001). Il s'agirait en fait d'un biais initial, induisant une tendance à lire dans le deuxième stimulus une lettre partageant des traits phonologiques avec les stimuli traités précédemment. Comme tout biais, il pourrait bien sûr être à l'origine de certaines erreurs en lecture.

D'autre part, notre modèle propose, comme dans le modèle TRACE et à la différence du modèle de la cohorte, des relations d'inhibition latérale entre phonèmes. Ces relations d'inhibition latérale auraient des poids différents selon la similitude des phonèmes en termes de traits phonologiques. Le partage de traits phonologiques par deux phonèmes se traduirait par une augmentation de la force des relations d'inhibition latérale qui les relient. Grâce à la mise en jeu de telles relations entre phonèmes partageant de nombreux traits, les candidats concurrents verrraient leur niveau d'activation baisser. Ce deuxième mécanisme permettrait de rendre compte de la détérioration des performances sur le stimulus présenté en deuxième position, lorsqu'il partage des traits phonologiques avec le précédent, et lorsqu'un délai suffisant sépare les deux stimuli, sans doute essentiellement à partir de 66 ms (Bedoin & Krifi, 2009). Ce deuxième mécanisme phonologique contrebalancerait le premier et, surtout, permettrait de contrer le biais initial qu'il produit. Au final, le mécanisme basé sur les inhibitions latérales pourrait donc éviter au lecteur des erreurs spontanément induites par le premier mécanisme phonologique.

Ce modèle permet d'expliquer les résultats obtenus dans nos précédentes études d'amorçage et de masquage rétroactif chez les adultes bons lecteurs (Bedoin, 1998 ; Bedoin & Chavand, 2000 ; Bedoin & Krifi, 2009) et chez les enfants normo-lecteurs (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003). D'une part, le mécanisme basé sur les inhibitions latérales pourrait expliquer la gêne observée pour le traitement du deuxième stimulus en cas de succession de stimuli écrits partageant des traits phonologiques. D'autre part, le premier mécanisme, activateur, pourrait rendre compte de la facilitation observée parfois, en cas de SOA très bref, en condition de forte ressemblance infra-phonémique.

Pour tester le modèle, nous nous sommes basées sur ses propositions pour émettre une prédition quant à l'influence de la similarité phonologique sur le traitement du premier stimulus en cas de succession rapide de deux mots, dans des situations expérimentales de *backward masking*. Dans de telles expériences, le traitement de la cible présentée en premier est interrompu par le second stimulus qui la masque. Ce masque produit donc un effet négatif. Toutefois, cet effet délétère est réduit lorsque la cible et le masque ont des lettres en commun, ou lorsqu'ils sont homophones (Frost & Yoge, 2001 ; Perfetti & Bell, 1991 ; Perfetti, Bell & Delaney, 1988 ; Tan & Perfetti, 1999). S'appuyant sur les données de la littérature, notre prédition était donc que le partage de traits phonologiques par la cible et le masque devrait permettre de lire la cible plus facilement. Le partage du trait de voisement par deux stimuli se succédant rapidement produit en effet une réduction des performances dans une épreuve de décision lexicale sur le second stimulus en situation d'amorçage, mais une amélioration des performances pour le rappel du premier en situation de *backward masking*.

L'apparition de ces phénomènes d'amorçage et de masquage entre deux stimuli successifs a été vérifiée entre les deux consonnes d'un même stimulus écrit (pseudo-mot de structure CVCV) chez les adultes bons lecteurs et chez les enfants normo-lecteurs. La tâche est alors d'identifier l'une des deux consonnes. Conformément aux effets observés dans les expériences de masquage et d'amorçage impliquant deux stimuli successifs, Krifi, Bedoin et Mérigot (2003) ont montré que la ressemblance de voisement facilite le traitement de la première consonne (effet conforme à celui observé dans les situations de masquage) et perturbe le traitement de la deuxième (effet conforme à celui observé dans les situations d'amorçage) chez les adultes et chez les enfants normo-lecteurs à partir du CE2. Les effets sont résumés dans la Figure 7 du chapitre 1, paragraphe 3.2. Les plus jeunes lecteurs (en CE1) sont déjà sensibles au partage de voisement par les deux consonnes, mais cela se traduit par une amélioration des performances pour l'identification de la deuxième consonne. Cet effet peut s'expliquer par la mise en jeu du premier mécanisme phonologique, basé sur les relations activatrices entre phonèmes et traits phonologiques. Ces jeunes lecteurs ne semblent pas encore disposer d'une organisation des phonèmes par des relations d'inhibition latérale. La mise en jeu des relations d'inhibition latérale en lecture semble donc se mettre en place progressivement, avec un véritable palier en CE2, sans doute en lien avec l'apprentissage de la lecture. L'apprentissage de la lecture, et ses exigences importantes en termes de précision et d'organisation des connaissances phonologiques, pourrait en effet bien être le principal moteur de la mise en place de ce raffinement particulier de la structure des unités phonologiques. L'évolution progressive observée chez les enfants normo-lecteurs dans l'étude de Krifi et al. (2003) est compatible avec l'idée de Ventura, Kolinsky, Querido, Fernandes et Morais (2007), selon laquelle les connaissances phonologiques peuvent se modifier en lien avec la lecture. Il semble en tout cas que la mise en place d'organisation fine des connaissances phonologiques se prolonge assez tard au cours du développement, et qu'elle aille de paire avec un apprentissage réussi de la lecture.

1.2. Décours temporel des deux mécanismes phonologiques

Le prolongement de notre réflexion sur le rôle des traits phonologiques en lecture chez les adultes bons lecteurs a permis de mieux connaître le décours temporel des deux mécanismes phonologiques proposés. Nous supposons déjà que le mécanisme activateur intervenait plus rapidement que celui impliquant les relations d'inhibition latérale. Dans cette thèse, les Expériences 2a, 2b et 2c ont permis de préciser les conditions nécessaires

à l'apparition des deux effets produits par le partage de traits phonologiques par les consonnes d'un stimulus écrit C₁VC₂V, et d'estimer plus précisément les durées de présentation visuelle permettant de développer l'un et l'autre mécanismes. Nous avons pour cela utilisé une durée de présentation variable, de 33, 66 et 100 ms pour le stimulus. Chez un lecteur compétent, la lecture d'un tel mot court implique sans doute des activations lexicales extrêmement rapides. Cette participation du lexique aux étapes précoce de l'identification d'un mot est intéressante et devrait être prise en compte dans un prolongement de ces travaux. Nous avons toutefois fait le choix, dans cette thèse, de nous concentrer avant tout sur les traitements impliquant des unités infra-lexicales. Il s'agissait surtout de mettre en évidence leur rôle, et pour cela nous avons utilisé des pseudo-mots, qui permettent de les isoler plus facilement, quoique non complètement, des influences lexicales. Par ailleurs, le choix d'utiliser des pseudo-mots n'est pas anodin à l'égard de la séquentialité des traitements. Il est aujourd'hui généralement admis que les lettres d'un mot court sont essentiellement traitées en parallèle par un bon lecteur, ce qui peut permettre une identification extrêmement rapide du mot, surtout s'il correspond à une représentation orthographique familière. Dans le cas d'un pseudo-mot, un tel traitement automatique s'engage sans doute, mais l'absence de correspondance directe avec une représentation orthographique rendrait rapidement utile un traitement séquentiel des graphèmes. Nous avons confirmé la séquentialité de ce traitement des pseudo-mots écrits, même lorsqu'ils ne comportent que quatre lettres, avec un avantage systématique pour le traitement de la première syllabe par rapport à la seconde. Etant donné que nous souhaitions reproduire, entre les lettres d'un stimulus écrit unique, des effets préalablement observés entre des mots présentés séquentiallement, notre choix d'utiliser des pseudo-mots s'explique donc aussi par la séquentialité du traitement de leurs graphèmes.

L'Expérience 2a est très proche de celle de Bedoin (2003), la seule différence concerne le temps de présentation du pseudo-mot : 33 ms ici et non 50 ms. Pour rappel, dans cette expérience princeps, la ressemblance de voisement aidait le traitement de C₁ et gênait celui de C₂ à l'image des effets de backward masking et d'amorçage inhibiteur observés pour des couples de mots ou pseudo-mots présentés l'un après l'autre. Ces résultats étaient interprétés dans le cadre du modèle d'organisation des phonèmes selon des relations d'inhibition latérale. Avec un SOA de 50 ms, les effets obtenus en cas de similarité suggéraient que des relations d'inhibition latérale produisent un effet négatif sur le traitement de C₂ ; l'aide procurée au traitement de C₁ pouvait s'expliquer par une réduction de l'effet négatif du masque (le « masque » C₂ étant mal identifié). En utilisant dans l'Expérience 2a un SOA plus court (33 ms), nous espérions relever des indices du mécanisme phonologique activateur, que notre modèle décrit comme plus précoce, pour le voisement comme pour les traits de mode et de lieu. Des tels indices n'avaient encore pas été observés, en dehors des très jeunes lecteurs et d'enfants dyslexiques (Krifi, Bedoin & Herbillon, 2003). Les résultats de l'Expérience 2a n'ont pas permis de vérifier cette hypothèse. Avec un SOA de 33 ms, nous avons en effet répliqué les effets obtenus avec un SOA de 50 ms. Nos Expériences 2b et 2c, conduites selon la même procédure mais avec des SOAs de 66 et 100 ms, ont montré que les effets témoignant de l'engagement de relations d'inhibition latérale (facilitation de l'identification de C₁ et inhibition de l'identification de C₂ en cas de similarité phonologique) sont observés non seulement pour 33 ms de traitement (Expérience 2a) et pour 50 ms (Bedoin, 2003), mais se prolongent aussi pour 66 ou 100 ms de traitement. L'ensemble de ces expériences apporte donc un argument supplémentaire à l'intervention d'un niveau de connaissances sur les phonèmes, organisés chez l'adulte par des relations d'inhibition latérale, dont le poids est

déterminé par la ressemblance infra-phonémique entre les phonèmes. Elles montrent aussi que ce niveau de relations intervient précocement chez des adultes bons lecteurs, dans le cas du voisement, puisque les effets apparaissent dès 33 ms de traitement. Nous avons dû conduire, dans la suite de cette thèse, d'autres expériences imposant des demandes particulièrement fortes pour mettre à jour le mécanisme phonologique activateur basé sur le voisement.

L'une des conditions qui nous a semblé propice à l'accès au mécanisme phonologique activateur précoce est la séparation temporelle de la présentation des syllabes du stimulus CVCV. Une telle présentation était destinée à entraver le cours normal des traitements et à court-circuiter la mise en jeu du deuxième mécanisme phonologique, basé sur les inhibitions latérales : c'était l'objectif de l'Expérience 3a.

1.3. Rôle de la présence simultanée des lettres sur l'engagement des relations d'inhibition latérale

Le choix de tester les effets de similarité phonologique entre les consonnes d'un stimulus unique permettait de se rapprocher de conditions de lecture habituelles. Toutefois, la présence simultanée des deux syllabes n'est pas anodine dans le déclenchement de ces mécanismes. Nous l'avons vérifié en conduisant des expériences dans lesquelles la première syllabe du stimulus CVCV était d'abord présentée seule, puis disparaissait avant une présentation également très brève de la deuxième syllabe, isolée sur la droite. Nous avons montré que, dans ces conditions de présentation qui empêchent le traitement en parallèle des lettres et réduisent la concurrence entre les syllabes, les effets produits par le partage de traits phonologiques entre les syllabes s'expliquent par un mécanisme d'activation, mais pas du tout par un mécanisme inhibiteur. En effet, le partage du voisement avec C₁ améliore le traitement de C₂, qui est alors traitée à la fois plus rapidement et plus précisément. La séparation de la présentation des syllabes n'encourage donc pas le développement du mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale.

La séparation à la fois temporelle et spatiale est sans doute à l'origine de ce blocage du mécanisme basé sur les inhibitions latérales. En effet, les expériences réalisées avant cette thèse avaient montré des effets explicables par ce mécanisme, bien que la similarité phonologique concerne des consonnes présentées dans des mots qui se succédaient (séparation seulement temporelle). Les deux stimuli se succédaient toutefois dans le même emplacement, ce qui n'est pas le cas pour les deux syllabes dans l'Expérience 3a. Il semble que la présentation clairement séparée des deux syllabes, à la fois temporellement et spatialement, permette un traitement plus indépendant des deux syllabes. En revanche, la plus grande rapidité de déclenchement du premier mécanisme lui permet de se produire, même dans de telles conditions. Outre les précisions apportées sur les conditions de simultanéité favorables à la mise en jeu des relations d'inhibition latérale, cette expérience confirme donc aussi l'existence d'un mécanisme phonologique activateur plus précoce, basé sur la similarité de voisement entre des phonèmes, et que des conditions expérimentales très exigeantes permettent de mettre à jour ici. Il s'agit de notre premier argument au sujet d'un mécanisme phonologique rapide, transitoire, de type activateur et basé sur le voisement, chez des adultes bons lecteurs.

En bref, l'ensemble de ces expériences contribue à mettre en évidence l'existence de deux mécanismes phonologiques participant à l'identification des mots écrits chez les adultes bons lecteurs : un premier mécanisme facilitateur, précoce, entre unités-phonèmes et unités-traits phonologiques (relations inter-niveaux), qui laisserait place à un second

mécanisme d'inhibition latérale entre unités phonémiques (relations intra-niveau), plus tardif.

1.4. Argument supplémentaire pour un mécanisme phonologique facilitateur basé sur le voisement

L'expérience sur la ressemblance de voisement en production de parole présentée dans cette thèse (Expérience 4) a été elle aussi élaborée afin de limiter l'intervention du mécanisme phonologique inhibiteur pour offrir la possibilité d'étudier un mécanisme phonologique facilitateur supposé intervenir juste avant. Pour cela, nous avons utilisé un SOA très bref (33 ms) et une tâche imposant de fortes demandes attentionnelles. A la différence des expériences précédentes (Krifi, Bedoin & Herbillon, 2003 ; Krifi-Papoz, 2009), les participants devaient réaliser une tâche plus difficile : il ne s'agissait plus seulement que celle de seulement de reconnaître un mot cible (tâche de décision lexicale) ou de décider si une lettre cible était présente ou non dans le stimulus C₁VC₂V présenté précédemment. Ici, le lecteur devait identifier une consonne dans le pseudo-mot C₁VC₂V présenté très rapidement et masqué, et cette consonne devait être identifiée dans une syllabe spécifique (parfois la première, parfois la seconde syllabe), avant d'être prononcée.

L'étude de la nature des erreurs faites pour le rappel de C₂V montre que le voisement de la première consonne tend à être étendu à la seconde. Plus précisément, la proportion de réponses erronées préservant tout de même le voisement de la cible C₂ est significativement plus basse en cas de différence de voisement entre C₁ et C₂. En cas de différence de voisement entre les deux consonnes, le trait de voisement dans les réponses erronées pour C₂ est en effet le même que le trait de voisement de C₁ dans plus de 70% des réponses. Le même phénomène s'est produit pour le mode, mais à un moindre – et non significatif – degré, dans une autre expérience suivant la même procédure (Bedoin & Dos Santos, 2008). Cette différence entre les effets de ressemblance de mode et de voisement sera discutée plus loin (paragraphe 2 de la discussion générale). Ainsi, chez les adultes bons lecteurs de langue française, il semble qu'un amorçage phonologique activateur basé sur une ressemblance infra-phonémique (le partage du voisement, ou celui du mode d'articulation) intervient très vite, et avant tout effet phonologique inhibiteur, si l'on reprend les termes du modèles que nous avons proposé. Ce phénomène peut être interprété comme étant l'analogue d'une harmonie consonantique progressive.

Ce phénomène d'harmonie consonantique progressive peut être considéré comme source d'erreurs en lecture dans des stimuli écrits polysyllabiques. Ce mécanisme de bas niveau, qui étend le trait de voisement de la première consonne d'un stimulus vers une consonne située dans la syllabe suivante de ce stimulus, peut en effet expliquer une certaine proportion des erreurs pour le rappel de la deuxième syllabe, en particulier lorsque les deux consonnes à l'intérieur du stimulus CVCV diffèrent du point de vue du voisement. Face à ce phénomène générateur d'erreurs, l'élaboration de relations d'inhibition latérale basées sur les ressemblances infra-phonémiques entre phonèmes peut être considérée comme une solution efficace pour diminuer les erreurs de lecture. En effet, après le traitement de la première consonne, l'engagement des relations d'inhibition latérale peut désavantager le traitement des phonèmes qui viennent d'être favorisés de façon exagérée par le mécanisme d'harmonie consonantique. Cela permettrait de rétablir un équilibre favorable à une lecture plus précise. Devant la tendance à faire beaucoup d'erreurs de voisement, Rogers et Storkel (1998) suggèrent eux aussi qu'un modèle de production de la parole basé sur des relations

d'inhibition latérales devrait faire l'hypothèse de relations inhibitrices particulièrement fortes pour le voisement, afin de contrebalancer les erreurs les plus fréquentes.

Cependant, comme nous n'avons observé dans les expériences de cette thèse aucun signe d'implication de telles relations d'inhibition latérale entre phonèmes phonologiquement similaires ni chez les jeunes enfants normo-lecteurs (CE1) ni chez les enfants dyslexiques (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003), il semble que ces relations d'inhibition latérale soient associées à un apprentissage réussi de la lecture. Cet aspect raffiné de l'organisation phonologique peut être considéré comme une conséquence tardive et sophistiquée de l'expérience de lecture. Il pourrait participer à la réduction des erreurs de lecture dues à des mécanismes plus archaïques et de plus bas niveau.

Dans une étude précédente, nous avions tenté de favoriser l'élaboration (ou l'affinement) des connexions inhibitrices entre les phonèmes chez les enfants dyslexiques en les soumettant à un entraînement audio-visuel intensif centré sur le trait de voisement. En observant la configuration des effets de ressemblance de voisement dans la lecture de pseudo-mots CVCV avant et après le programme d'entraînement, et en comparant avec les résultats d'un groupe de dyslexiques contrôles qui n'avaient pas été soumis à l'entraînement, nous n'avions pas observé de signe d'implication des relations d'inhibition latérale avant l'entraînement. En revanche, après l'entraînement, la configuration des résultats des enfants dyslexiques dans l'épreuve de lecture de pseudo-mots CVCV avait changé et pouvaient s'expliquer par l'implication de relations d'inhibition latérale dont le poids était modulé par le partage du voisement (Bedoin, 2003 ; Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003 ; Krifi, Mérigot & Bedoin, 2002). Les résultats présentés dans ce travail de thèse suggèrent que l'élaboration des relations d'inhibition latérale entre phonèmes peut empêcher certaines erreurs de lecture. Cela a également été démontré chez les enfants dyslexiques, notamment ceux présentant une dyslexie avec trouble phonologique (Krifi-Papoz et al., 2007) : l'implication de relations d'inhibition latérale leur permettrait notamment d'éviter les erreurs de type confusion sourde / sonore. Le présent travail nous encourage donc à mettre en place des programmes d'entraînement qui permettraient de développer ou d'affiner ces relations d'inhibition latérale de façon à améliorer l'organisation des connaissances phonologiques et les performances en lecture.

Un dernier point semble important à signaler à partir des résultats des expériences de production de la parole. L'Expérience 4 a montré un effet de la ressemblance de voisement : la valeur du trait de voisement de la première consonne du stimulus CVCV tend à être étendue à la seconde consonne. En réalisant une expérience similaire mais en manipulant la similarité à partir du mode d'articulation, Bedoin et Dos Santos (2008) ont répliqué cet effet : la valeur du trait de mode de la première consonne (C_1) tend à être étendue à la seconde (C_2). Cependant, l'effet du mode n'atteint pas le seuil de significativité, contrairement à l'effet du voisement. Ainsi, la valeur du trait de mode de C_1 a moins d'impact sur C_2 que la valeur du trait de voisement. Cela peut être interprété comme un argument pour l'existence de différences quant au traitement des traits phonologiques en lecture, selon la catégorie des traits. Puisque la valeur du mode de C_2 est moins affectée que celle de son voisement, le mode semble être extrait de la lettre C_2 en priorité ou plus facilement que le voisement dans la tâche de lecture proposée. Cela expliquerait que le mode subisse moins les phénomènes d'harmonie progressive, que nous interprétons comme un effet d'amorçage. De plus, le pourcentage de préservation de chaque trait phonologique pour les syllabes présentées dans la condition « syllabe isolée » nous apprend que le trait de mode est mieux préservé que ceux de voisement et de lieu dans les réponses incorrectes. Ces

analyses qualitatives apportent une preuve supplémentaire à l'extraction prédominante du mode d'articulation dans les étapes précoces de traitement de stimuli écrits. Il semble donc exister une organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques impliquées en lecture (nous approfondirons ce point dans le paragraphe 2.2. de la discussion).

1.5. Organisation des connaissances phonologiques et dyslexie développementale

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes interrogées sur la sensibilité des enfants dyslexiques aux effets de similarité phonologique basée sur le partage de traits. Nous l'avons testée avec la même situation expérimentale que dans l'Expérience 1, où il s'agit d'identifier une lettre d'un pseudo-mot CVCV présenté brièvement. Les deux consonnes du stimulus partagent ou non le trait de voisement. La rapidité de présentation a été adaptée aux enfants. Les données recueillies indiquent la présence de deux types d'anomalies dans la sensibilité au partage de ce trait chez les enfants dyslexiques.

1.5.1. Anomalie du traitement phonologique en lecture, au niveau des traits ?

Les effets d'amorçage et de masquage entre C₁ et C₂ observés sur l'ensemble des enfants dyslexiques testés dans l'Expérience 1 ne permettent pas de penser qu'un niveau de connaissances sur des phonèmes organisés par des relations d'inhibitions latérales, dont le poids varierait en fonction des traits partagés, soit systématiquement intervenu. En effet, les résultats montrent que la ressemblance de voisement entre les deux consonnes n'inhibe pas le traitement de C₂ ; elle le facilite même, alors qu'elle ne facilite pas le traitement de C₁, ce qui est compatible avec l'intervention du premier mécanisme phonologique, décrit dans notre modèle comme un mécanisme activateur.

En cela, nos résultats diffèrent de ceux de Rebattel (2001) qui concluait à une absence de sensibilité des enfants dyslexiques à des ressemblances infra-phonémiques en lecture. Sa conclusion doit donc être modulée. Nous pensons que des enfants dyslexiques peuvent être sensibles aux ressemblances de voisement, tout au moins lorsque ces ressemblances concernent des lettres composant un même stimulus. Dans l'expérience de Rebattel, les stimuli entre lesquels les ressemblances étaient manipulées n'étaient pas les deux consonnes d'un même stimulus, mais les consonnes initiales de deux syllabes présentées successivement (et très rapidement) au même endroit sur l'écran, ce qui était sans doute trop difficile pour ces enfants, surtout du point de vue des traitements temporels posant vraisemblablement problème aux enfants dyslexiques.

La facilitation du traitement de C₂ en cas de partage de voisement, observée sur le groupe complet de dyslexiques, est un effet que nous avions déjà observé dans des travaux préalables et ils semblent témoigner d'une certaine immaturité dans le traitement de l'écrit. Ainsi, de meilleures performances en cas de ressemblance de voisement pour le traitement de C₂ ont été observées non seulement chez les dyslexiques testés dans notre thèse, mais aussi chez les enfants normo-lecteurs de CE1. Cet effet facilitateur produit par le partage de voisement disparaît dès le CE2 au profit d'un effet inhibiteur, qui se maintient en CM2 et chez l'adulte (Krifi, Bedoin & Herbillon, 2004). Aussi, considérés dans leur ensemble, les résultats des enfants dyslexiques de notre étude présentent une configuration proche de celle des enfants beaucoup plus jeunes (scolarisés en CE1), mais clairement différente de celle des enfants les plus proches pour l'âge (scolarisés en CM2). Un appariement précis des enfants dyslexiques de notre étude avec un groupe d'enfants

appariés en niveau de lecture et un groupe d'enfants appariés en âge chronologique est en cours et pourrait permettre de le confirmer. L'absence d'organisation des connaissances phonologiques à un niveau infra-phonémique selon des relations d'inhibition latérale chez les enfants dyslexiques permet en tout cas de penser que l'apprentissage réussi de la lecture n'est pas étranger à ce raffinement de l'organisation des connaissances phonologiques. Pour aller plus loin, considérés dans leur globalité, sans diagnostic différentiel du type de dyslexie, nous voyons qu'il serait possible de conclure, sans doute hâtivement, à une sensibilité des enfants dyslexiques à des similarités phonologiques extrêmement fines, infra-phonémiques. On pourrait aussi très vite conclure à un retard dans l'établissement d'une organisation phonologique (basée sur des inhibitions entre phonèmes) susceptible d'aider à contrer des erreurs de lecture induites par cette sensibilité initiale à la similarité phonologique et à des phénomènes d'harmonie progressive. Nous pouvons cependant moduler ces interprétations, grâce à une distinction établie entre deux types de dyslexiques dans notre échantillon.

1.5.2. Mais, deux types de dyslexie, deux configurations de résultats différentes

Dans la première partie (a- analyse globale) de l'Expérience 1 ainsi que dans de précédents travaux (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003 ; Bedoin & Krifi, 2005), les enfants dyslexiques ont été regroupés quel que soit leur type de dyslexie. Dans les deuxième et troisième parties (b- analyse différentielle, et c- appariement), nous nous sommes donnés les moyens de tester un éventuel effet du type de dyslexie, en procédant notamment à un appariement en âges chronologique et lexique des enfants dyslexiques avec troubles phonologiques et des enfants dyslexiques sans troubles phonologiques deux à deux. Cette analyse a montré que les deux groupes d'enfants dyslexiques produisaient deux configurations de résultats différentes.

1.5.3. Dyslexiques sans trouble phonologique : résultats similaires à ceux des enfants normo-lecteurs les plus jeunes (CE1)

Pour cette expérience, les enfants dyslexiques sans troubles phonologiques ont des résultats dont la configuration est distincte de celle des dyslexiques avec troubles phonologiques, mais ne diffère pas de celle des enfants normo-lecteurs de CE1 (voir Figure 7 du chapitre 1 ; Krifi, Bedoin & Herbillon, 2003). En effet, comme les jeunes lecteurs de CE1, les enfants dyslexiques sans troubles phonologiques identifient mieux C₂ lorsque C₁ et C₂ partagent la même valeur de voisement. En cela, ils se comportent comme les enfants normo-lecteurs plus jeunes mais de même niveau de lecture. Ce constat suggère que leur déficit, à ce niveau, relève d'un retard. Leurs données attestent la sensibilité à une ressemblance phonologique infra-phonémique (partage du voisement) en lecture, mais suggèrent qu'ils n'utilisent pas ou ne disposent pas d'une véritable organisation interne mature pour les unités phonémiques en termes de partage de traits phonologiques. Même lorsqu'elle n'a pas pour origine un trouble phonologique, la dyslexie entraîne donc apparemment une réduction des expériences de lecture, qui défavorise l'établissement d'une organisation des connaissances phonologiques, plus mature, plus fine, et plus propice à contrer les phénomènes de compétition en lecture.

1.5.4. Dyslexiques avec trouble phonologique : pas de sensibilité au partage de voisement

Les résultats ne montrent aucun effet de la ressemblance de voisement, ni sur C₁ ni sur C₂, que ce soit dans le sens d'une gêne ou d'une facilitation. Les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques ne semblent donc pas présenter de sensibilité à la ressemblance de voisement entre C₁ et C₂. Ces effets peuvent être interprétés d'une part en terme d'absence d'organisation des connaissances phonémiques selon des relations d'inhibition latérale : les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques, comme les dyslexiques de surface, ne paraissent pas disposer de connaissances sur les phonèmes organisées par de telles relations déterminées par la ressemblance de voisement. Mais dans leur cas, en plus, les relations phonologiques activatrices bi-directionnelles entre phonèmes et traits phonologiques ne semblent pas intervenir. En cela, les résultats des enfants dyslexiques avec troubles phonologiques diffèrent de ceux des enfants dyslexiques sans troubles phonologiques. Si le diagnostic différentiel du type de dyslexie n'avait pas été établi, il n'aurait pas été possible de découvrir cette différence qualitative concernant les mécanismes phonologiques chez ces deux types de patients. Ainsi, non seulement les relations intra-niveau (d'inhibition latérale) mais également les relations inter-niveaux (activatrices) ne seraient pas opérationnelles chez les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques. Par conséquent, les troubles phonologiques qui se manifestent en lecture chez ces enfants dyslexiques peuvent s'expliquer par une anomalie d'organisation à un niveau infra-phonémique, comme nous en avions fait l'hypothèse. Les enfants dyslexiques avec troubles phonologiques ont donc une sensibilité au partage de voisement différente de celle des enfants dyslexiques sans trouble phonologique : elle semble chez eux inexiste. L'un des prolongements de cette recherche sera de vérifier si les enfants dyslexiques présentent tout de même une sensibilité au partage d'autres catégories de traits, notamment ceux de mode d'articulation. Les résultats présentés ici apportent en tout cas un argument supplémentaire à la pertinence de la distinction entre les types de dyslexie chez l'enfant.

1.5.5. Pertinence en neuropsychologie clinique et en rééducation

Ces résultats peuvent avoir un intérêt dans la pratique clinique en neuropsychologie. En effet, dans un bilan, la détection d'effets produits par le mécanisme phonologique basé sur les inhibitions latérales constitue un indice potentiellement intéressant pour estimer l'efficacité et la maturité du système phonologique d'un lecteur, et permettrait de servir au diagnostic différentiel entre dyslexie avec trouble phonologique et dyslexie sans trouble phonologique.

Par ailleurs, la détection des effets produits par le mécanisme impliquant les relations d'inhibition latérale, leur absence, ou leur apparition après une prise en charge rééducative, pourrait être un indice pertinent pour apprécier l'amélioration de l'organisation des connaissances phonologiques de l'enfant dyslexique. Un outil de discrimination de phonèmes sur la base du voisement a d'ailleurs déjà été utilisé chez des enfants dyslexiques (Logiciel Play-On de Danon-Boileau et Barbier, 2003), sous la forme d'un entraînement audio-visuel intensif sur plusieurs semaines. Nous avons participé à l'évaluation de l'effet et de l'éventuel bénéfice d'un tel entraînement en proposant la tâche de détection de lettre dans un stimulus écrit CVCV de l'Expérience 1. Les enfants dyslexiques ont été divisés en deux groupes : l'un bénéficiait de l'entraînement, l'autre pas. Les enfants n'ayant pas bénéficié de l'entraînement ne sont pas affectés par la ressemblance de voisement entre les deux consonnes d'un même stimulus écrit. Les enfants ayant bénéficié de l'entraînement audio-visuel sur le trait de voisement ont montré par la suite une certaine sensibilité à la au partage de voisement par les deux consonnes (Krifi, Bedoin & Mérigot, 2003 ; Bedoin, 2003). Ces effets peuvent s'expliquer par l'intervention de relations d'inhibition latérale

entre phonèmes. L'entraînement semble donc contribuer à la mise en place progressive, mais encore incomplète, d'un tel système d'organisation des phonèmes chez les enfants dyslexiques.

2. Hiérarchie des catégories de traits phonologiques

D'un point de vue théorique, une idée récurrente dans notre recherche est la notion de catégories de traits phonologiques. Nous avons donc étudié les effets de similarité infra-phonémique en manipulant le partage de plusieurs types de traits, non seulement pour accorder une certaine généralité à nos conclusions, mais aussi pour apprécier des différences entre les effets produits selon la catégorie de trait, afin de justifier la pertinence de telles catégories du point de vue cognitif.

2.1. Sensibilité différente au partage de traits phonologiques en fonction du type de trait

Les Expériences 5a, 5b et 5c menées dans ce travail de thèse abordent un nouvel aspect des effets de ressemblance infra-phonémique en lecture. Il s'agit de comparer la sensibilité des lecteurs au partage de différents types de traits phonologiques par les consonnes de stimuli disyllabiques écrits, et non plus seulement à la ressemblance de voisement. L'objectif de l'Expérience 5a était de répliquer l'effet du partage de traits de voisement, l'Expérience 5b a permis de tester la sensibilité des lecteurs au partage du trait de mode. Contrairement aux expériences précédentes, la tâche imposera cette fois un codage très précis de la position des lettres. Dans les Expériences 1, 2 et 3, une réponse pouvait en effet être considérée comme correcte dès que le participant décidait que la lettre cible était présente dans le pseudo-mot qui la contenait. Il pouvait cependant fournir une telle réponse correcte en croyant avoir vu la lettre cible à un emplacement où elle n'était pourtant pas. Pour limiter ce problème, la cible est cette fois une syllabe présentée dans une position précise, et la question porte sur sa présence à cette place dans le pseudo-mot.

L'Expérience 5a a tout d'abord répliqué les effets de partage du trait de voisement par les deux consonnes d'un stimulus CVCV écrit dans une tâche imposant un traitement précis de la position de chaque lettre. Le partage du voisement a encore une fois ralenti l'identification de la deuxième consonne, selon un effet conforme à ce que prédit l'hypothèse de la mise en jeu de relations d'inhibition latérale au niveau phonémique (Bedoin & Krifi, 2009). Les résultats nous apprennent toutefois que cette ressemblance de voisement n'est pas toujours traitée de la même façon : le mode d'articulation des consonnes impliquées module cet effet. Ce résultat suggère donc un statut prépondérant du mode, qui est cohérent avec certaines données de la littérature : le mode est un critère majeur pour estimer la ressemblance entre deux consonnes entendues (Peters, 1963), ou pour les discriminer (Stevens, 2002).

L'Expérience 5b, testant directement la sensibilité des lecteurs au partage du trait de mode, montre que la ressemblance de mode est gênante pour l'identification de la deuxième consonne du stimulus, même si cette fois les consonnes se ressemblent du point de vue du voisement. Cet effet peut être lui aussi interprété par la mise en jeu de relations inhibitrices entre phonèmes de même mode. Cela apporte donc un argument en faveur de la mise en jeu d'une organisation des connaissances phonémiques basées sur des relations d'inhibition

latérale déterminées par des caractéristiques infra-phonémiques. La comparaison entre les Expériences 5a et 5b montre que l'effet du mode est prépondérant par rapport à celui du voisement, car il ne dépend pas du voisement de la cible, alors que l'effet du voisement est modulé par le mode de la consonne cible (Expérience 5a). Les deux Expériences 5a et 5b ne testaient les effets de ressemblance infra-phonémique que pour les catégories Voisement et Mode ; l'Expérience 5c comparait des effets de ressemblance de lieu, de mode et de voisement entre les deux consonnes présentées, pour découvrir des éléments sur une éventuelle hiérarchie.

Dans l'Expérience 5c, l'identification de C_2 est perturbée si la consonne qui la précède partage le même mode ou le même lieu. L'effet du mode est donc encore confirmé, et celui du lieu s'y ajoute. Pour ce qui est du traitement de C_1 , nous avons observé que l'effet du mode n'atteint pas le seuil de significativité, mais va dans le sens d'une facilitation, prédictive par le modèle impliquant un mécanisme phonologique inhibiteur (qui réduit les effets de masquage). La ressemblance phonologique n'a donc pas le même effet selon le rang de la consonne cible. Ces résultats peuvent être interprétés en termes de connaissances sur les phonèmes organisées selon des relations d'inhibition latérale. En effet, la mise en place de ces relations intra-niveau produirait un effet négatif de la ressemblance de mode sur la deuxième consonne. Le traitement de la deuxième consonne est alors rendu difficile, et son effet négatif de masque est supposé se réduire et moins affecter l'identification de la première consonne (Bedoin & Krifi, 2008 ; Bedoin, 2003).

Dans cette expérience, l'effet du mode est très fort, plus fort que celui du lieu. L'effet de la ressemblance de mode sur C_2 explique une plus grande part de la variance que l'effet de la ressemblance de lieu. En revanche, nous retrouvons peu d'effet de la ressemblance de voisement entre les deux consonnes du stimulus dans cette expérience. Il se peut que cette absence soit due au contexte particulier dans lequel le voisement est ici manipulé. En effet, l'Expérience 5a testait également l'effet de la ressemblance de voisement, mais les consonnes partageaient le même mode à la base. Nous trouvions alors un effet significatif du voisement. Par contre, dans l'Expérience 5c, les deux consonnes ne partagent qu'un seul trait phonologique : lorsque C_1 et C_2 partagent le même voisement, elles ne partagent pas le même mode en plus. Dans cette condition, nous ne retrouvons plus d'effet significatif du voisement. Par conséquent, si deux consonnes ne partagent que le voisement, en l'absence de ressemblance de mode, cela n'entraîne pas de difficulté particulière pour identifier la deuxième consonne. Cette observation va dans le sens d'une certaine dépendance des effets de voisement par rapport à des caractéristiques de mode. C'est ce que suggéraient déjà les résultats de l'Expérience 5a. Cette dépendance présentée par le traitement du voisement par rapport aux caractéristiques de mode d'articulation du phonème suggère une hiérarchie entre ces types de traits, le voisement étant en cela subordonné au mode. Cette dépendance est cohérente avec celle qui a été observée par ailleurs, dans des épreuves de détection d'erreurs de prononciation en anglais et en néerlandais (Warner et al., 2005).

Les effets de telles ressemblances sur les performances dans une tâche requérant une identification précise des lettres dans leur position, sont par conséquent compatibles avec les prédictions basées sur un modèle décrivant une organisation des phonèmes selon des relations d'inhibition latérale dont le poids varierait en fonction des traits phonétiques partagés (Bedoin, 2003). De telles relations semblent mises en jeu lorsque deux consonnes d'un stimulus CVCV partagent soit le même mode (Expériences 5b et 5c), soit le même lieu (Expérience 5b), soit le même voisement (Expérience 5a) mais à condition que le mode soit aussi le même. En effet, dans ces trois conditions, les sujets identifient moins facilement et moins rapidement la deuxième consonne lorsque les différences phonétiques sont moins

marquées, c'est-à-dire en cas de ressemblance phonologique avec la première consonne. Toutefois, nous ne relevons aucun indice d'un effet de relations d'inhibition latérale basées sur le voisement lorsque les deux consonnes ne se ressemblent que par le voisement (Expérience 5c).

Nous pouvons donc avancer quatre arguments en faveur d'une organisation hiérarchique des traits phonologiques en lecture, dans laquelle le mode serait au-dessus du voisement. Le premier argument est issu de l'Expérience 5a : l'effet négatif de la ressemblance de voisement pour le traitement de C₂ se limite aux consonnes occlusives, il est donc dépendant des caractéristiques de mode. Le deuxième argument est issu de la comparaison entre les résultats des Expériences 5a et 5c : l'effet du voisement dépend de la présence ou non d'une ressemblance de base en terme de mode. Le troisième argument est l'indépendance de l'effet de partage de mode par rapport aux caractéristiques de base des consonnes concernées en terme de voisement. Le quatrième argument est l'importance de la taille de l'effet du partage de mode par rapport à la taille des effets de partage d'autres traits (Expérience 5c). Les différents types de traits ne semblent donc pas être traités de la même manière : nous trouvons des effets explicable par l'intervention de relations d'inhibition latérale en cas de ressemblance de mode, de lieu ou de voisement, mais ces effets sont plus systématiques pour le mode. Nous montrons que les phénomènes d'inhibition liées à la similitude phonologique en lecture sont plus forts s'ils reposent sur les traits de mode que sur les traits de voisement, comme le montrent également Rogers et Storkel (1998) en production de parole.

L'ensemble de ces résultats est cohérent avec ceux d'autres travaux menés dans l'équipe (Bedoin & dos Santos, 2008 ; Bedoin & Krifi, 2009) et avec d'autres données de la littérature qui montrent un statut prédominant de la catégorie de mode. Rogers et Storkel (1998) montrent en effet en production de parole que la ressemblance infra-phonémique entre les mots à prononcer est source d'erreurs, et que le mode a justement une importance particulière à cet égard. De la même manière, Stevens (2002) montre que le mode est un critère majeur pour discriminer deux consonnes entendues. Dans d'autres études en clinique, le mode est le trait le mieux préservé en cas d'aphasie (Gow et Caplan, 1996).

2.2. Mise en évidence d'une organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques chez les bons lecteurs

Afin de tester la pertinence de telles catégories pour le système cognitif et leur éventuelle organisation hiérarchique, nous avons élaboré une épreuve métalinguistique permettant d'évaluer si les participants faisaient des rapprochements entre des consonnes simplement sur la base du nombre de traits partagés ou si le partage de traits relevant de l'une ou l'autre de ces catégories introduisait des biais dans les choix. Le principe est de proposer une syllabe CV cible écrite, puis deux autres syllabes. La syllabe cible doit être appariée à l'une des deux autres en fonction de la proximité de leurs représentations phonologiques. La cible partage toujours un seul trait avec chacune des syllabes proposées. Dans trois blocs séparés, les deux propositions partagent avec la cible des traits de catégories différentes.

Le point le plus marquant dans les résultats des adultes est le privilège accordé à la ressemblance de mode d'articulation entre les consonnes des syllabes CV présentées, que ce soit en modalité visuelle ou en modalité audio-visuelle. Cela conduit à proposer de placer ce type de trait au sommet de la hiérarchie des catégories étudiées. A l'issue de notre expérience, plusieurs arguments peuvent en effet être avancés au sujet de ce statut privilégié. Tout d'abord, les choix d'appariement de syllabes se sont fait plus fréquemment en

fonction du mode qu'en fonction de l'ensemble des autres critères proposés en concurrence. De plus, la concurrence exercée par la présence d'une ressemblance de mode est toujours plus forte que celle qu'exerce le partage de tout autre trait. Les deux autres catégories de traits sont choisies moins fréquemment que le hasard ne permettrait de le prédire, ce qui souligne encore l'importance accordée implicitement à la ressemblance de mode dans cette expérience. De plus, le privilège accordé à la ressemblance de mode se reflète de façon homogène dans les choix d'appariement conduisant à rapprocher aussi bien deux consonnes occlusives que deux consonnes fricatives. Ces deux traits sont traités dans l'expérience avec une importance qui ne diffère jamais. La prédominance du mode sur le lieu et le voisement retrouvée dans cette expérience est en accord avec les modèles plaçant le mode au sommet d'une hiérarchie de catégories de traits dans la mesure où il définit la représentation d'un segment à l'intérieur d'une syllabe (Van der Hulst, 2005), et dans la mesure où il sert de base, en tant que trait « *articulator-free* », à la discrimination des traits « *articulator-bound* » que sont le lieu et le voisement (Stevens, 2002).

Des rapports hiérarchiques se profilent aussi entre les traits de lieu et de voisement, qui ne prennent cependant jamais le pas sur les traits de mode. Plusieurs indices suggèrent que le partage du trait de lieu est un critère plus suivi que le partage du trait de voisement pour la tâche d'appariement de consonnes lorsque la modalité de présentation est seulement visuelle. Ce résultat est en accord avec les données de Hebben (1986), qui montre que le lieu d'articulation aurait un statut plus important que le voisement. En présence d'une ressemblance de mode, la ressemblance de lieu exerce une attraction plus importante que la ressemblance de voisement. Lorsque les ressemblances de lieu et de voisement sont directement comparées dans le bloc Voisement-Lieu, les adultes effectuent davantage d'appariements selon le lieu. Cette préférence ne s'explique pas par un trait de lieu en particulier, qu'il soit labial, dental ou vélo-palatal. Bien qu'elle soit moins marquée que la préférence pour le mode, notamment selon les indications fournies par la comparaison de la taille des effets, la préférence pour la ressemblance de lieu plutôt que de voisement se dessine donc à travers les résultats des adultes en modalité visuelle. Ces résultats sont en contradiction avec certaines données de la littérature accordant un statut important au voisement, comme les travaux de Miller et Nicely (1955) qui montrent la robustesse du voisement en perception de parole dans le bruit, ou encore ceux de Peters (1963) et Jaeger (1992) qui mettent en évidence le rôle primordial du voisement respectivement en jugement de similarité et dans les productions d'enfants où les erreurs de substitution de lieu sont les erreurs de « *langue qui a fourché* » les plus fréquentes. Néanmoins, les données de la littérature concernant le poids des catégories de lieu et de voisement sont encore équivoques. En effet, Miceli et al. (1978) montrent que les participants sont plus sensibles au lieu qu'au voisement dans des tâches de discrimination en perception de parole, alors que des tâches de jugement de similarité de paires de consonnes ont montré que le voisement contribuait soit également (Perecman et Kellar, 1981) soit davantage à ce jugement que le lieu (Peters, 1963). Ces résultats controversés sont certainement en lien avec le type de tâche demandée. Dans la tâche proposée ici, les résultats à propos du lieu et du voisement varient en fonction de la modalité de présentation (visuelle ou audio-visuelle).

En effet, en modalité audio-visuelle, le lieu perd de son attractivité par rapport au voisement : les rapports hiérarchiques entre voisement et lieu sont moins évidents qu'en modalité purement visuelle. Cette perte d'attractivité du lieu se fait au profit du voisement, en particulier lorsque le trait est sonore. Cela suggère que les rapports hiérarchiques entre le lieu et le voisement ne sont pas complètement stables, en tout cas moins nettement que pour le mode qui apparaît clairement au sommet de la hiérarchie.

Par conséquent, si des effets de similarité basés sur le partage de traits phonologiques se produisent en lecture pour les trois catégories de traits étudiées (Expériences 5a, 5b et 5c), notre recherche a aussi apporté des arguments pour montrer que cette typologie des traits est cognitivement pertinente, et une organisation hiérarchique des catégories de traits semble même se dégager, dans les situations de lecture (Expériences 6a et 6b). Les inhibitions latérales basées sur le trait de voisement sont apparues comme les plus rapides, mais cette supériorité n'est que d'ordre temporel. Les inhibitions les plus fortes et les plus systématiques sont en effet basées sur le mode. Les effets de lieu d'articulation sont moins systématiques, mais tout de même davantage que les effets de voisement. Les adultes bons lecteurs élaboreraient donc une organisation des phonèmes intégrant des relations d'inhibition latérale dont le poids varie selon le type de trait phonologique partagé. Des données recueillies dans les expériences d'appariement de syllabes, en modalités visuelle et audio-visuelle, ont permis de confirmer que les traits de mode, de lieu d'articulation et de voisement ont des statuts cognitifs différents, ce qui confirme la pertinence cognitive de cette typologie des traits. Le mode d'articulation semble la catégorie la plus organisatrice chez les adultes et les enfants normo-lecteurs, qui l'utilisent de manière privilégiée pour rapprocher des syllabes. La hiérarchie des catégories de traits comme critère d'organisation des consonnes s'établit toutefois progressivement chez les enfants, pendant la période où ils apprennent à lire.

La hiérarchie des catégories de traits est en effet plus marquée chez les adultes que chez les enfants normo-lecteurs. Cette hiérarchie continue donc à se mettre en place au-delà de 8 ans. Néanmoins, certains aspects de cette hiérarchie sont déjà présents, bien qu'atténués, chez les enfants de CE1, CE2 et les deux groupes d'enfants dyslexiques, et les résultats de ces épreuves révèlent une anomalie de l'organisation des catégories de traits chez les enfants dyslexiques phonologiques.

Dans le cas des lecteurs les plus jeunes de notre étude (scolarisés en CE1), les indices de hiérarchie entre les catégories de lieu, de mode et de voisement sont encore faibles, d'après les appariements réalisés. Deux phénomènes différencient cependant déjà leurs réponses du hasard : le partage du mode est pour eux attractif, alors que le partage du voisement l'est particulièrement peu. A cet âge, nous ne retrouvons toutefois pas de différence significative entre les concurrences exercées par l'une ou l'autre des ressemblances manipulées. Il n'y a donc pas de hiérarchie vraiment claire en CE1. Puis la dominance du mode s'affirme en CE2, y compris dans les analyses comparant la force de concurrence exercée par ce trait et par d'autres. La dominance du mode s'affirme ainsi en CE2, tout d'abord par rapport au voisement. En cela, nos résultats contredisent l'hypothèse de Jaeger (1992) qui décrit le voisement comme un critère d'organisation plus important chez les jeunes lecteurs que chez les adultes. Cette différence pourrait s'expliquer par la différence de langue entre les enfants des deux études. En revanche, une sensibilité précoce à la ressemblance infra-phonémique basée sur le mode a été montrée chez des enfants de 9 mois (Jusczyk et al., 1999), et nos résultats montrent que le premier type de trait émergeant dans l'appariement de syllabes écrites chez des enfants de CE2 est aussi le mode. Chez les enfants de CE1, la catégorie de mode n'est pas aussi homogène que chez les enfants de CE2 et les adultes, puisque le mode n'est pas préféré indépendamment de la valeur du trait de mode (occlusif ou fricatif) partagé par les consonnes. Dès le CE2, les réponses sont toutefois déjà homogènes pour ces deux valeurs de mode. Par ailleurs, comme l'attraction par le lieu ne diffère ni de celle du mode, ni de celle du voisement en CE1 et CE2, le lieu aurait à cet âge un statut intermédiaire, qui se maintient chez les adultes où la hiérarchie Mode-Lieu-Voisement est plus nettement dessinée.

Les cinq dernières expériences conduites permettent donc d'apporter des éléments en faveur de différences qualitatives entre les types de traits phonologiques et d'une probable organisation hiérarchique concernant les connaissances phonologiques décrites en termes de traits. Toutefois, la pertinence de ces catégories de traits n'implique pas leur indépendance, en terme de fonctionnement. En effet, nous avons vu que, lorsque le partage du voisement par deux consonnes d'un stimulus entrave le traitement de la consonne C₂ seulement si elles partage également le mode d'articulation.. L'effet de ressemblance phonologique pour le voisement est donc modulé par le mode. Ainsi, tous les traits phonétiques ne sont pas traités de façon équivalente ni indépendante en lecture. Seul l'effet du mode, intervenant indépendamment de toute autre ressemblance infra-phonémique, semble particulièrement stable et prégnant. La catégorie de lieu d'articulation vient ensuite, puisque les inhibitions basées sur ce type de trait interviennent également indépendamment mais de façon moins forte que pour le mode. Enfin, le rôle de la catégorie de voisement paraît moins prégnant concernant ces effets d'inhibition, et donc comme critère de rapprochement de deux consonnes, puisqu'il dépend d'une ressemblance initiale de mode. L'engagement des relations d'inhibition latérale basées sur le voisement des phonèmes dépend donc de la ressemblance des phonèmes pour d'autres types de traits. Ces résultats à propos du mode et du voisement sont conformes à ceux de Rogers et Storkel (1998) qui trouvaient également que la ressemblance de mode conduisait particulièrement souvent à un effet inhibiteur lors de l'identification (et de la prononciation) d'une consonne écrite placée en deuxième position dans une liste. Ils observaient en effet que les temps de production étaient significativement plus longs en cas de ressemblance de mode ou de voisement et de mode qu'en cas de seule ressemblance de voisement. Selon eux, les phénomènes d'inhibition liés à la similitude phonologique sont plus forts s'ils reposent sur les traits de mode que sur les traits de voisement. Ils placent donc le mode au sommet de la hiérarchie des catégories phonologiques dans une situation de lecture à haute voix.

Dans la littérature, d'autres travaux montrent des effets différents en fonction de la catégorie de traits phonologiques, mais également une prédominance de certaines catégories, notamment la catégorie de mode. Par exemple, la restriction des erreurs de substitution de phonèmes chez les patients aphasiques au voisement, au mode ou au lieu (Blumstein, 1990), et la perturbation sélective de discrimination de voisement ou de lieu (Caplan, & Aydelott Utman, 1994 ; Miceli et al., 1978 ; Oscar-Berman, Zurif & Blumstein, 1975) suggèrent que les traits phonétiques s'organisent en catégories naturelles. Bien que leur organisation hiérarchique soit encore controversée, la catégorie de mode est proposée comme prédominante dans la définition d'un segment à l'intérieur d'une syllabe dans un modèle linguistique (Van der Hulst, 2005). De plus, selon Stevens (2002), l'identification des traits « articulator-free » (pour lui, mode et sonorité) est à la base de l'identification des traits « articulator-bound » (lieu et voisement). C'est-à-dire que l'évaluation de mode constituerait la base essentielle pour discriminer ensuite les traits relevant du lieu ou du voisement. Cette idée est cohérente avec la meilleure discrimination des traits « articulator-free » plutôt que des traits « articulator-bound » observée chez les patients aphasiques (Gow & Caplan, 1996), avec une meilleure préservation du mode dans des conditions d'écoute dans le bruit (Wang & Bilger, 1973), et avec une plus forte sensibilité des bébés de 9 mois à la ressemblance de mode plutôt qu'à la ressemblance de lieu dans des syllabes présentées séquentiellement (Jusczyk, Goodman & Baumann, 1999). Par ailleurs, Peters (1963) montre que le mode d'articulation est le critère majeur pour estimer la ressemblance entre deux consonnes entendues, suivi du voisement, puis du lieu. Nos résultats rejoignent donc certains éléments de la littérature sur la place privilégiée du mode dans la hiérarchie des catégories de traits phonologiques.

2.3. Anomalie dans l'organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques chez les enfants dyslexiques

L'objectif de l'Expérience 6b était de préciser les spécificités de l'organisation des catégories de traits phonologiques des enfants dyslexiques par rapport à celles d'enfants ne présentant pas leurs difficultés. Des perturbations de l'organisation hiérarchique des catégories de traits sont apparues chez eux, dans des épreuves métaphonologiques. Les résultats de nos expériences d'appariement de syllabes montrent des anomalies particulièrement marquées chez les enfants présentant une dyslexie de type phonologique plutôt qu'une dyslexie de type surface.

Chez les enfants dyslexiques de surface, la ressemblance de mode est plus attractive que la ressemblance de voisement, mais aussi que la ressemblance de lieu. Ces indices d'un attrait particulier pour le mode d'articulation montrent un début d'organisation des connaissances sur les traits phonologiques chez ces enfants. Comme les dyslexiques phonologiques et les enfants les plus jeunes, les dyslexiques de surface ne laissent pas de côté la ressemblance de lieu, comme le font plus tard les adultes. Nous n'avons pas pour l'instant les moyens de savoir quand, exactement, l'attraction par le partage de lieu s'amoindrit lors d'un développement typique (il faudrait pour cela tester des enfants normo-lecteurs plus âgés). Chez les dyslexiques de surface, les ressemblances de lieu et de voisement ne semblent pas (encore) avoir de poids différent. Dans cette forme de dyslexie, la hiérarchie des types de traits est immature essentiellement sur cet aspect : c'est une anomalie qui les distingue des dyslexiques phonologiques.

Le résultat le plus surprenant apparaît chez les dyslexiques phonologiques, chez qui les rapports hiérarchiques des catégories sont plus atypiques, avant tout parce que la ressemblance de mode ne domine ni la ressemblance de lieu, ni la ressemblance de voisement. Cette relative insensibilité au mode est particulièrement visible dans les cas de choix entre les ressemblances de mode et de lieu : les dyslexiques phonologiques sont le seul groupe pour lequel le mode n'est pas alors choisi. Il semble donc que les dyslexiques phonologiques accordent trop peu d'importance au mode, sans doute parce que le lieu est un aspect phonologique pour eux trop central. C'est ce que confirme l'analyse comparant l'effet de concurrence exercée par le partage du lieu ou du voisement, la ressemblance de lieu apparaissant alors comme excessivement attractive, même par rapport aux effets chez l'adulte. Ces résultats confortent donc l'idée d'une prégnance particulièrement forte de la ressemblance de lieu pour les dyslexiques phonologiques, et d'une sensibilité anormalement faible à la ressemblance de mode.

Nous montrons donc une organisation différente des trois catégories de traits phonologiques chez les enfants dyslexiques, et des anomalies particulièrement marquées chez les enfants présentant une dyslexie de type phonologique plutôt qu'une dyslexie de type surface. Nous apportons ainsi un argument supplémentaire à la pertinence de la distinction entre les types de dyslexie chez l'enfant, dans la mesure où les enfants dyslexiques phonologiques présentent une organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques différente de celle des enfants dyslexiques de surface.

Ce travail de thèse met donc en évidence des différences, en fonction du type de dyslexie, quant aux anomalies des traitements et de l'organisation des connaissances phonologiques. Cela a un intérêt sur le plan clinique en neuropsychologie pour le diagnostic différentiel entre dyslexie avec trouble phonologique et sans trouble phonologique. Des outils, utilisant et étudiant les mécanismes phonologiques que nous décrivons tout au long

de ce travail de thèse, pourraient être développés et servir de tests neuropsychologiques dans la pratique clinique.

Conclusion

Nos douze expériences, menées auprès d'adultes, d'enfants normo-lecteurs et d'enfants dyslexiques, ont contribué à étudier le rôle des connaissances phonologiques dans le processus de reconnaissance de mot écrit. Elles ont permis de décrire la nature du code impliqué et de comprendre les mécanismes par lesquels les connaissances phonologiques interviennent en lecture. Les premières étapes du processus de reconnaissance de mot écrit impliqueraient un code phonologique suffisamment fin pour être décrit en termes de traits phonologiques. Nous proposons dans cette thèse un modèle de lecture articulant deux mécanismes basés sur les traits phonologiques : un mécanisme impliquant des relations activatrices entre les phonèmes et les traits phonologiques, et un mécanisme de relations d'inhibition latérale entre phonèmes partageant des traits phonologiques.

Le prolongement de notre réflexion sur le rôle des traits phonologiques en lecture chez les adultes bons lecteurs a permis de mieux connaître le décours temporel des deux mécanismes phonologiques proposés dans le modèle : le mécanisme activateur intervient plus rapidement que celui impliquant les relations d'inhibition latérale. Un deuxième résultat important de cette recherche est la mise en évidence du rôle de la présence simultanée de plusieurs syllabes écrites sur l'engagement de ces mécanismes. Nous avons fait le choix d'étudier les deux mécanismes phonologiques en manipulant le partage de traits phonologiques par deux consonnes d'un stimulus écrit disyllabique, afin de se rapprocher d'une situation de lecture normale. Nous avons montré que ce choix n'est pas méthodologiquement anodin, car dans un tel contexte la mise en œuvre de relations d'inhibition latérale est favorisée par la concurrence directe et d'emblée évidente entre les lettres en présence. En effet, il est apparu qu'une présentation successive de chacune des syllabes n'encourage pas le développement du mécanisme basé sur les relations d'inhibition latérale et permet un traitement plus indépendant des deux syllabes, en tout cas lorsqu'elles sont présentées à des emplacements distincts.

La réflexion engagée dans cette thèse à propos des mécanismes phonologiques impliqués en lecture nous a aussi conduite à proposer une justification à l'existence de deux mécanismes phonologiques. Le mécanisme phonologique de type activateur, basé sur des relations activatrices entre phonèmes et traits phonologiques, serait à l'origine d'effets analogues au phénomène d'assimilation ; nous l'avons montré grâce à une épreuve de lecture à voix haute de l'une des syllabes d'un stimulus CVCV. De telles assimilations seraient sources d'erreurs d'identification des lettres et la mise en place de relations d'inhibition latérale serait un moyen efficace, mis en œuvre par le système cognitif, pour contrer les effets néfastes de ce biais. C'est pourquoi, dans un bilan, la détection d'effets produits par le mécanisme phonologique basé sur les inhibitions latérales constitue un indice potentiellement intéressant pour estimer l'efficacité et la maturité du système phonologique d'un lecteur. L'apprentissage de la lecture, et ses exigences importantes en termes de précision et d'organisation des connaissances phonologiques, pourrait bien être le principal moteur de la mise en place de ce raffinement particulier de la structure des unités phonologiques. L'absence de ce mécanisme chez des enfants en grande difficulté avec la lecture pourrait permettre un regard nouveau sur l'enfant dyslexique et ses difficultés phonologiques.

D'un point de vue plus théorique, une idée récurrente dans notre recherche est la notion de catégories de traits phonologiques. Nous avons étudié les effets de similarité infra-phonémique en manipulant le partage de plusieurs types de traits, non seulement pour accorder une certaine généralité à nos conclusions, mais aussi pour apprécier des différences entre les effets produits selon la catégorie de trait, afin de justifier la pertinence de telles catégories du point de vue cognitif. Nous avons ainsi pu montrer que les deux mécanismes phonologiques proposés dans notre modèle interviennent non seulement lorsque les stimuli partagent des traits de mode ou de lieu d'articulation, mais aussi quand ils partagent le voisement. L'implication des relations d'inhibition latérale basées sur le voisement semble cependant tellement rapide, qu'il faut utiliser des situations expérimentales particulièrement exigeantes pour recueillir les indices d'un mécanisme phonologique antérieur, et apparemment très vite masqué par le suivant.

Si des effets de similarité basés sur le partage de traits phonologiques se produisent en lecture pour les trois catégories de traits étudiées, notre recherche a aussi apporté des arguments pour montrer que cette typologie des traits est cognitivement pertinente, et une organisation hiérarchique des catégories de traits semble même se dégager, dans les situations de lecture. Les inhibitions latérales basées sur le trait de voisement sont apparues comme les plus rapides, mais cette supériorité n'est que d'ordre temporel. Les inhibitions les plus fortes et les plus systématiques sont en effet basées sur le mode. Les effets de lieu d'articulation sont moins systématiques, mais tout de même davantage que les effets de voisement. Les adultes bons lecteurs élaboreraient donc une organisation des phonèmes intégrant des relations d'inhibition latérale dont le poids varie selon le type de trait phonologique partagé. Des données recueillies dans des expériences d'appariement de syllabes, en modalités visuelle et audio-visuelle, ont permis de confirmer que les traits de mode, de lieu d'articulation et de voisement ont des statuts cognitifs différents, ce qui confirme la pertinence cognitive de cette typologie des traits. Le mode d'articulation semble la catégorie la plus organisatrice chez les adultes et les enfants normo-lecteurs, qui l'utilisent de manière privilégiée pour rapprocher des syllabes. La hiérarchie des catégories de traits comme critère d'organisation des consonnes s'établit toutefois progressivement chez les enfants, pendant la période où ils apprennent à lire.

Enfin, cette thèse vise à mieux comprendre la nature de certains troubles phonologiques chez les enfants dyslexiques, à préciser certaines anomalies de leurs représentations au niveau infra-phonémique, tout en tenant compte de disparités possibles dans ces anomalies selon le type de dyslexie. Dans de précédents travaux, nous avions montré des effets de partage de traits phonologiques à l'intérieur d'un stimulus écrit unique chez des adultes bons lecteurs et chez les enfants normo-lecteurs dès le CE2. Dans cette thèse, nous montrons que les enfants dyslexiques présentent sur ce plan deux types d'anomalies. Les résultats montrent que les enfants dyslexiques avec trouble phonologique pourraient présenter une absence de sensibilité au partage de traits phonologiques par des consonnes successives en lecture, alors que le déficit des enfants dyslexiques sans trouble phonologique ne serait pas aussi radical. Ils pourraient par exemple ne souffrir que d'un retard dans l'établissement d'une organisation phonologique basée sur des inhibitions latérales. Enfin, des perturbations de la mise en place de l'organisation hiérarchique des catégories de traits phonologiques ont également été mises en évidence chez les enfants dyslexiques, dans des épreuves métaphonologiques. Les résultats d'expériences d'appariement de syllabes montrent en effet que ces enfants présentent une organisation atypique des trois catégories de traits étudiés (voisement, mode et lieu d'articulation), et des anomalies particulièrement marquées sont relevées chez les enfants présentant une dyslexie de type phonologique plutôt qu'une dyslexie de type surface.

Ce travail de thèse met donc en évidence des différences, en fonction du type de dyslexie, dans les anomalies des traitements phonologiques présentées par les enfants dyslexiques. Cela a un intérêt sur le plan clinique en neuropsychologie pour le diagnostic différentiel entre dyslexie avec trouble phonologique ou sans trouble phonologique. Des outils, utilisant et étudiant les mécanismes phonologiques que nous décrivons tout au long de ce travail de thèse, pourraient être développés et pourraient servir de tests neuropsychologiques dans la pratique clinique.

Références bibliographiques

- Adlard, A., & Hazan, V. (1998). Speech perception in children with specific reading difficulties (Dyslexia). *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51(1), 153-177.
- Ahissar, M., Protopapas, A., Reid, M., & Merzenich, M. M. (2000). Auditory processing parallels reading abilities in adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97, 6832-6837.
- Alexander, A. W., Anderson, H. G., Heilman, P. C., Voeller, K., & Torgesen, J. (1991). Phonological awareness training and remediation of analytic decoding deficits in a group of severe dyslexics. *Annals of Dyslexia*, 41, 193-206.
- Alvares, C. J., Carreiras, M., & Taft, M. (2001). Syllables and morphemes: Contrasting frequency effects in Spanish. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 27(2), 545-555.
- Amitay, S., Ben-Yehudah, G., Banai, K., & Ahissar, M. (2002). Disabled readers suffer from visual and auditory impairments but not from a specific magnocellular deficit. *Brain*, 125, 2272-2285.
- Anderson, J. L., Morgan, J. L., & White, K. S. (2003). A statistical basis for speech sound discrimination. *Language and Speech*, 46, 155-182.
- Andruski, J., Blumstein, S. E., & Burton, M. (1994). The effect of subphonetic differences on lexical access. *Cognition*, 52, 173-187.
- Ans, B., Carbonnel, S., & Valdois, S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological Review*, 105(4), 678-723.
- Ashby, J. (2010). Phonology is fundamental in skilled reading: Evidence from ERPs. *Psychonomic Bulletin Review*, 17(1), 95-100.
- Ashby, J., & Martin, A. E. (2008). Prosodic phonological representations early in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception, and Performance*, 34(1), 224-236.
- Ashby, J., Sanders, L. D., & Kingston, J. (2009). Skilled readers begin processing subphonemic features by 80 ms during visual word recognition: Evidence from ERPs. *Biological Psychology*, 80, 84-94.
- Aslin, R. N., Pisoni, D. B., Hennessy, B. L., & Perey, A. V. (1981). Discrimination of voice onset time by human infants: New findings and implications for the effect of early experience. *Child Development*, 52, 1135-1145.
- Baddeley, A.D. (1968). How does acoustic similarity influence short-term memory? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20, 249-264.
- Baddeley, A. D. (1966). Short term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic and formal similarity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18, 362-365.

- Baddeley, A. D., Gathercole, S. E., & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105, 158-173.
- Bailey, T. M., & Hahn, U. (2005). Phoneme similarity and confusability. *Journal of Memory and Language*, 52, 339-362.
- Bailey, T. M., & Hahn, U. (2001). Determinants of wordlikeness: Phonotactics or lexical neighborhoods? *Journal of Memory and Language*, 44, 568-591.
- Bailey, C. E., Manis, F. R., Pederson, W. C., & Seidenberg, M. S. (2004). Variation among developmental dyslexics: Evidence from a printed-word-learning task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(2), 125-154.
- Bailey, T. M., & Plunkett, K. (2002). Phonological specificity in early words. *Cognitive Development*, 17, 1265-1282.
- Baker, E., Blumstein, S.E., & Goodglass, H. (1981). Interaction between phonological and semantic factors in auditory comprehension. *Neuropsychologia*, 19(1), 1-15.
- Baldeweg, T., Richardson, A., Watkins, S., Foale, C., & Gruzelier, J. (1999). Impaired auditory frequency discrimination in dyslexia detected with mismatch evoked potentials. *Annals of Neurology*, 45, 495-503.
- Baron, J. (1973). Phonemic stage not necessary for reading. *Quartely Journal of Experimental Psychology*, 25, 241-246.
- Bailey, C. E., Manis, F. R., Pedersen, W. C., & Seidenberg, M. S. (2004). Variation among developmental dyslexics: Evidence from a printed-word-learning task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(2), 125-154.
- Bednarek, D. B., & Grabowska, A. (2002). Luminance and chromatic contrast sensitivity in dyslexia: The magnocellular deficit hypothesis revisited. *Neuroreport*, 13, 2521-2525.
- Bednarek, D. B., Saldana, D., Quintero-Gallego, E., Garcia, I., Grabowska, A., & Gomez, C. (2004). Attentional deficit in dyslexia: A general or specific impairment. *NeuroReport*, 15, 1787-1790.
- Bedoin, N. (1995). Articulation de codages phonologiques et sémantiques en lecture silencieuse: étude du déroulement temporal des codes phonologiques. *Revue de Phonétique Appliquée*, 115, 101-117.
- Bedoin, N. (1998a, septembre). Phonological feature activation in visual word recognition. Paper presented at the *Xth Congress of the European Society for Cognitive Psychology (ESCP)*, Jerusalem: Israël.
- Bedoin, N. (1998b, novembre). Les traits phonétiques en lecture silencieuse. Conférence invitée aux *IIe journées scientifiques de l'Ecole d'Orthophonie de Lyon : « A propos de la conscience phonologique »*, Lyon: France.
- Bedoin, N. (2002). Relationships between temporal aspects of speech perception and dyslexia. Paper presented at *The ISCA Workshop on Temporal Integration in the Perception of Speech (TIPS)*, Aix-en-Provence: France.
- Bedoin, N. (2003). Sensitivity to voicing similarity in printed stimuli: Effect of a training programme in dyslexic children. *Journal of Phonetics*, 31, 541-546.

- Bedoin, N., & Chavand, H. (2000). Functional hemispheric asymmetry in voicing feature processing in reading. *Proceedings of The Tenth Annual Meeting of the Society for Text and Discourse* (pp. 226-227), France: Lyon.
- Bedoin, N., & Dissard, P. (2002). Sonority and syllabic structure in reading: Differences between French and English readers. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain & Cognition*, 2, 67-83
- Bedoin, N., & Dos Santos, C. (2008). How do consonants feature values affect the processing of a CVCV structure? Evidence from a reading task. *Written Language and Literacy*, 11(2), 188-207.
- Bedoin, N., Ferragne, E., & Marsico, E. (en révision). Processing of French voiced stops: Place of articulation requires the left hemisphere; voicing requires both. *Brain and Language*.
- Bedoin, N., & Krifi, S. (2005, juin). The hierarchy of phonetic features in printed syllables matching, in adult skilled readers, normally developing young readers and dyslexic children. Conference presented at the *Workshop Structure and Dynamics of the Phonetic-Phonological Systems*, Lyon: France.
- Bedoin, N., & Krifi, S. (2008, septembre). Position des syllabes et effets de ressemblance infra-phonémique en lecture. Communication orale à la Société Française de Psychologie (SFP), *Symposium Le rôle de la syllable dans la lecture en français chez le lecteur apprenant et lecteur expert*, Bordeaux: France.
- Bedoin, N., & Krifi, S. (2009). The complexity of phonetic features organisation in reading. In F. Pellegrino, E. Marsico, I. Chitoran, & Ch. Coupé (Eds.), *Approaches to phonological complexity*. Berlin: Mouton & de Gruyter.
- Bedoin, N., Levy-Sebbag, H., & Keïta, L. (2005, septembre). Distinct cognitive impairments for hierarchical letters and hierarchical objects processing in phonological and surface developmental dyslexia. Communication affichée à *XIVth Conference of the European Society of Cognitive Psychology (ESCP 14)*. Leiden: Holland.
- Bedoin, N., Roussel, C., Leculier, L., Kéïta, L., Herbillon, V., & Launay, L. (2009). Dyslexie de surface chez l'enfant et déficit de l'inhibition des détails: aide au diagnostic et remédiation. In A. Devevy (Ed.), *Dyslexies: approches thérapeutiques, de la psychologie cognitive à la linguistique*. Marseille: Solal.
- Béland, R., Paradis, C., & Bois, M. (1993). Constraints and repairs in aphasic speech: A group study. *Canadian Journal of Linguistics*, 38, 279-302.
- Benedict, H. (1979). Early lexical development: Comprehension and production. *Journal of Child Language*, 6, 183-200.
- Benki, J. R. (2003). Analysis of English nonsense syllable recognition in noise. *Phonetica*, 60, 129-157.
- Berent, I. (1997). Phonological priming in the lexical decision task: Regularity effects are not necessary evidence for assembly. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 1727-1742.
- Berent, I., & Perfetti, C. A. (1995). A Rose is REEZ: The two-cycles model of phonology assembly in reading English. *Psychological Review*, 102, 146-184.

- Bernhardt, B., & Stemberger, J. P. (2007). Phonological impairment in children and adults. In P. de Lacy (Ed.), *The Cambridge Handbook of Phonology* (pp. 575-593). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bertoni, J., Bijeljac-Babic, R., Jusczyk, P. W., Kennedy, L. J., & Mehler, J. (1988). An investigation of young infants' perceptual representations of speech sounds. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117(1), 21-33.
- Best, C. T., Lafleur, R., & Roberts, G. W. (1995). Divergent developmental patterns for infants' perception of two non-native constraints. *Infant Behavior and Development*, 18, 339-350.
- Bijeljac-Babic, R., Bertoni, J., & Mehler, J. (1993). How do four-day-old infants categorize multisyllabic utterances? *Developmental Psychology*, 29, 711-721.
- Blumstein, S. E. (2003). Phonetic category structure and its influence on lexical processing. In A. Agwuele, W. Warren, & S.-H. Park (Eds.), *Proceedings of the 2003 Texas Linguistics Society Conference* (pp. 17-25). Somerville, MA : Cascadilla Proceedings Projects.
- Blumstein, S. E. (1990). Phonological deficits in aphasia: Theoretical perspectives. In A. Caramazza (Ed.), *Cognitive neuropsychology and neurolinguistics: Advances in models of cognitive function and impairment*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Blumstein, S. E. (1973). A phonological investigation of aphasic speech. The Hague: Mouton.
- Blumstein, S. E., Baker, E., & Goodglass, H. (1977). Phonological factors in auditory comprehension in aphasia. *Neuropsychologia*, 15(1), 19-30.
- Boemio, A., Fromm, S., Braun, A., & Poeppel, D. (2005). Hierarchical and asymmetric temporal sensitivity in human auditory cortices. *Nature Neuroscience*, 8(3), 389-395.
- Bogliotti, C., Messaoud-Galusi, S., & Serniclaes, W. (2002). Relations entre la perception catégorielle de la parole et l'apprentissage de la lecture. Actes des XXIVèmes Journées d'Etude sur la Parole (pp. 197-200), Nancy.
- Bogliotti, C., Serniclaes, W., Messaoud-Galusi, S., & Sprenger-Charolles, L. (2008). Discrimination of speech sounds by children with dyslexia: Comparisons with chronological age and reading level controls. *Journal of Experimental Child Psychology*, 101(2), 137-155.
- Booth, J. R., McWhinney B., & Perfetti, C. A. (1999). Quick, automatic, and general activation of orthographic and phonological representations in young readers. *Developmental Psychology*, 35(1), 3-19.
- Borsting, E., Ridder, W. H., Dudeck, K., Kelley, C., Matsui, L., & Motoyama, J. (1996). The presence of a magnocellular defect depends on the type of dyslexia. *Vision Research*, 36, 1047-1053.
- Bosch, L., & Sebastian-Gallés, N. (2003). Simultaneous bilingualism and the perception of a language-specific vowel contrast in the first year of life. *Language and Speech*, 46, 217-243.
- Bosman, A. M. T. (1994). *Reading and spelling in children and adults: Evidence for a Single-Route Model*. Doctoral dissertation, University of Amsterdam.

- Bosman, A. M. T., & de Groot, A. M. B. (1996). Phonologic mediation is fundamental to reading: Evidence from beginning readers. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49, 715-744.
- Bosman, A. M. T., & Van Orden, G. C. (1997). Why spelling is more difficult than reading? In C. A. Perfetti, L. Rieben, & M. Fayol (Eds.), *Learning to spell: Research, theory, and practice across languages* (pp.173-194). NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bosse, M. L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2006). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 19, 198-230.
- Bourciez, E.J. (1989). *Phonétique française, étude historique*. Paris: Edition Klincksieck.
- Bowers, P., & Wolf, M. (1993). Theoretical links among naming speed, precise timing mechanisms and orthographic skill in dyslexia. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 5, 69-95.
- Bowey, J. A. (1990). Orthographic onsets and rimes as functional units of reading. *Memory and Cognition*, 18(4), 419-427.
- Boyle, R., & Coltheart, V. (1996). Effects of irrelevant sounds on phonological coding in reading comprehension and short-term memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49, 398-416.
- Bradshaw, J. L. (1970). Phonetic homogeneity and articulatory lengthening. *British Journal of Psychology*, 61, 499-507.
- Brand, M., Rey, A., & Peereman, R. (2003). Where is the syllable priming effect in visual word recognition? *Journal of Memory and Language*, 48, 435-443.
- Breitmeyer, B.G. (1980). Unmasking visual masking: A look at the "why" behind the veil of the "how". *Psychological Review*, 87(1), 52-69.
- Breier, J. I., Gray, L., Fletcher, J. M., Diehl, R. L., Klaas, P., Foorman, B. R., & Molis, M. R. (2001). Perception of voice and tone onset time continua in children with dyslexia with and without attention deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 245-270.
- Breier, J. I., Fletcher, J. M., Foorman, B. R., Klaas, P., & Gray, L. C. (2003) Auditory temporal processing in children with specific reading disability with and without attention deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 46, 31-42.
- Broom, Y. M., & Doctor, E. A. (1995a). Developmental phonological dyslexia: A case study of the efficacy of a remediation programme. *Cognitive Neuropsychology*, 12, 725-766.
- Broom, Y. M., & Doctor, E. A. (1995b). Developmenatl surface dyslexia: A case study of the efficacy of a remediation programme. *Cognitive Neuropsychology*, 12, 69-110.
- Brown, W., Eliez, S., Menon, V., Rumsey, J., White, C., & Reiss, A. (2001). Preliminary evidence of widespread morphological variations in the brain in dyslexia. *Neurology*, 56, 781-783.
- Bruck, M., & Treiman, R. (1990). Phonological awareness and spelling in normal children and dyslexics: The Case of Initial Consonant Clusters. *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 156-178.

- Brunswick, N., McCrory, E., Price, C. J., Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics: A search for Wernicke's Wortschatz? *Brain*, 122, 1901-1917.
- Bryant, P. E., & Impey, L. (1986). The similarities between normal readers and developmental and acquired dyslexic children. *Cognition*, 24, 121-137.
- Brysbaert, M. (2001). Prelexical phonological coding of visual words in Dutch: Automatic after all. *Memory and Cognition*, 29, 765-773.
- Bundesen, C. (1998). Visual selective attention: Outlines of a choice model, a race model and a computational theory. *Visual Cognition*, 5, 287-309.
- Bybee, J. L., & Slobin, D.I. (1982). Rules and schemas in the development and use of the english past tense. *Language*, 58(2), 265-289.
- Calliope (1989). La parole et son traitement automatique. Paris: Masson.
- Caplan, D., & Aydelott Utman, J. (1994). Selective acoustic phonetic impairment and lexical access in an aphasic patient. *Journal of Acoustical Society of America*, 95, 512-517.
- de Cara, B. (2000). *Profil de sonorité et traitement de la syllabe chez l'apprenti-lecteur (Chap. 1)*. Doctoral dissertation. Villeneuve d'Ascq: Presses Universitaires du Septentrion.
- Carreiras, M., Ferrand, L., Grainger, J., & Perea, M. (2005). Sequential effects of phonological priming in visual word recognition. *Psychological Science*, 16(8), 585-589.
- Carter, D. M. (1987). An information-theoretic analysis of phonetic dictionary access. *Computer Speech and Language*, 2, 1-11.
- Casalis, S. (2003). The delay-type in developmental dyslexia: Reading processes. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain and Cognition*, 10. <http://cpl.revues.org/document95.html>.
- Casalis, S. (1995). Lecture et dyslexies de l'enfant. Paris: Septentrion.
- Casco, C., Tressoldi, P. E., & Dellantonio, A. (1998). Visual selective attention and reading efficiency are related in children. *Cortex*, 34, 531-546.
- Castles, A., & Coltheart, M. (1996). Cognitive correlates of developmental surface dyslexia: A single case study. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 25-50.
- Castles, A., & Coltheart, M. (1993). Varieties of developmental dyslexia. *Cognition*, 47, 149-180.
- Cestnick, L. (2001). Cross-modality temporal processing deficits in developmental phonological dyslexics. *Brain and Cognition*, 46, 319-325.
- Cestnick, L., & Coltheart, M. (1999). The relationship between language and visual processing in developmental dyslexia. *Cognition*, 71(3), 231-255.
- Cestnick, L., & Jerger, J. (2000). Auditory temporal processing and lexical/nonlexical reading in developmental dyslexia. *Journal of the American Academy of Audiology*, 11, 501-513.
- Charles-Luce, J., & Luce, P. A. (1995). An examination of similarity neighbourhoods in young children's receptive vocabularies. *Journal of Child Language*, 22(3), 727-735.

- Chavand, H. (1998). *Activation de traits infra-phonémiques au cours de la reconnaissance visuelle de mots*. Mémoire de DEA de Psychologie Cognitive, Université Lumière Lyon 2.
- Chavand, H., & Bedoin, N. (1998). Phonetic features activation in visual word recognition: The case of the articulation mode. Poster presented at the *Xth Congress of the European Society for Cognitive Psychology (ESCOP)*, Jerusalem: Israel.
- Chetail, F., & Mathey, S. (2009). Syllabic priming in lexical decision and naming tasks: The syllable congruency effect re-examined in French. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 63(1), 40-48.
- Chiappe, P., Chiappe, D. L., & Siegel, L. S. (2001). Speech perception, lexicality, and reading skill. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 58-74.
- Chiappe, P., Stringer, N., Siegel, L. S., & Stanovich, K. E. (2002). Why the timing deficit hypothesis does not explain reading disability in adults. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 15, 73-107.
- Chomsky, N., & Halle, M. (1968). *The sound pattern of English*. New York: Harper & Row.
- Clements, N. (1985). The geometry of phonological features. *Phonological Yearbook*, 2, 225-252.
- Clements, G. N., & Hume, E. W. (1995). The internal organization of speech sounds. In J. A. Goldsmith (Ed.), *Handbook of phonological theory* (pp. 245-306). Oxford : Blackwell.
- Coady, & Aslin, R. N. (2003). Phonological neighbourhoods in the developing lexicon. *Journal of Child Language*, 30, 441-469.
- Cohen, H. (1981). *Hemispheric contributions to the perceptual representation of speech sounds*. Unpublished doctoral dissertation. Montreal: Concordia University.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (second edition). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Cohen, J. D., MacWhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). Psyscope: A new graphic interactive environment for designing psychology experiments. *Behavioral Research Methods, Instruments & Computers*, 25, 257-271.
- Cohen, H., & Segalowitz, N. S. (1990). The role of linguistic prosody in the perception of time-compressed speech: A laterality study. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 12, 39.
- Cohen, H., & Segalowitz, N. S. (1990b). Cerebral hemispheric involvement in the acquisition of new phonetic categories. *Brain and Language*, 38, 398-409.
- Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., & Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, 125, 1054-1069.
- Cole, R. A. (1973). Listening for mispronunciations: A measure of what we hear during speech. *Perception and Psychophysics*, 1, 153-156.
- Cole, R. A., Jakimik, J., & Cooper, W. E. (1978). Perceptibility of phonetic features in fluent speech. *Journal of Acoustical Society of America*, 64(1), 44-56.

- Colé, P., Magnan, A., & Grainger, J. (1999). Syllabe-sized units in visual words recognition: Evidence from skilled and beginning readers. *Applied Psycholinguistics*, 20, 507-532.
- Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (1999). Traitement syllabique au cours de la reconnaissance de mots écrits chez des enfants dyslexiques, lecteurs en retard et normo-lecteurs de 11 ans. *Revue de Neuropsychologie*, 9(4), 323-360.
- Coltheart, M. (1978). Lexical access in simple reading tasks. In G. Underwood (Ed.), *Strategies of information processing*. London: Academic Press.
- Coltheart, M., Avons, S. E., Masterson, J., & Laxon, V. J. (1991). The role of assembled phonology in reading comprehension. *Memory and Cognition*, 19, 387-400.
- 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., Masterson, J., Byng, S., Prior, M., & Riddoch, J. (1983). Surface dyslexia. *Quarterly Journal of Psychology*, 35, 469-497.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204-256.
- Connine, C. M., Blasko, D. G., & Titone, D. (1993). Do the beginnings of spoken words have a special status in auditory word recognition? *Journal of Memory and Language*, 32, 193-210.
- Connine, C. M., Titone, D., Deelman, T., & Blasko, D. G. (1997). Similarity mapping in spoken word recognition. *Journal of Memory and Language*, 37, 463-480.
- Conrad, R. (1972). Speech and reading. In J. F. Kavanagh & I. G. Mattingly (Eds.), *Language by ear and by eye. The relationship between speech and reading*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Conrad, M., Carreiras, M., Tamm, S., & Jacobs, A. M. (2009). Syllables and bigrams: Orthographic redundancy and syllabic units affect visual word recognition at different processing levels. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception, and Performance*, 35(2), 461-479.
- Conrad, R., & Hull, A. J. (1964). Information, acoustic confusion and memory span. *British Journal of Psychology*, 55, 429-432.
- Conrad, M., & Jacobs, A. M. (2004). Replicating syllable-frequency effects in Spanish in German: One more challenge to computational models of visual word recognition. *Journal of Cognitive Processes*, 19(3), 369-390.
- Cornelissen, P., Richardson, A., Mason, A., Fowler, S., & Stein, J. (1995). Contrast sensitivity and coherent motion detection measures at photopic luminance levels in dyslexic readers and controls. *Vision Research*, 35, 1483-1494.
- Csepe, V., Gyurkocza, E. E., & Osman-Sagi, J. (1998). Normal and distributed phoneme perception as reflected by the mismatch negativity: Do event-related potentials help to understand dyslexia ? *Pathophysiology*, 5, 202.
- Cutler, A., Mehler, J., Norris, D., & Segui, J. (1986). The syllable's differing role in the segmentation of French and English. *Journal of Memory and Language*, 25, 385-400.

- Cutler, A., Mehler, J., Norris, D., & Segui, J. (1992). The monolingual nature of speech segmentation by bilinguals. *Cognitive Psychology*, 24, 381-410.
- Cutting, J. E. (1974). Two left-hemisphere mechanisms in speech perception. *Perception and Psychophysics*, 16(3), 601-612.
- Danon-Boileau, L., & Barbier D. (2003). *Play-On, logiciel de rééducation en lecture*. Université Paris V, L.A.A. Multimédias.
- Darwin, C. J. (1971). Ear differences in the recall of fricatives and vowels. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 23(1), 46-62.
- de Gelder, B., & Vroomen, J. (1998). Impaired speech perception in poor readers: Evidence from hearing and speech reading. *Brain and Language*, 64, 269–281.
- Dehaene-Lambertz, G., Pallier, C., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Jobert, A., & Dehaene, S. (2005). Neural correlates of switching from auditory to speech perception. *NeuroImage*, 24, 21-33.
- Delattre, P. (1965). *Comparing the phonetic features of English, French, German and Spanish: An interim report*. Heidelberg: Julius Groos Verlag.
- Dell, G. S. (1984). The representation of serial order in speech: Evidence from the repeated phoneme effect in speech errors. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 222-233.
- Dell, G., Schwartz, M., Martin, N., Saffran, E., & Gagnon, D. (1997). Lexical access in aphasic and nonaphasic speakers. *Psychological Review*, 104, 801-838.
- Demb, J. B., Boynton, G. M., Best, M., & Heeger, D. J. (1998). Psychophysical evidence for a magnocellular deficit in dyslexics. *Vision Research*, 38, 1555-1559.
- Démonet, J. F., Fiez, J. A., Paulesu, E., Peterson, S. E., & Zatorre, R. J. (1996). PET studies of phonological processing. A critical reply to Poeppel. *Brain and Language*, 28, 352-385.
- Démonet, J. F., Taylor, M., & Chaix, Y. (2004). Seminar: Developmental dyslexia. *Lancet*, 363, 1451–1460.
- Démonet, J. F., Thierry, G., & Cardebat, D. (2005). Renewal of the neurophysiology of language: Functional neuroimaging. *Physiological Review*, 85, 49-95.
- Denes, P. B. (1963). On the statistics of spoken English. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35, 892-904.
- Di Betta, A. M., & Romani, C. (2006). Lexical learning and dysgraphia in a group of adults with developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 23, 376-400.
- Doignon, N., & Zagar, D. (2005). Illusory conjunctions in French: The nature of sublexical unities in visual word recognition. *Language and Cognitive Processes*, 20(3), 443-464.
- Dollaghan, C. A. (1994). Children's phonological neighbourhoods: Half empty or half full ? *Journal of Child Language*, 21, 257-271.
- Dufor, O., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., & Démonet, J.-F. (2007). Top-down processes during auditory phoneme categorization in dyslexia: A PET study. *NeuroImage*, 34, 1694-1707.

- Dufor, O., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., & Démonet, J.-F. (2009). Left premotor cortex and allophonic speech perception in dyslexia: A PET study. *NeuroImage*, 46, 241-248.
- Dworzak, F., Bedoin, N., & Krifi, S. (2008). Internet et troubles d'apprentissage de la lecture: les synergies et partenariats créés. In Pithon, Asdih & Larrivée (Eds.), *Construire une communauté éducative (le partenariat familles – associations – écoles – universités)*. Bruxelles: De Boeck Education, Collection Perspectives en Education et Formation.
- Eaton, T. (personal communication). *Exploring the sub-phonemic level within the word recognition system*.
- Eckert, M. A. (2004). Neuroanatomical markers for dyslexia: A Review of dyslexia structural imaging studies. *The Neuroscientist*, 10, 362-371.
- Eckert, M. A., Leonard, C. M., Richards, T. L., Aylward, E. H., Thomson, J., & Berninger, V. W. (2003). Anatomical correlates of dyslexia: Frontal and cerebellar findings. *Brain*, 126, 482-494.
- Eden, G. F., Van Mater, J. W., Rumsey, J. M., Maisog, J. M., Woods, R. P., & Zeffiro, T. A. (1996). Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain imaging. *Nature*, 382, 66-69.
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, B. V., Vaghoub Zadeh, Z., & Shanahan, T. (2001). Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly*, 36, 250-287.
- Eilers, R. E., & Oller, D. K. (1976). The role of speech discrimination in developmental sound substitutions. *Journal of Child Language*, 3, 319-329.
- Eimas, P. D. (1994). Categorization in early infancy and the continuity of development. *Cognition*, 50, 83-93.
- Eimas, P. D. (1975). Distinctive feature codes in the short-term memory of children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 19, 241-251.
- Eimas, P. D. (1974). Auditory and linguistic processing of cues for place of articulation by infants. *Perception & Psychophysics*, 16, 513-521.
- Eimas, P. D., & Miller, J. L. (1980). Discrimination of information for manner of articulation. *Infant Behavior and Development*, 3, 367-375.
- Eimas, P. D., Siqueland, E. R., Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science*, 171, 303-306.
- Ellis, A. W. (1982). Spelling and writing (and reading and speaking). In A. W. Ellis (Ed.), *Normality and Pathology in Cognitive functions*. London: Academic Press.
- Ellis, A. W. (1979). Slips of the pen. *Visible Language*, 13, 265-282.
- Ernestus, M., & Mak, W. M. (2004). Distinctive phonological features differ in relevance for both spoken and written word recognition. *Brain and Language*, 90, 378-392.
- Fabre, D., & Bedoin, N. (2003). Sensitivity to sonority for print processing in normal readers and dyslexic children. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain & Cognition*, 10, 1-6.

- Facoetti, A., & Molteni, M. (2001). The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 39, 352-357.
- Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R., & Mascetti, G. G. (2003). The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain and Cognition*, 53, 181-184.
- Facoetti, A., Paganoni, P., & Lorusso, M. L. (2000a). The spatial distribution of visual attention in developmental dyslexia. *Experimental Brain Research*, 132, 531-538.
- Facoetti, A., Paganoni, P., Turatto, M., Marzola, V., & Mascetti, G. G. (2000b). Visual-spatial attention in developmental dyslexia. *Cortex*, 36(1), 109-123.
- Facoetti, A., Turatto, M., Lorusso, M. L., & Mascetti, G. G. (2001). Orienting of visual attention in dyslexia: Evidence for asymmetric hemispheric control of attention. *Experimental Brain Research*, 138, 46-53.
- Facoetti, A., Zorzi, M., Cestnick, L., Lorusso, M. L., Molteni, M., Paganoni, P., Umiltà, C., & Mascetti, G. G. (2006). The relationship between visuo-spatial attention and nonword reading in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 23(6), 841-855.
- Fawcett, A. J., & Nicolson, R. I. (1999). Performance of dyslexic children on cerebellar and cognitive tests. *Journal of Motor Behaviour*, 31, 68-78.
- Fawcett, A., Nicolson, R., & Dean, P. (1996). Impaired performance of children with dyslexia on a range of cerebellar tasks. *Annals of Dyslexia*, 46, 259-283.
- Fennell, C. T., & Werker, J. F. (2003). Early word learners' ability to access phonetic detail in well-known words. *Language and Speech*, 46, 245-264.
- 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 non-word priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 45(3), 353-372.
- 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. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47(2), 365-382.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1995). Amorçage phonologique masqué et dénomination. *L'Année Psychologique*, 95, 645-659.
- Ferrand, L., & New, B. (2003). Syllabic length effects in visual word recognition and naming. *Acta Psychologica*, 113, 167-183.
- Ferrand, L., Segui, J., & Grainger, J. (1996). Masked priming of word and picture naming: The role of syllabic units. *Journal of Memory and Language*, 35, 708-723.
- Fiez, J. A., & Peterson, S. E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 95, 914-921.
- Fikkert, P. (2007). Acquiring phonology. In P. de Lacy (Ed.), *The Cambridge Handbook of Phonology* (pp. 537-554). Cambridge: Cambridge University Press.

- Finch, A., Nicolson, R. I., & Fawcett, A. (2002). Evidence for a neuroanatomical difference within the olivo-cerebellar pathway of adults with dyslexia. *Cortex*, 38, 529-539.
- Flege, J. E., & Eefting, W. (1986). Linguistic and developmental effects on the production and perception of stop consonants. *Phonetica*, 43, 155-171.
- Forrest, K., & Morrisette, M. L. (1999). Feature analysis of segmental errors in children with phonological disorders. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42, 187-194.
- Fowler, C. A. (1987). Consonant-vowel cohesiveness in speech production as revealed by initial and final consonant exchanges. *Speech Communication*, 6, 231-244.
- Fowler, C., Treiman, R., & Gross, J. (1993). The structure of English syllables and polysyllables. *Journal of Memory and Language*, 32, 115-140.
- Friedmann, N., & Nachman-Katz, I. (2004). Developmental neglect dyslexia in a Hebrew reading child. *Cortex*, 40, 301-313.
- Fromkin, V. A. (1971). The non-anomalous nature of anomalous utterances. *Language*, 47, 27-52.
- Frost, R. (1998). Toward a strong phonological theory of visual word recognition: True issues and false trails. *Psychological Bulletin*, 123, 71-99.
- Frost, R., & Kampf, M. (1993). Phonetic recoding of phonologically ambiguous printed words. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19, 23-33.
- Frost, R., & Yogev, O. (2001). Orthographic and phonological computation in visual word recognition: Evidence from backward masking in Hebrew. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(3), 525-530.
- Funnell, E. (1983). Phonological processes in reading. New evidence from acquired dyslexia. *British Journal of Psychology*, 74, 159-180.
- Galaburda, A. M., & Kemper, T. L. (1979). Cytoarchitectonic abnormalities in developmental dyslexia: A case study. *Annals of Neurology*, 6, 94-100.
- Galaburda, A. M., Menard, M. T., & Rosen, G. D. (1994). Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 16, 8010-8013.
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F., & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: Four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals of Neurology*, 18, 222-233.
- Garnes, S., & Bond, Z. S. (1975). Slips of the ear: Errors in perception of casual speech. *Proceedings of the 11th Reg. Meeting of the Chicago Linguistic Society*, 214-225.
- Garnica, O. K. (1973). The development of phonemic speech perception. In T. E. Moore (Eds.), *Cognitive development and the acquisition of language* (pp. 215-222). New York: Academic Press.
- Gathercole, S.E., Pickering, S.J., Hall, M., & Peaker, S.M. (2001). Dissociable lexical and phonological influences on serial recognition and serial recall. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54(1), 1-30.

- Geiger, G., Lettin, J.Y., & Fahle, M. (1994). Dyslexic children learn a new visual strategy for reading: A controlled experiment. *Vision Research*, 34(9), 1223-1233.
- Génard, N., Mousty, P., Content, A., Alegria, J., Leybaert, J., & Morais, J. (1998). Methods to establish subtypes of developmental dyslexia. In P. Reitsma & L. Verhoeven (Eds.), *Problems and interventions in literacy development* (pp.163-176). The Netherlands: Kluwer, Dordrecht.
- Georgiewa, P., Rzanny, R., Hopf, J. M., Knab, R., Glauche, V., & coll. (1999). fMRI during word processing in dyslexic and normal reading children. *Neuroreport*, 10, 3459-3465.
- Georgiewa, P., Rzanny, R., Gaser, C., Gerhard, U. J., Vieweg, U., & coll. (2002). Phonological processing in dyslexic children: A study combining functional imaging and event related potentials. *Neuroscience Letter*, 318, 5-8.
- Gerken, L., Murphy, W. D., & Aslin, R. N. (1995). 3-year-olds' and 4-year-olds' perceptual confusions for spoken words. *Perception & Psychophysics*, 57, 475-486.
- Geudens, A., & Sandra, D. (1999). Onsets and rimes in a phonologically transparent orthography: Differences between good and poor beginning readers of Dutch. *Brain and Language*, 68, 284-290.
- Giraud, K., Démonet, J. F., Habib, M., Marquis, P., Chauvel, P., & Liegeois-Chauvel, C. (2005). Auditory evoked potential patterns to voiced and voiceless speech sounds in adult developmental dyslexics with persistent deficits. *Cerebral Cortex*, 15, 1524-1534.
- Gizewski, E. R., Timmann, D., & Forsting, M. (2004). Specific cerebellar activation during Braille reading in blind subjects. *Human Brain Mapping*, 22, 229-235.
- Godfrey, J. J., Syrdal-Lasky, A. K., Millay, K. K., & Knox, C. M. (1981). Performance of dyslexic children on speech perception tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, 32, 401-424.
- Goldinger, S. D., Luce, P. A., & Pisoni, D. B. (1989). Priming lexical neighbors of spoken words: Effects of competition and inhibition. *Journal of Memory and Language*, 28, 501-518.
- Goldinger, S. D., Luce, P. A., Pisoni, D. B., & Marcario, J. K. (1992). Form-based priming in spoken word recognition: The roles of competition and bias. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 18(6), 1211-1238.
- Goldstein, L. M., & Fowler, C. (2003). Articulatory phonology: A phonology for public language use. In A. S. Meyer & N. O. Schiller (Eds.), *Phonetics and phonology in language comprehension and production: Differences and similarities* (pp. 159-207). Berlin : Mouton de Gruyter.
- Goswami, U. (2003). Why theories about developmental dyslexia require developmental designs. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 534-540.
- Goulardis, N. K., & Snowling, M. (1991). Visual memory deficits: A plausible cause of developmental dyslexia? Evidence from a single case study. *Cognitive Neuropsychology*, 8, 127-154.
- Goswami, U. (2002). In the beginning was the rhyme? A reflection on Hulme, Hatcher, Nation, Brown, Adams and Stuart, 2001. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 47-57.

- Gow, D. W., & Caplan, D. (1996). An examination of impaired acoustic-phonetic processing in aphasia. *Brain and Language*, 52, 386-407.
- Graham, L. W., & House, A. S. (1970). Phonological oppositions in children: A perceptual study. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 559-566.
- Grainger, J., Bouttevin, S., Truc, C., Bastien, M., & Ziegler, J. (2003). Word superiority, pseudoword superiority, and learning to read: A comparison of dyslexic and normal readers. *Brain and Language*, 87, 432-440.
- Grainger, J., & Ferrand, L. (1996). Masked orthographic and phonological priming in visual word recognition and naming: Cross-task comparisons. *Journal of Memory and Language*, 35, 623-647.
- Grant, A. C., Zangaladze, A., Thiagarajah, M. C., & Sathian, K. (1999). Tactile perception in developmental dyslexia: A psychophysical study using gratings. *Neuropsychologia*, 37, 1201-1211.
- Greenberg, J. H., & Jenkins, J. J. (1964). Studies in the psychological correlates of the sound system of American English. *Word*, 20, 157-177.
- Griffiths, S., & Frith, U. (2002). Evidence for an articulatory awareness deficit in adult dyslexics. *Dyslexia*, 8, 14-21.
- Gross, J., Treiman, R., & Inman, J. (2000). The role of phonology in a letter detection task. *Memory and Cognition*, 28(3), 349-357.
- Gupta, P., Lipinski, J., & Aktunc, E. (2005). Reexamining the phonological similarity effect in immediate serial recall: The roles of type of similarity, category cuing, and item recall. *Memory and Cognition*, 33(6), 1001-1016.
- Habib, M. (2002). Phonology, phonetics, and temporal processing in developmental dyslexia: From mechanisms to remediation. Paper presented at *The ISCA Workshop on Temporal Integration in the Perception of Speech (TIPS)*, Aix-en-Provence: France.
- Habib, M. (2002). Aspects étiologiques des dyslexies. Paper presented at the *XXXèmes Entretiens de Médecine Physique et de Réadaptation*, Montpellier: France.
- Habib, M. (2001). The neurological basis of developmental dyslexia: An overview and working hypothesis. *Brain*, 123(12), 2373-2399.
- Habib, M. (2000). The neurological basis of developmental dyslexia. An overview and working hypothesis. *Brain*, 123, 2373-2399.
- Habib, M., Rey, V., Giraud, K., & Espesser, R. (1999). Dyslexie et traitement par le cerveau des sons de parole. *Rencontres IPSEN en ORL*, 3, 147-158.
- Habib, M., Robichon, F., & Démonet, J.-F. (1996). Le singulier cerveau des dyslexiques. *La Recherche*, 289, 80-85.
- Haggard, M. P. (1971). Encoding and the REA for speech signals. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 23(1), 34-45.
- Hahn, U., & Bailey, T. M. (2005). What makes words sound similar? *Cognition*, 97, 227-267.
- Halle, M. (1992). "Features". In B Wright (Ed.), *Oxford International Encyclopedia of Linguistics*. Oxford University Press: New-York.

- Hallé, P., & Boysson-Bardies, B. de (1996). The format of representation of recognized words in infants' early receptive lexicon. *Infant Behavior and Development*, 19, 463-481.
- Hallé, P., & Boysson-Bardies, B. de (1994). Emergence of an early lexicon: Infants' recognition of words. *Infant Behavior and Development*, 17, 119-129.
- Hanley, J. R., & Gard, F. (1995). A dissociation between developmental surface and phonological dyslexia in two undergraduate students. *Neuropsychologia*, 33, 909-914.
- Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 525-532.
- Hari, R., Renvall, H., & Tanskanen, T. (2001). Left minineglect in dyslexic adults. *Brain*, 124, 1373-1380.
- Hartline, H. K., & Ratcliff, F. (1957). Inhibitory interaction of receptor units in the eye of *Limulus*. *Journal of General Physiology*, 40, 357-376.
- Haspelmath, M. (2006). Against markedness (and what to replace it with). *Journal of Linguistics*, 42(1), 25-70.
- Hawelka, S., & Wimmer, H. (2005). Impaired visual processing of multi-element arrays is associated with increased number of eye movements in dyslexic reading. *Vision Research*, 45, 855-863.
- Hazan, V., & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6-12. *Journal of Phonetics*, 28, 377-396.
- Hebben, N. (1986). The role of the frontal and temporal lobes in the phonetic organization of speech stimuli: A multidimensional scaling analysis. *Brain and Language*, 29, 342-357.
- Heilman, K. M., Voeller, K., & Alexander, A. W. (1996). Developmental dyslexia: A motorarticulatory feedback hypothesis. *Annals of Neurology*, 39, 407-412.
- Heim, S., & Keil, A. (2004). Large-scale neural correlates of developmental dyslexia. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 13, 125-140.
- Helenius, P., Salmelin, R., Richardson, U., Leinonen, S., & Lyytinen, H. (2002). *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(4), 603-617.
- Helenius, P., Tarkiainen, A., Cornelissen, P., Hansen, P. C., & Salmelin, R. (1999). Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cerebral Cortex*, 9, 476-483.
- Hesling, I., Dilharreguy, B., Clément, S., Bordessoules, M., & Allard, M. (2005). Cerebral mechanisms of prosodic sensory integration using low-frequency bands of connected speech. *Human Brain Mapping*, 26, 157-169.
- Hillinger, M. L. (1980). Priming effects with phonemically similar words: The encoding-bias hypothesis reconsidered. *Memory & Cognition*, 8(2), 115-123.
- Hintzman, D. L. (1967). Articulatory coding in short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 6, 312-316.
- Houston, D. M., & Jusczyk, P. W. (2000). The role of talker-specific information in word segmentation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1570-1582.

- Hugdahl, K., & Andersson, L. (1984). A dichotic listening study of differences in cerebral organization in dextral and sinistral subjects. *Cortex*, 20(1), 135-141.
- Hugdahl, K., & Wester, K. (1992). Dichotic listening studies of hemispheric asymmetry in brain damaged patients. *International Journal of Neuroscience*, 63(1-2), 17-29.
- Hutzler, F., Conrad, M., & Jacobs, A. M (2005). Effects of syllable-frequency in lexical decision and naming: An eye-movement study. *Brain and Language*, 92, 138-152.
- Ivry, R. B., & Justus, T. C. (2001). A neural instantiation of the motor theory of speech perception. *TINS*, 24, 513-515.
- Jaeger, J. J. (1992). Phonetic features in young children's slips of the tongue. *Language and Speech*, 35, 189-205.
- Jakobson, R., Fant, C. G. M., & Halle, M. (1952). *Preliminaries to speech analysis: The distinctive features and their correlates*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Jenner, A. R., Galaburda, A. M., & Sherman, G. F. (2000). Connectivity of ectopic neurons in the molecular layer of the somatosensory cortex in autoimmune mice. *Cerebral Cortex*, 10, 1005-1013.
- Jenner, A. R., Rosen, G. D., & Galaburda, A. M. (1999). Neuronal asymmetries primary visual cortex of dyslexic and nondyslexic brains. *Annals of Neurology*, 46(2), 189-196.
- Jimenez-Gonzalez, J. E., & Ramirez-Santana, G. (2002). Identifying subtypes of reading disability in a transparent orthography. *The Spanish Journal of Psychology*, 5, 3-19.
- Jimenez-Gonzalez, J. E., & Valle, I. H. (2000). Word identification and reading disorders in the Spanish language. *Journal of Learning Disabilities*, 33, 44-60.
- Joanisse, M. F., Manis, F. R., Keating, P., & Seidenberg, M. S. (2000). Language deficits in dyslexic children: Speech perception, phonology, and morphology. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 30-60.
- Johannes, S., Kussmaul, C. L., Munte, T. F., & Mangun, G. R. (1996). Developmental dyslexia: Passive visual stimulation provides no evidence for a magnocellular processing defect. *Neuropsychologia*, 34, 1123-1127.
- Johnston, R. S., & Conning, A. (1990). The effects of overt and covert rehearsal on the emergence of the phonological similarity effect in 5-year-old children. *British Journal of Developmental Psychology*, 8(4), 411-418.
- Johnston, R. B., Stark, R. E., Mellits, E. D., & Tallal, P. (1981). Neurological status of language-impaired and normal children. *Annals of Neurology*, 10, 159-163.
- Jorm, A. F., Share, D. L., Maclean, R., & Matthews, R. C. (1986a). Cognitive factors at school entry predictive of specific reading retardation and general reading backwardness: A research note. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 27, 5-54.
- Jorm, A. F., Share, D. L., Matthews, R. C., & Maclean, R. (1986b). Behaviour problems in specific reading retarded and general reading backward children: A longitudinal study. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 27, 33-43.
- Juphard, A., Carbonnel, S., Ans, B., & Valdois, S. (2006). Length effect in reading and lexical decision: The multitrace memory model's account. *Current Psychology Letters*.

- Jusczyk, P. W. (1977). Perception of syllable-final stop consonants by 2-month-old infants. *Perception & Psychophysics*, 21(5), 450–454.
- Jusczyk, P. W., & Aslin, R. N. (1995). Infants' detection of the sound patterns of words in fluent speech. *Cognitive Psychology*, 29, 1-23.
- Jusczyk, P. W., & Derrah, C. (1987). Representation of speech sounds by young infants. *Developmental Psychology*, 23, 648–654.
- Jusczyk, P. W., Goodman, M. B., & Baumann, A. (1999). Nine-month-olds' attention to sound similarities in syllables. *Journal of Memory and Language*, 40, 62-82.
- Jusczyk, P. W., Pisoni, D. B., Walley, A. C., & Murray, J. (1980). Discrimination of the relative onset time of two-component tones by infants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 262–270.
- Keïta, L. (2007). Approche développementale et neuropsychologique de processus visuo-attentionnels: traitements global et local selon la catégorie. Thèse de Doctorat de Psychologie, Université Lumière Lyon 2 (soutenue le 04 juin 2008).
- Keïta, L., Bedoin, N., Herbillon, V., Lévy-Sebbag, H., & Mérigot, A. (2005, novembre). Visual attention deficits and linguistic impairments in normal readers and dyslexic children. Communication affichée au *XVIIth European Academy of Childhood Disability Congress*. Monaco: Principauté de Monaco.
- Keïta, L., Bedoin, N., Mérigot, A., & Herbillon, V. (2005, septembre). Global/local processing of letter-based and object-based hierarchical stimuli: A developmental and neuropsychological study. Communication affichée à *XIVth Conference of the European Society of Cognitive Psychology (ESCP 14)*. Leiden: Holland.
- Kibbel, M., & Miles, T. R. (1994). Phonological errors in the spelling of taught dyslexic children. In C. Hulme & M. Snowling (Eds.), *Reading development and dyslexia* (pp.105-127). London: Whurr.
- Kimura, D. (1967). Functional asymmetry of the brain in dichotic listening. *Cortex*, 3, 163-168.
- Klatt, D. H. (1979). Speech perception: A model of acoustic-phonetic analysis and lexical access. *Journal of Phonetics*, 7, 279-312.
- Kluender, K. R., Lotto, A. J., & Jenison, R. L. (1995). Perception of voicing for syllable-initial stops at different intensities: Does synchrony capture signal voiceless stop consonant? *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 2552-2567.
- Kraus, N., McGee, T. J., Carrell, T. D., Zecker, S.G., Nicol, T. G., & Koch, D. B. (1996). Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science*, 273, 971-973.
- Krifi-Papoz, S. (2009, mars). Traitement phonétique en lecture et dyslexie développementale: anomalies de l'organisation fine des connaissances phonologiques chez les enfants dyslexiques. Communication orale au *Colloque Neuropsychologie, Education et Francophonie (NEF)*, Ecole Normale Supérieure, Lyon: France.
- Krifi, S. (2003). *Amorçage et masquage phonétique intra-stimulus en lecture: enfants normo-lecteurs et dyslexiques*. Mémoire de DEA National de Neuropsychologie, Université Lumière Lyon 2.

- Krifi, S., & Bedoin, N. (2005, février). Rôle de trois catégories de traits phonétiques dans l'appariement de syllabes écrites: lecture normale et dyslexie développementale. Poster présenté au *Colloque Un siècle de Phonétique expérimentale: histoire et développement de Théodore Rosset à John Ohala*, Grenoble: France.
- Krifi, S., & Bedoin, N. (2004, octobre). Traits phonétiques en lecture: influence de la présentation simultanée des lettres d'un stimulus et de leur temps de présentation. Conférence présentée au *Workshop Structure and Dynamics of the Phonetic-Phonological Systems*, Lyon: France.
- Krifi, S., Bedoin, N., & Herbillon, V. (2005a, septembre). The hierarchy of phonetic features categories in printed syllables matching: Normal reading and developmental dyslexia. Poster presented at the *XIVth Conference of the European Society for Cognitive Psychology (ESCP 14)*, Leiden: Holland.
- Krifi, S., Bedoin, N., & Herbillon, V. (2005b, novembre). Hierarchy of phonetic categories in developmental dyslexia. Conference presented at the *XVIIth European Academy of Childhood Disability Congress*, Monaco: Principauté de Monaco.
- Krifi, S., Bedoin, N., & Herbillon, V. (2005c, mars). Premiers pas vers un outil de remédiation pour enfants dyslexiques: appariement de syllabes et lecture. Poster présenté au *Colloque APEDYS*, Lyon: France.
- Krifi, S., Bedoin, N., & Herbillon, V. (2004). Effets phonétiques en lecture: une meilleure compréhension de la lecture et de la dyslexie. Conférence à la *Réunion de Neuropédiatrie et Neuropsychologie*, Centre Hospitalier Lyon-Sud, Pierre-Bénite: France.
- Krifi, S., Bedoin, N., & Herbillon, V. (2003, septembre). Phonetic priming and backward masking in printed stimuli: A better understandig of normal reading and dyslexia. Paper presented at the *XIIIth Conference of the European Society for Cognitive Psychology (ESCP)*, Granada: Spain.
- Krifi-Papoz, S., Bedoin, N., Herbillon, V., des Portes, V., & Rousselle, C. (2007, octobre). Modèle d'organisation des connaissances sur les phonèmes: une explication des erreurs de lecture et d'écriture des enfants dyslexiques. Communication affichée aux *IIIèmes Journées Scientifiques du Centre de Référence des Troubles des Apprentissages de Lyon*, Ecole Normale Supérieure, Lyon: France.
- Krifi, S., Bedoin, N., & Mérigot, A. (2003). Effects of voicing similarity between consonants in printed stimuli, in normal and dyslexic readers. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain & Cognition*, 10(1), 1-7.
- Krifi, S., Mérigot, A., & Bedoin, N. (2002, novembre). Traitement de la ressemblance de voisement en lecture et dyslexie. Poster présenté aux *IIIe Journées des Troubles d'Apprentissage du Langage Oral et Ecrit*, Aix-en-Provence: France.
- Kronbichler, M., Hutzler, F., & Wimmer, H. (2002). Dyslexia: Verbal impairments in the absence of magnocellular impairments. *Neuroreport*, 13, 617-620.
- Kuhl, P. K. (1983). Perception of auditory equivalence classes for speech in early infancy. *Infant Behavior and Development*, 6, 263-285.
- Kuhl, P. K., & Miller, J. D. (1975). Speech perception by the chinchilla: Voiced-voiceless distinction in alveolar plosive consonants. *Science*, 190, 69-72.

- Kuhl, P. K., & Padden, D. M. (1983). Enhanced discriminability at the phonetic boundaries for the place feature in macaques. *Journal of the Acoustic Society of America*, 73, 1003–1010.
- Kuhl, P. K., & Padden, D. M. (1982). Enhanced discriminability at the phonetic boundaries for the voicing feature in macaques. *Perception & Psychophysics*, 32, 542–550.
- Kuhl, P. K., Stevens, E., Hayashi, A., Deguchi, T., Kiritani, S., & Iverson, P. (2006). Infants show a facilitation effect for native language phonetic perception between 6 and 12 months. *Developmental Science*, 9(2), 13-21.
- Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., & Lindblom, B. (1992). Linguistic experiences alter phonetic perception in infants by 6 months of age. *Science*, 255, 606-608.
- Kujala, T., & Naatanen, R. (2001). The mismatch negativity in evaluating central auditory dysfunction in dyslexia. *Neuroscience and Biobehaviour Review*, 25, 535-543.
- Laberge, D., & Brown, V. (1989). Theory of attentional operation in shape identification. *Psychological Review*, 96(1), 101-124.
- Laboratoire Cogni-Sciences et Apprentissages, & IUFM Grenoble (1999). *Diagnostic Analytique des Troubles d'Apprentissage de la Lecture*.
- Landerl, K., Wimmer, H., & Frith, U. (1997). The impact of orthography consistency on dyslexia: A German-English comparison. *Cognition*, 63, 315-334.
- Lefavrais, P. (1965). *Test de l'Alouette*. Paris: E.C.P.A.
- Leonard, C., Eckert, M., Lombardino, L., Oakland, T., Kranzler, J., & coll. (2001). Anatomical risk factors for phonological dyslexia. *Cerebral Cortex*, 11, 148-157.
- Leonard, C. M., Voeller, K. K. S., Lombardino, L. J., Morris, M. K., Hynd, G. W., Alexander, A. W., Andersen, H. G., & al. (1993). Anomalous cerebral structure in dyslexia revealed with magnetic resonance imaging. *Archives of neurology*, 50, 461-469.
- Lesch, M. F., & Pollatsek, A. (1993). Automatic access of semantic information by phonological codes in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 19, 285-294.
- Lesch, M. F., & Pollatsek, A. (1998). Evidence for the use of assembled phonology in accessing the meaning of printed words. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24(3), 573-592.
- Lian, A. L., & Karlsen, P. J. (2004). Advantage and disadvantages of phonological similarity in serial recall and serial recognition of nonwords. *Memory & Cognition*, 32(2), 223-234.
- Liberman, A. M., Delattre, P. C., & Cooper, F. S. (1958). Some cues for the distinction between voiced and voiceless stops in initial position. *Language and Speech*, 1, 153-167.
- Liberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54, 358-368.

- Liberman, I. Y., Mann, V. A., Shankweiler, D., & Werfelman, M. (1982). Children's memory for recurring linguistic and non-linguistic material in relation to reading ability, *Cortex*, 18, 367-375.
- Liberman, I. Y., Shankweiler, D., Fisher, F. W., & Carter, B. (1974). Explicit syllable and phoneme segmentation in the young child. *Journal of Experimental Child Psychology*, 18, 201-212.
- Lindgren, S. D., De Renzi, E., & Richman, L. C. (1985). Cross-national comparisons of developmental dyslexia in Italy and the United States. *Child Development*, 56, 1404-1417.
- Lisker, L., & Abranson, A. S. (1964). A cross-language study of voicing in initial stops: Acoustical measurements. *Word*, 20, 384-422.
- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W., & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences-USA*, 88, 7643-7647.
- Logan, J. (1992). *Computation of young children's lexicons*. Unpublished doctoral dissertation, Indiana University, Bloomington, IN.
- Lorenzi, C., Dumont, A., & Fullgrabe, C. (2000). Use of temporal envelope cues by children with developmental dyslexia. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 43, 1367-1379.
- Lovegrove, W., Martin, F., & Slaghuis, W. (1986). A theoretical and experimental case for a visual deficit in reading disability. *Cognitive Neuropsychology*, 3, 225-267.
- Luce, P. A. (1986). *Neighborhoods of words in the mental lexicon*. PhD Dissertation, Dept. of Psychology, Indiana University, Bloomington Indiana.
- Luce, P. A., Goldinger, S. D., Auer, E. T., & Vitevitch, M. S. (2000). Phonetic priming, neighborhood activation, and PARSYN. *Perception & Psychophysics*, 62(3), 615-625.
- Luce, P. A., & Pisoni, D. B. (1998). Recognizing spoken words: The neighborhood activation model. *Ear & Hearing*, 19, 1-36.
- Luce, P. A., Pisoni, D. B., & Goldinger, S. D. (1990). Similarity neighborhoods of spoken words. In G.T.M. Altmann (Ed.), *Cognitive models of speech processing* (pp. 122-147). Cambridge, MA: MIT Press.
- Lukatela, G., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phonemic priming with words and pseudowords. *European Journal of Cognitive Psychology*, 2, 375-394.
- Lukatela, G., Eaton, T., Lee, C., & Turvey, M. T. (2001). Does visual word identification involve a sub-phonemic level? *Cognition*, 78, 41-52.
- Lukatela, G., Eaton, T., Sabadini, L., & Turvey, M. T. (2004). Vowel duration affects visual word identification: Evidence that the mediating phonology is phonetically informed. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception, and Performance*, 30(1), 151-162.
- Lukatela, G., Frost, R., & Turvey, M. T. (1998). Phonological priming by masked nonword primes in the lexical decision task. *Journal of Memory and Language*, 39, 666-683.

- Lukatela, G., Lukatela, K., & Turvey, M. T. (1993). Further evidence for phonological constraints on visual lexical access: TOWED primes FROG. *Perception & Psychophysics*, 53, 461-466.
- Lukatela, G., & Turvey, M.T. (1994). Visual lexical access is initially phonological: Evidence from phonological priming by homophones and pseudohomophones. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123, 331-353.
- Lukatela, G., & Turvey, M. T. (1993). Similar attentional, frequency, and associative effects for pseudohomophones and words. *Journal of Experimental Psychology : Human, Perception and Performance*, 19, 166-178.
- Lukatela, G., & Turvey, M. T. (1991). Phonological access of the lexicon: Evidence from associative priming with pseudohomophones. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 951-966.
- Lundberg, I., Frost, J., & Petersen, O. P. (1988). Effects of an extensive program for stimulating phonological awareness in preschool children. *Reading Research Quarterly*, 23, 263-284.
- Luo, C. R., Johnson, R. A., & Gallo, D. A. (1998). Automatic activation of phonological information in reading: Evidence from the semantic relatedness decision task. *Memory & Cognition*, 26(4), 833-843.
- Maassen, B., Groenen, P., Crul, T., Assman-Hulsmans, C., & Gabreëls, F. (2001). Identification and discrimination of voicing and place-of-articulation in developmental dyslexia. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 15(4), 319-339.
- MacKay, D. G. (1970). Spoonerisms: The structure of errors in the serial order of speech. *Neuropsychologia*, 8, 323-350.
- Mani, N., & Plunkett, K. (2007). Fourteen-month-olds pay attention to vowels in novel words. *Developmental Science*, 11(1), 53-59.
- Manis, F., McBride-Chang, C., Seidenberg, M. S., Keating, P., Doi, L. M., Munson, B., & Petersen, A. (1997). Are speech perception deficits associated with developmental dyslexia? *Journal of Experimental Child Psychology*, 66, 211-235.
- Manis, F., Seidenberg, M. S., Doi, L. M., McBride-Chang, C., & Peterson, A. (1996). On the basis of two subtypes of developmental dyslexia. *Cognition*, 58, 157-195.
- Mann, V. A., & Liberman, I. Y. (1984). Phonological awareness and verbal short term memory: Can they presage early reading problems? *Journal of Learning Disabilities*, 17, 592-599.
- Marendaz, C., Valdois, S., & Walch, J. P. (1996). Dyslexie développementale et attention visuo-spatiale. *L'Année Psychologique*, 96, 193-224.
- Marshall, C. M., Snowling, M. J., & Bailey, P. J. (2001). Rapid auditory processing and phonological ability in normal readers and readers with dyslexia. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 44, 925-940.
- Marslen-Wilson, W. D. (1987). Functional parallelism in spoken word recognition. *Cognition*, 25, 71-102.
- Marslen-Wilson, W. D., Moss, H. E., & Van Halen, S. (1996). Perceptual distance and competition in lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 1376-1392.

- Marslen-Wilson, W. D., & Warren, P. (1994). Levels of perceptual representation and process on lexical access: Words, phonemes, and features. *Psychological Review*, 101, 653-675.
- Marslen-Wilson, W. D., & Welsh, A. (1978). Processing interactions and lexical access during word recognition in continuous speech. *Cognitive Psychology*, 10, 29-63.
- Masterson, J., Hazan, V., & Wijayatilake, L. (1995). Phonemic processing problems in developmental phonological dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 12(3), 233-259.
- Mathey, S., Zagar, D. (2002). Lexical similarity in visual word recognition: The effect of syllabic neighbourhood in French. *Current Psychology Letters: Behavior, Brain, & Cognition*, 8, 107-121.
- Mathey, S., Zagar, D., Doignon, N., & Seigneuric, A. (2006). The nature of the syllabic neighbourhood effect in French. *Acta Psychologica*, 123, 372-393.
- Maye, J., & Gerken, L. A. (2001). Learning phonemes: How far can the input take us? *Proceedings of the BUCLD 25* (pp. 480-490). Cascadilla Press: Somerville, MA.
- Maye, J., Weiss, D. J., & Aslin, R. N. (2008). Statistical phonetic learning in infants: Facilitation and feature generalization. *Developmental Science*, 11(1), 122-134.
- McAnally, K. I., & Stein, J. F. (1996). Auditory temporal coding in dyslexia. *Proceedings Royal Society London, B, Biological Sciences*, 263, 961-965.
- McCarthy, J. J. (1988). Feature geometry and dependency: A review. *Phonetica*, 43, 84-108.
- McClaskey, C., Pisoni, D., & Carrell, T.D. (1983). Transfer of training of a new linguistic contrast in voicing. *Perception & Psychophysics*, 34, 323-330.
- McClelland, J. L., & Elman, J. L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, 18, 1-86.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 1. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88(5), 375-407.
- McCormack, P., & Dodd, B. (1996). A feature analysis of speech errors in subgroups of speech disordered children. In P. McCormack, & A. Russell (Eds.), *Proceedings of the Sixth Australian International Conference on Speech Science and Technology* (pp. 217-222). Adelaide: AASTA.
- McDougall, S., Hulme, C., Ellis, A., & Monk, A. (1994). Learning to read: The role of short term memory and phonological skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 58, 112-133.
- McInnish, J. R., & Tikofsky, R. S. (1969). Distinctive features and response latencies: A pilot study. *Perception & Psychophysics*, 6, 267-268.
- McKibbin, K., Elias, L. J., Saucier, D. M., & Engebregston, D. (2003). Right-hemispheric dominance for processing extended non-linguistic frequency transitions. *Brain and Cognition*, 53, 322-326.
- McMurray, B., & Aslin, R. (2005). Infants are sensitive to within-category variation in speech perception. *Cognition*, 95(2), B15-26.

- McMurray, B., Tanenhaus, M., & Aslin, R. (2002). Gradient effects of within-category phonetic variation on lexical access. *Cognition*, 86(2), 33-42.
- McQueen, J. M., Dahan, D., & Cutler, A. (2003). Continuity and gradedness in speech processing. In N. O. Schiller & A. S. Meyer (Eds.), *Phonetics and phonology in language comprehension and production: Differences and similarities* (pp. 39-79). Berlin: Mouton & de Gruyter.
- Metsala, J. L. (1999). Young children's phonological awareness and nonword repetition as a function of vocabulary development. *Journal of Educational Psychology*, 91(1), 3-19.
- Metsala, J. L., Stanovich, K. E., & Brown, G. D. A. (1998). Regularity effects and the phonological deficit model of reading disabilities: A meta-analytic review. *Journal of Educational Psychology*, 90, 279-293.
- Meyer, A. (1992). Investigation of phonological encoding through speech error analyses: Achievements, limitations, and alternatives. *Cognition*, 42, 181-211.
- Meyer, D. E., & Gordon, P. C. (1985). Speech production: Motor programming of phonetic features. *Journal of Memory and Language*, 24, 3-26.
- Meyer, D. E., & Gordon, P. C. (1983). Shared mechanisms for perceiving and producing phonetic features in speech. Proceedings of the *Meeting of the Psychonomic Society*, San Diego, CA.
- Miceli, G., Caltagirone, C., Gainotti, G., & Payer-Rigo, P. (1978). Discrimination of voice versus place contrasts in aphasia. *Brain and Language*, 6, 47-51.
- Milberg, W., Blumstein, S., & Dworetzky, B. (1988). Phonological factors in lexical access: Evidence from an auditory lexical decision task. *Bulletin of Psychonomic Society*, 26(4), 305-308.
- Miller, J. L. (1997). Internal structure of phonetic categories. *Language and Cognitive Processes*, 12, 865-869.
- Miller, J. L., & Eimas, P. (1995). Speech perception: From signal to word. *Annual Review of Psychology*, 46, 467-492.
- Miller, J. L., & Eimas, P. (1983). Studies on the categorization of speech by infants. *Cognition*, 13, 135-165.
- Miller, G. A., & Nicely, P. E. (1955). An analysis of perceptual confusions among some English consonants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 27(2), 338-352.
- Mills, S., Coffey, S., & Neville, H. (1993). Language acquisition and cerebral specialization in 20-month-old infants. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 317-334.
- Milner, B., Taylor, L., & Sperry, R. W. (1968). Lateralized suppression of dichotically presented digits after commissural section in man. *Science*, 161(837), 184-186.
- Mody, M. (1993). *Bases of reading impairment in speech perception: A deficit in rate of auditory processing or in phonological coding?* Unpublished doctoral dissertation, Speech and Hearing Sciences, City University of New York.
- Mody, M., Studdert-Kennedy, M., & Brady, S. (1997). Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology*, 64, 199-231.

- Molfese, D. L. (1978). Neural correlates of categorical speech perception in adults. *Brain and Language*, 5, 25-35.
- Molfese, D. L., & Molfese, V. J. (1988). Right-hemisphere responses from preschool children to temporal cues to speech and non-speech materials: Electrophysiological correlates. *Brain and Language*, 33, 245-259.
- Montgomery, D. (1981). Do dyslexics have difficulty accessing articulatory information. *Psychological Research*, 43, 235-243.
- Morais, J., & Kolinsky, R. (1994). Perception and awareness in phonological processing: the case of the phoneme. *Cognition*, 50, 287-297.
- Mueller, S. T., Seymour, T. L., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (2003). Theoretical implications of articulatory duration, and phonological complexity in verbal working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29(6), 1353-1380.
- Myers, E. B., Blumstein, S. E., Walsh, E., & Eliassen, J. (2009). Inferior frontal regions underlie the perception of phonetic category invariance. *Psychological Science*, 20(7), 895-903.
- Nagarajan, S., Mahncke, H., Salz, T., Tallal, P., Roberts, T., & Merzenich, M.M. (1999). Cortical auditory signal processing in poor readers. *Proceedings of the National Academy of Sciences-USA*, 96, 6483-6488.
- 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.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9, 353-383.
- Newman, R. L. & Connolly, J. F. (2004). Determining the role of phonology in silent reading using event-related brain potentials. *Cognitive Brain Research*, 21, 94-105.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1994). Reaction times and dyslexia. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47, 29-48.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1990). Automaticity: A new framework for dyslexia research? *Cognition*, 35, 159-182.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A.J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: The cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences*, 24(9), 508-511.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (1995). Time estimation deficits in developmental dyslexia: Evidence for cerebellar involvement. *Proceedings of the Royal Society*, 259, 43-47.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Berry, E. L., Jenkins, I. H., Dean, P., & Brooks, D. J. (1999). Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *Lancet*, 353, 1662-1167.
- Nittrouer, S. (1999). Do temporal processing deficits cause phonological processing problems? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42(4), 925-942.
- Nittrouer, S., & Miller, M. E. (1997). Predicting developmental shifts in perceptual weighting schemes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 2253-2266.

- Norris, D. (1994). Shortlist: A connexionist model of continuous speech recognition. *Cognition*, 52, 189-234.
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Ortiz, R., Jimenez, J. E., & Miranda, E. G. (2007). Locus and nature of perceptual phonological deficit in spanish children with reading disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 40(1), 80-92.
- Oscar-Berman, M., Zurif, E. B., & Blumstein, S. (1975). Effects of unilateral brain damage on the processing of speech sounds. *Brain and Language*, 2, 345-355.
- Page, M. P. A., Madge, A., Cumming, N., & Norris, D. G. (2007). Speech errors and the phonological similarity effet in short-term memory: Evidence suggesting a common locus. *Journal of Memory and Language*, 56, 49-64.
- Paulesu, E., Démonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cossu, G., Habib, M., Frith, C. D., & Frith, U. (2001). Dyslexia, Cultural diversity and Biological unity. *Science*, 291, 2165-2167.
- Paulesu, E., Frith, U., Snowling, M., Gallagher, A., Morton, J., Frackowiak, R.S.J., & Frith, C.D. (1996). Is developmental dyslexia a disconnection syndrome? Evidence from PET scanning. *Brain*, 119, 143-157.
- Pavlidis, G. T. (1981). Do eye movements hold the key to dyslexia? *Neuropsychologia*, 19, 57-64.
- Peereman, R. (1991). La médiation phonologique dans la reconnaissance des mots écrits. In R. Kolinsky, J. Morais, & J. Segui. (Eds.), *La Reconnaissance des mots dans différentes modalités sensorielles* (pp.119-163). Paris: Presses Universitaires de France.
- Pegg, J., & Werker, J. F. (1997). Adult and infant perception of two English phones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(6), 4742-4753.
- Pelli, D. G, Burns, C. W., Farrel, B., & Moore-Page, D. C. (2006). Feature detection and letter identification. *Vision Research*, 46, 4646-4674.
- Peng, D-L. Ding, G-S, Perry, C., Xu, D., Jin, Z., Luo, Q., Zhang, L., & Deng, Y. (2004). fMRI evidence for the automatic phonological activation of briefly presented words. *Cognitive Brain Research*, 20, 156-164.
- Perecman, E., & Kellar, L. (1981). The effect of voice and place among aphasic, nonaphasic right-damaged, and normal subjects on a metalinguistic task. *Brain and Language*, 12, 213-223.
- Perfetti, C. A., & Bell, L. (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 word reading: Evidence from backward masking. *Journal of Memory and Language*, 27, 59-70.
- Perfetti, C. A., & Zhang, S. (1991). Phonemic processes in reading chinese words. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Language*, 1, 633-643.

- Peter, M., & Turvey, M. T. (1994). Phonological codes are early sources of constraint in visual semantic categorization. *Perception & Psychophysics*, 55(5), 497-504.
- Peters, R.W. (1963). Dimension of perception of consonants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35, 1985-1989.
- Pisoni, D. B., & Tash, J. (1974). Reaction times to comparisons with and cross phonetic categories. *Perception & Psychophysics*, 15, 285-290.
- Poeppel, D. (2003). The analysis of speech in different temporal integration windows: Cerebral lateralization as 'asymmetric sampling in time'. *Speech Communication*, 41, 245-255.
- Poeppel, D., Idsardi, W. J., & van Wassenhove, V. (2008). Speech perception at the interface of neurobiology and linguistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363, 1071-1086.
- Polka, L., Colantonio, C., & Sundara, M. (2001). A cross-language comparison of /d/ - /D/ discrimination: Evidence for a new developmental pattern? *Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 2190-2201.
- Polka, L., & Werker, J. F. (1994). Developmental changes in perception of nonnative vowel contrasts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(2), 421-435.
- Post, Y. V., Foorman, B. R., Hiscock, M. (1997). Speech perception and speech production as indicators of reading difficulty. *Annals of Dyslexia*, 47, 1-25.
- Prasada, S., & Pinker, S. (1993). Generalization of regular and irregular morphological patterns. *Language and Cognitive Processes*, 8, 1-56.
- Price, C. J. (1998). The functional anatomy of word comprehension and production. *Trends in Cognitive Science*, 2, 281-288.
- Price, C. J., Warburton, E. A., Moore, C. J., Frackowiak, R. S., & Friston, K. J. (2001). Dynamic diaschisis: Anatomically remote and context-sensitive human brain lesions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 419-429.
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2000). Functional neuroimaging studies of reading and reading disability (developmental dyslexia). *Mental Retardation and Developmental Disability Research Review*, 6, 207-213.
- Rack, J., Snowling, M. J., & Olson, R. K. (1992). The nonword reading deficit in developmental dyslexia: A review. *Reading Research Quarterly*, 27, 29-53.
- Rack, J., Hulme, C., Snowling, M., & Wightman, J. (1994). The role of phonology in young children learning to read words: The direct-mapping hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 57, 42-71.
- Rae, C., Harasty, J. A., Dzendrowskyj, T. E., Talcott, J. B., Simpson, J. M., Blamire, A., Dixon, R., Lee, M. A., Thompson, C., Styles, P., Richardson, A. J., & Stein, J. F. (2002). Cerebellar morphology in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 40, 1-8.
- Rae, C., Lee, M. A., Dixon, R. M., Blamire, A. M., Thompson, C. H., Styles, P., Talcott, J., Richardson, A. J., & Stein, J. F. (1998). Metabolic abnormalities in developmental dyslexia detected by ¹H magnetic resonance spectroscopy. *Lancet*, 351, 1849-1852.

- Ramus, F., Pidgeon, E., & Frith, U. (2003a). The relationship between motor control and phonology in dyslexics children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44, 712-722.
- Ramus, F., Rosen, S., Dakin, S. C., Day, B. L., Castellote, J. M., White, S., & Frith, U. (2003b). Theories of developmental dyslexia: Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain*, 126, 841-865.
- Rayner, K., Sereno, S. C., Lesch, M. F., & Pollatsek, A. (1995). Phonological codes are automatically activated during reading: Evidence from an eye movement priming paradigm. *Psychological Science*, 6, 26-32.
- Rebattel, M., & Bedoin, N. (2001). Cerebral hemispheric asymmetry in voicing and manner of articulation processing in reading. Poster presented at the *XIIth Conference of the European Society of Cognitive Psychology (ESCP)*, Edinburg: Scotland.
- Reed, M. A. (1989). Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in dyslexic children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48, 270-292.
- Reitsma, P., & Vinke, J. (1986). Individuele verschillen in direct en indirect lezen. In P. Reitsme, A. G. Bus, & W. H. J. Van Bon (Eds.), *Lerel lezen en spellen: Ontwikkeling en problemen* (pp. 80-85). The Netherlands, Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Rey, A., Jacobs, A. M., Schmidt-Weigand, F., & Ziegler, J. C. (1998). A phoneme effect in visual word recognition. *Cognition*, 68, 71-80.
- Rey, V., de Martino, S., Espesser, R., & Habib, M. (2002). Temporal processing and phonological impairment in dyslexia: Effect of phoneme lengthening on order judgement of two consonants. *Brain and Language*, 80, 576-591.
- Rimol, L. M., Eichele, T., & Hugdahl, K. (2006). The effect of voice-onset-time on dichotic listening with consonant-vowel syllables. *Neuropsychologia*, 44, 191-196.
- Rogers, M.A., & Storkel, H.L. (1998). Reprogramming phonologically similar utterances: The role of phonetic features in pre-motor encoding. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 41, 258-274.
- Rosen, S. (2003). Auditory processing in dyslexia and specific language impairment: Is there a deficit? What is its nature? Does it explain anything? *Journal of Phonetics*, 31(3), 509-527.
- Rosen, S., & Manganari, E. (2001). Is there a relationship between speech and nonspeech auditory processing in children with dyslexia ? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 44, 720-736.
- Rosenthal, R., Rosnow, R. L., & Rubin, D. B. (2000). Contrasts and effect sizes in behavioral research: A correlational approach. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Rowse, H. J., & Wilshire, C. E. (2007). Comparison of phonological and whole-word treatments for two contrasting cases of developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 24(8), 817-842.
- Ruff, S., Cardebat, D., Marie, N., & Démonet, J. F. (2002). Enhanced response of the left frontal cortex to slowed down speech in dyslexia: An fMRI study. *Neuroreport*, 13, 1285-1289.

- Ruff, S., Marie, N., Celsis, P., Cardebat, D., & Démonet, J. F. (2003). Neural substrates of impaired categorical perception of phonemes in adult dyslexics: An fMRI study. *Brain and Cognition*, 53, 331-334.
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1986). On learning the past tenses of English verbs. In D. E. Rumelhart & J. L. McClelland (Eds.), *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition* (Vol. 2, pp. 216-271). Cambridge, MA: MIT Press.
- Rumsey, J. M., Andreason, P., Zametkin, A. J., Aquino, T., King, A. C., Hamburger, S. D., Pikus, A., Rapoport, J. L., & Cohen, R. M. (1992). Failure to activate the left temporoparietal cortex in dyslexia: An oxygen 15 positron emission tomographic study. *Archives of Neurology*, 49, 527-534.
- Rumsey, J. M., Donohue, B. C., Brady, D. R., Nace, K., Giedd, J. N., & Andreason, P. (1997). A magnetic resonance imaging study of planum temporale asymmetry in men with developmental dyslexia. *Archives of Neurology*, 54, 1481-1489.
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K. L., Maisog, J. M., & Andreason, P. A. (1999). Functional lesion in developmental dyslexia: Left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain and Language*, 70, 187-204.
- Sagey, E. (1986). *The representation of features and relations in nonlinear phonology*. Doctoral Dissertation, MIT.
- Sanders, L. D., & Poeppel, D. (2007). Local and global auditory processing: Behavioral and ERP evidence. *Neuropsychologia*, 45, 1172-1186.
- Scarborough, H. S. (1998). Early identification of children at risk for reading disabilities. Phonological awareness and some other promising, predictors. In B. K. Shapiro, P. J. Accrado, & A. J. Capute (Eds.), *Specific reading disability: A view of the spectrum* (pp. 75-119). New York: York Press.
- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1999). The role of phonological awareness, speech perception, and auditory temporal processing for dyslexia. *European Child and Adolescent Psychiatry*, 8, 28-34.
- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1998). Auditory processing and dyslexia: Evidence for a specific speech processing deficit. *Neuroreport*, 9, 337-340.
- Schwippert, C. E., & Koopmans-Beinum, F. J. (1998). Phoneme boundary perception in dyslexic and normal-reading adults. *Proceedings of the Institute of Phonetic Sciences Amsterdam*, 22, 125-134.
- Segalowitz, N. S., & Cohen, H. (1989). Right hemisphere EEG sensitivity to speech. *Brain and Language*, 37, 220-231.
- 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.
- Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Carré, R., & Démonet, J. F. (2001). Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 44, 384-399.

- Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 336-361.
- Serniclaes, W., Ventura, P., Morais, J., & Kolinsky, R. (2005). Categorical perception of speech sounds in illiterate adults. *Cognition*, 98, B35-B44.
- Sevald, C. A., & Dell, G. S. (1994). The sequential cuing effect in speech production. *Cognition*, 53, 91-127.
- Seymour, P. H. K. (1986). *A cognitive analysis of dyslexia*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Seymour, P. H. K., & Duncan, L. G. (1997). Small versus large unit theories of reading acquisition. *Dyslexia*, 3, 125-134.
- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55, 151-218.
- Share, D. L., Jorm, A. F., Maclean, R., & Matthews, R. (2002). Temporal processing and reading disability. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 15, 151-178.
- Shattuck-Hufnagel, S., & Klatt, D. H. (1979). The limited use of distinctive features and markedness in speech production: Evidence from speech error data. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 18, 41-55.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Constable, R. T., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Lyon, G. R., & Gore, J. C. (2002). Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biological Psychiatry*, 52, 101-110.
- Shelton, J. R., & Weinrich, M. (1997). Further evidence of a dissociation between output phonological and orthographic lexicons: A case study. In A. Caramazza (Ed.), *Access of phonological and orthographic lexical forms: Evidence from dissociations in reading and spelling* (pp. 105-131). UK: Psychology Press.
- Shepard, R. N. (1972). Psychological representation of speech sounds. In E. E. David & P. B. Denes (Eds.), *Human communication: A unified view*. New-York: McGraw-Hill.
- Shvachkin, N. K. (1966). Development of phonemic speech perception in early childhood. In F. Smith & G. A. Mille (Eds.), *The genesis of language*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Simon, C., & Fourcin, A. (1978). Cross-language study of speech-pattern learning. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63, 925-935.
- Simos, P. G., Breier, J. I., Fletcher, J. M., Bergman, E., & Papanicolaou, A. C. (2000a). Cerebral mechanisms involved in word reading in dyslexic children: A magnetic source imaging approach. *Cerebral Cortex*, 10, 809-816.
- Simos, P. G., Breier, J. I., Fletcher, J. M., Foorman, B. R., Bergman, E., Fishbeck, E., & Papanicolaou, A. C. (2000b). Brain activation in dyslexic children during non-word reading: A magnetic source imaging study. *Cerebral Neuroscience Letters*, 290, 61-65.
- Simos, P. G., Breier, J. I., Wheless, J. W., Maggio, W. W., Fletcher, J. M., Catillo, E. M., & Papanicolaou, A. C. (2000c). Brain mechanisms for reading: The role of

- the superior temporal gyrus in word and pseudoword naming. *Neuroreport*, 11, 2443-2467.
- Simos, P. G., Molfese, D. L., & Brenden, R. A. (1997). Behavioral and electrophysiological indices of voicing-cue discrimination: Laterality patterns and development. *Brain and Language*, 57, 122-150.
- Singh, S., & Black, J. W. (1966). Study of twenty-six intervocalic consonants as spoken and recognized by four language groups. *Journal of the Acoustical Society of America*, 39(2), 372-387.
- Singh, L., Morgan, J. L., & White, K. S. (2004). Preference and processing: The role of speech affect in early spoken word recognition. *Journal of Memory and Language*, 51, 173-189.
- Singh, S., Woods, D. R., & Becker, G. M. (1972). Perceptual structure of 22 prevocalic English consonants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 52, 1698-1713.
- Skottun, B.C. (2000). The magnocellular deficit theory of dyslexia: The evidence from contrast sensitivity. *Vision Research*, 40, 111-127.
- Slaghuis, W. L., Lovegrove, W. J., & Davidson, J. (1993). Visual and language processing deficits are concurrent in dyslexia. *Cortex*, 29, 601-615.
- Slaghuis, W. L., & Ryan, J. F. (1999). Spatio-temporal contrast sensitivity, coherent motion, and visible persistence in developmental dyslexia. *Vision Research*, 39, 651-668.
- Slowiaczek, L. M., Nusbaum, H. C., & Pisoni, D. B. (1987). Phonological priming in auditory word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 64-75.
- Snoeren, N. A., Hallé, P. A., & Segui, J. (2006). A voice for the voiceless: Production and perception of assimilated stops in French. *Journal of Phonetics*, 34, 241-268.
- Snow, K. (1964). A comparative study of sound substitutions by « normal » first grade children. *Speech Monographs*, 31, 135-141.
- Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia*. Oxford: Blackwell.
- Snowling, M. J., Stackhouse, J., & Rack, J. (1986). Phonological dyslexia and dysgraphia: A developmental analysis. *Cognitive Neuropsychology*, 3, 309-339.
- Sommers, M. S., Kirk, K. I., & Pisoni, D. B. (1997). Some considerations in evaluating spoken word recognition by normal-hearing, noise-masked normal-hearing, and cochlear implant listeners. I: The effects of response format. *Ear and Hearing*, 18, 89-99.
- Sparks, R., & Geschwind, N. (1968). Dichotic listening in man after section of neocortical commissure, *Cortex*, 4, 3-16.
- Sperling, A. J., Lu, Z. L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. (2003). Selective magnocellular deficits in dyslexia: A “phantom contour” study. *Neuropsychologia*, 41, 1422-1429.
- Spinelli, D., Angelelli, P., De Luca, M., Di Pace, E., Judica, A., & Zoccolotti, P. (1997). Developmental surface dyslexia is not associated with deficits in the transient visual system. *Neuroreport*, 8, 1807-1812.

- Spoehr, K. T. (1978). Phonological encoding in visual word recognition. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 17, 127-141.
- Spoehr, K. T., & Smith, E. E. (1975). The role of orthographic and phonotactic rules in perceiving letter patterns. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 104(1), 21-34.
- Sprenger-Charolles, L. (2003). Linguistic processes in reading and spelling. The case of alphabetic writing systems: English, French, German and Spanish. In T. Nunes, & P. Bryant (Eds.), *Handbook of children's literacy* (pp. 43-65). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2003). *Lecture et Dyslexie*. Paris: Dunod.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Lacert, P., & Serniclaes, W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: Evidence from processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 54, 87-104.
- Sprenger-Charolles, L., & Serniclaes, W. (2004). Nature et origine des déficits dans la dyslexie développementale: l'hypothèse phonologique. In S. Valdois, P. Colé, & D. David (Eds.), *Apprentissage de la lecture et dyslexie* (pp. 113-146). Marseille: Solal.
- Sroka, J. J., & Braida, L. D. (2005). Human and machine consonant recognition. *Speech Communication*, 45, 401-423.
- Stackhouse, J. (1992). Developmental verbal dyspraxia 1: A review and critique. *European Journal of Disorders of Communication*, 27, 19-34.
- Stager, C. L., & Werker, J. F. (1997). Infants listen for more phonetic detail in speech perception than in word learning tasks. *Nature*, 388, 381-382.
- Stanovich, K. E., Siegel, L. S., & Gottardo, A. (1997). Converging evidence for phonological and surface subtypes of reading disability. *Journal of Educational Psychology*, 89, 114-127.
- Stein, J. (2003). Visual motion sensitivity and reading. *Neuropsychologia*, 41, 1785-1793.
- Stein, J., & Talcott, J. (1999). Impaired neuronal timing in developmental dyslexia: The magnocellular hypothesis. *Dyslexia*, 5, 59-77.
- Stein, J., Talcott, J., & Walsh, V. (2000a). Controversy about the visual magnocellular deficit in developmental dyslexics. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 209-211.
- Stein, J., & Walsh, V. (1997). To see but not to read: The magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neurosciences*, 20(4), 147-152.
- Stemberger, J. P. (1990). Wordshape errors in language production. *Cognition*, 35, 123-157.
- Stemberger, J. P. (1989). Speech errors in early child language production. *Journal of Memory and Language*, 28, 164-188.
- Stéphanovitch, C. (1997). *Manuel d'histoire de la langue anglaise des origines à nos jours*. Paris: Edition marketing.
- Stevens, K. N. (2002). Toward a model for lexical access based on acoustic landmarks and distinctive features. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), 1872-1891.

- Stevens, K. N. (1996). Critique: Articulatory-acoustic relations and their role in speech perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99, 1693–1694.
- Stoodley, C. J., Talcott, J. B., Carter, E. L., Witton, C., & Stein, J. F. (2000). Selective deficits of vibrotactile sensitivity in dyslexic readers. *Neuroscience Letters*, 295, 13-16.
- Storkel, H. L. (2002). Restructuring similarity neighborhoods in the developing mental lexicon. *Journal of Child Language Development*, 29, 251-274.
- Stuart, G. W., McAnally, K. I., & Castles, A. (2001). Can contrast sensitivity functions in dyslexia be explained by inattention rather than a magnocellular deficit? *Vision Research*, 41, 3205-3211.
- Studdert-Kennedy, M., & Mody, M. (1995). Auditory temporal perception deficits in the reading impaired: A critical review of the evidence. *Psychonomic Bulletin*, 2, 508-514.
- Studdert-Kennedy, M., & Schankweiler, D. (1970). Hemispheric specialization for speech perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 48, 579-594.
- Sundara, M., Polka, L., & Genesee, F. (2006). Language experience facilitates discrimination of /d – D/ in monolingual and bilingual acquisition of English. *Cognition*, 100(2), 186-199.
- Swingley, D. (2005). 11-month-olds' knowledge of how familiar words sound. *Developmental Science*, 8, 432-443.
- Swingley, D., & Aslin, R. N. (2002). Lexical neighborhoods and the word-form representations of 14-month-olds. *Psychological Science*, 13(5), 480-484.
- Swingley, D., & Aslin, R. N. (2000). Spoken word recognition and lexical representation in very young children. *Cognition*, 76, 147-166.
- Swingley, D., Pinto, J. P., & Fernald, A. (1999). Continuous processing in word recognition at 24 months. *Cognition*, 71, 73-108.
- Talcott, J. B., Hansen, P. C., Assoku, E. L., & Stein, J. F. (2000). Visual motion perception in dyslexia: Evidence for temporal and energy integration deficits. *Neuropsychologia*, 38, 935-943.
- Talcott, J. B., Hansen, P. C., Willis-Owen, C., McKinnell, C., Richardson, A., & Stein, J. (1998). Visual magnocellular impairment in adult developmental dyslexics. *Neuro-Ophthalmology*, 20, 187-201.
- Tallal, P. (2004). Improving language and literacy is a matter of time. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 721-728.
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics and reading disabilities in children. *Brain and Language*, 9, 182-198.
- Tallal, P., Miller, S., & Fitch, R. H. (1993). Neurobiological basis of speech: A case for the preeminence of temporal processing. *Annals of the New York Academy of Science*, 682, 27-47.
- Tallal, P., & Piercy, M. (1975). Developmental aphasia: The perception of brief vowels and extended stop consonants. *Neuropsychologia*, 13, 69-74.
- Tallal, P., & Piercy, M. (1974). Developmental aphasia: Rate of auditory processing and selective impairment of consonant perception. *Neuropsychologia*, 12, 83–93.

- Tallal, P., & Piercy, M. (1973). Developmental aphasia: Impaired rate of nonverbal processing as a function of sensory modality. *Neuropsychologia*, 11, 389-398.
- Tallal, P., Stark, R., & Mellits, D. (1985). Identification of language-impaired children on the basis of rapid perception and production skills. *Brain and Language*, 25, 314-322.
- Tan, L. H., & Perfetti, C. A. (1999). Phonological and associative inhibition in the early stages of English word identification: Evidence from backward masking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 59-69.
- Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabrieli, J. D. E. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: Evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 100, 2860-2865.
- Temple, C. M., & Marshall, J. C. (1983). A case study of developmental phonological dyslexia. *British Journal of Psychology*, 74, 517-533.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Salidis, J., Deutsch, G. K., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabrieli, J. D. E. (2001). Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children: An fMRI study. *NeuroReport*, 12(2), 299-307.
- Thomson, J. B., Chenault, B., Abbott, R. D., Raskind, W. H., Richards, T., Aylward, E., BErninger, V. W. (2005). Converging evidence for attentional influences on the orthographic word form in child dyslexics. *Journal of Neurolinguistics*, 18, 93-126.
- Thoonen, G., Maassen, B., Gabreels, F., & Schreuder, R. (1994). Feature analysis of singleton consonant errors in developmental verbal dyspraxia. *Journal of Speech and Hearing Research*, 37, 1424-1440.
- Treisman, M. (1978). Space or lexicon? The word frequency effect and error response frequency effect. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 17, 37-59.
- Treiman, R. (1993). *Beginning to spell: A study of first-grade children*. New-York: Oxford University Press.
- Treiman, R. (1985). Onsets and rimes as units of spoken syllables: Evidence from children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 39, 161-181.
- Treiman, R., Broderick, V., Tincoff, R., & Rodriguez, K. (1998). Children's phonological awareness: Confusions between phonemes that differ only in voicing. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 3-21.
- Treiman, R., & Breaux, A. M. (1982). Common phoneme and overall similarity relations among spoken syllables: Their use by children and adults. *Journal of Psycholinguistic Research*, 11, 569-598.
- Treiman, R., Goswami, U., & Bruck, M. (1990). Not all nonwords are alike: Implications for reading development and theory. *Memory and Cognition*, 18, 559-567.
- Tremblay, K., Kraus, N., Carrell, T. D., & McGee, T. (1997). Central auditory system plasticity: Generalization to novel stimuli following listening training. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(6), 3762-3773.
- Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Phonological Review*, 84, 327-352.

- Utman, J. A., Blumstein, S. E., & Sullivan, K. (2001). Mapping from sound to meaning: Reduced lexical activation in Broca's aphasics. *Brain and Language*, 79, 444-472.
- Valdois, S. (2004a). The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: Review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia*, 10(4), 339-363.
- Valdois, S. (2004b). Les sous-types de dyslexies développementales. In S. Valdois, P. Colé, & D. David (Eds.), *Apprentissage de la lecture et dyslexie* (pp. 171-196). Marseille: Solal.
- Valdois, S. (1996). A Case Study of Developmental Surface Dyslexia and Dysgraphia. *Brain & Cognition*, 32, 229-231.
- Valdois, S., Bosse, M. L., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D., & Pellat, J. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 16, 541-572.
- Valdois, S., Bosse, M. L., & Tainturier, M. J. (2004b). *The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: Review of evidence for a selective visual attentional disorder*. *Dyslexia*, 10, 1-25.
- Valdois, S., Colé, P., & David, D. (2004a). *Apprentissage de la lecture et dyslexie développementale: de la théorie à la pratique*. Marseille : Solal.
- Valdois, S., Gérard, C., Vanault, P., & Dugas, M. (1995). Peripheral Developmental Dyslexia: A Visual Attentional Account? *Cognitive Neuropsychology*, 12(1), 31-67.
- Valdois, S., & Launay, L. (1999). Evaluation et Rééducation Cognitives des Dyslexies Développementales: illustration à partir d'une étude de cas. In P. Azouvi, D. Perrier, & M. Van der Linden (Eds.), *La rééducation en neuropsychologie: étude de cas* (pp. 95-115). Marseille: Solal.
- Van den Broecke, M. P. R., & Goldstein, L. (1980). Consonant features in speech errors. In V. Fromkin (Ed.), *Errors in linguistic performance: Slips of the tongue, ear, pen and hand* (pp. 47-65). New York: Academic Press.
- Van der Hulst, H. (2005). Molecular structure of phonological segments. In P. Carr, J. Durand, & C. J. Ewen (Eds.), *Headhood, elements, specification and contrastivity* (pp. 193-234). Amsterdam: John Benjamins Publishing Company.
- Van IJzendoorn, M.H., & Bus, A.G. (1994). Meta-analytic confirmation of the non-word reading deficit in developmental dyslexia. *Reading Research Quarterly*, 29, 266-275.
- Vanni, S., Uusitalo, M. A., Kiesila, P., & Hari, R. (1997). Visual motion activates V5 in dyslexics. *Neuroreport*, 8, 1939-1942.
- Van Orden, G. C. (1991). Phonologic mediation is fundamental to reading. In D. Besner, & G. W. Humphreys (Eds.), *Basic processes in reading: Visual word Recognition*. Hillsdale, NJ:Lawrence Erlbaum Associates.
- Van Orden, G. C. (1987). A ROWS is a ROSE: Spelling, sound and reading. *Memory and Cognition*, 15, 181-198.
- 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., Jansen op de Haar, M. A., & Bosman, A. M. T. (1997). Complex dynamic systems also predict dissociations, but they do not reduce to autonomous components. In A. Caramazza (Ed.), *Access of phonological and orthographic lexical forms: Evidence from dissociations in reading and spelling* (pp. 131-165). UK: Psychology Press.
- 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(3), 371-386.
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): What we have learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45, 2-40.
- Ventura, P., Kolinsky, R., Querido, J. L., Fernandes, S., & Morais, J. (2007). Is phonological encoding in naming influenced by literacy? *Journal of Psycholinguist Research*, 36, 341-360.
- Verstaen, V., Humphreys, G. W., Olson, A., & d'Ydewalle, G. (1995). Are phonemic effects in backward masking evidence for automatic prelexical phonemic activation in visual word recognition? *Journal of Memory and Language*, 34, 335-356.
- Viret, A. C. (2003). *Décours temporel des effets d'amorçage et de masquage phonétique inter-lettre dans un stimulus écrit: étude auprès d'adultes et d'enfants normo-lecteurs*. Mémoire de Maîtrise de Psychologie option Neurosciences, Université Lumière Lyon 2.
- Vitevitch, M. S., & Luce, P. A. (1999). Probabilistic phonotactics and neighborhood activation in spoken word recognition. *Journal of Memory and Language*, 40, 374-408.
- Vitz, P. C., & Winkler, B. S. (1973). Predicting the judged « similarity of sound » of English words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 373-388.
- Vogel Sosa, A., & Stoel-Gammon, C. (2006). Patterns of intra-word phonological variability during the second year of life. *Journal of Child Language*, 33(1), 31-50.
- Walley, A. C. (1988). Spoken word recognition by young children and adults. *Cognitive Development*, 3, 137-165.
- Wang, M. D., & Bilger, R. C. (1973). Consonant confusions in noise: A study of perceptual features. *Journal of the Acoustical Society of America*, 54, 1248-1266.
- Wang, Y., Spence, M. M., Jogman, A., & Sereno, J. (1999). Training American listeners to perceive Mandarin tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106, 3649-3658.
- Warner, N., Smits, R., McQueen, J. M., & Cutler, A. (2005). Phonological and statistical effects on timing of speech perception: Insights from a database of Dutch diphone perception. *Speech Communication*, 46, 53-72.
- Waters, G. S., Bruck, M., & Seidenberg, M. (1985). Do children use similar processus to read and spell words? *Journal of Experimental Child Psychology*, 39, 511-530.
- Wehner, D. T., Ahlfors, S. P., & Mody, M. (2007). Effects of phonological contrast on auditory word discrimination in children with and without reading disability: A magnetoencephalography (MEG) study. *Neuropsychologia*, 45(14), 3251-3262.

- Werker, J. F., & Curtin, S. (2005). PRIMIR: A developmental model of speech processing. *Language Learning and Development*, 1, 197-234.
- Werker, J. F., Fennell, C. T., Corcoran, K. M., & Stager, C. L. (2002). Infants' ability to learn phonetically similar words: Effects of age and vocabulary size. *Infancy*, 3, 1-30.
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (1984). Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development*, 7, 49-63.
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (1987). Speech perception in severely disabled and average reading children. *Canadian Journal of Psychology*, 41, 1, 48-61.
- White, S., Milne, E., Rosen, S., Hansen, P., & Swettenham, J., Frith, U., & Ramus, F. (2006). The role of sensorimotor impairments in dyslexia: A multiple case study of dyslexic children. *Developmental Science*, 9(3), 237-255.
- White, K. S., & Morgan, J. L. (2008). Sub-segmental detail in early lexical representations. *Journal of Memory and Language*, 59, 114-132.
- Whitney, C., & Cornelissen, P. (2005). Letter-position encoding and dyslexia. *Journal of Research in Reading*, 28(3), 274-301.
- Wickelgren, W. A. (1969). Auditory and articulatory coding in verbal short-term memory. *Psychological Review*, 76, 232-235.
- Wickelgren, W. A. (1966). Distinctive features and errors in short-term memory for English consonants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 39(2), 388-398.
- Wickelgren, W. A. (1965). Acoustic similarity and retroactive inference in short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 4, 53-61.
- Willcutt, E., & Pennington, B. (2000). Comorbidity of reading disability and attention deficit/hyperactivity disorder: Differences by gender and subtypes. *Journal of Learning Disabilities*, 33, 179-191.
- Williams, F. (1979). The modification of speech perception and production in second-language learning. *Perception and Psychophysics*, 26, 95-104.
- Williams, F. (1970). *Analysis of production errors in the phonetic performance of school-age standard-English-speaking children*. Final Report. Texas University, Austin. Center for Communication Research.
- Wilmer, J. B., Richardson, A. J., Chen, Y., & Stein, J. (2004). Two visual motion processing deficits in developmental dyslexia associated with different reading skills deficits. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 528-540.
- Wimmer, H. (1996). The early manifestation of developmental dyslexia: Evidence from German children. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 8, 171-188.
- Wimmer, H. (1995). The nonword deficit in developmental dyslexia: Evidence from German children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 61, 80-90.
- Wimmer, H. (1993). Characteristics of developmental dyslexia in a regular writing system. *Applied Psycholinguistics*, 14, 1-33.
- Wimmer, H., Mayringer, H., & Landerl, K. (1998). Poor reading: A deficit in skill-automatization or a phonological deficit? *Scientific Studies of Reading*, 2, 321-340.

- Wimmer, H., Mayringer, H., & Raberger, T. (1999). Reading and dual-task balancing: Evidence against the automatization deficit explanation of developmental dyslexia. Special Series: Prevention and Treatment of Dyslexia. *Journal-of-learning-disabilities*, 32, 473-478.
- Winer, B. J., Brown, D. R., & Michels, K. M. (1991). Statistical principles in experimental design(third edition). New-York: McGraw-Hill.
- Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., Stein, J. F., & Green, G. G. R. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology*, 8, 791-797.
- Wolf, M. (1991). Naming speed and reading: The contribution of the cognitive neurosciences. *Reading Research Quarterly*, 26, 123-141.
- Wolf, M., & Bowers, P. G. (1999). The question of naming speed deficits in developmental reading disabilities: An introduction to the double-deficit hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 19, 1-24.
- Wolf, M., Bowers, P. G., & Biddle, K. (2000). Naming-speed processes, timing, and reading: A conceptual review. *Journal of Learning Disabilities*, 33, 387-407.
- Wolf, M., Goldberg O'Rourke, A., Gidney, C., Lovett, M., Cirino, P., & Morris, R. (2002). The second deficit: An investigation of the independence of phonological and namingspeed deficits in developmental dyslexia. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 15, 43-72.
- Wydell, T. N., Patterson, K. E., & Humphreys, G. W. (1993). Phonologically mediated access to meaning for Kanji: Is a Rows still a Rose in Japanese Kanji ? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19, 491-514.
- Yaniv, I., Meyer, D. E., Gordon, P. C., Huff, C. A., & Sevald, C. A. (1990). Vowel similarity, connectionist models, and syllable structure in motor programming of speech. *Journal of Memory and Language*, 29, 1-26.
- Yap, R., & Van Der Leij, A. (1994). Testing the automatization deficit hypothesis of dyslexia via a dual-task paradigm. *Journal of Learning Disability*, 27, 660-665.
- Yeni-Khomshian, G. H., & Lafontaine, L. (1983). Discrimination and identification of voicing and place contrasts in aphasic patients. *Canadian Journal of Psychology*, 37, 107-131.
- Yeni-Khomshian, G. H., Ludlow, C. L., Rosenberg, J., Fair, C., & Salazar, A. (1986). Lesion locations associated with speech perception deficits following penetrating head injury. *Neuropsychologia*, 24(5), 631-647.
- Yip, M. C. W. (2004). What is similar in phonological-similarity effect? Paper presented at the 26th Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Chicago: Etats-Unis.
- Zabell, C., & Everatt, J. (2002). Surface and phonological subtypes of adult developmental dyslexia. *Dyslexia*, 8, 160-177.
- Zamuner, T. S. (2009). The structure and nature of phonological neighbourhoods in children's early lexicons. *Journal of Child Language*, 36(1), 3-21.

- 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., Perry, C., Ma-Wyatt, A., Ladner, D., & Schule-Körne, D. (2003). Developmental dyslexia in different languages: Language-specific or Universal? *Journal of Experimental Child Psychology*, 86, 169-193.
- 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(3),845-860.

Notes bibliographiques

- Barton, D. (1978). The discrimination of minimally-different pairs of real words by children aged 2 ; 3 to 2 ; 10. In N. Waterson, & C . Snow (Eds.), *The development of communication* (pp. 255-261). Chichester: Wiley.
- Frisch, S. A. (1996). *Similarity and frequency in phonology*. PhD thesis, Dept. of Linguistics, Northwestern University, Evanstone Illinois, US Available online as Rutgers Optimality Archive 198-0597: <http://roa.rutgers.edu> .
- Geschwind, N., & Galaburda, A. M. (1985). Cerebral lateralization. Biological mechanisms, associations and pathology: I. A hypothesis and a program for research. *Archives of Neurology*, 42, 428-459.
- Liberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54(5), 358-368.
- Lovegrove, W. J., Garzia, R. P., & Nicholson, S. B. (1990). Experimental evidence for a transient system deficit in specific reading disability. *Journal of the American Optometric Association*, 61, 137-146.
- Lovegrove, W. J., Martin, F., Bowling, A., Blackwood, M., Badcock, D., & Paxton, S. (1982). Contrast sensitivity functions and specific reading disability. *Neuropsychologia*, 20(3), 309-315.
- Martin, F., & Lovegrove, W. J. (1984). The effects of field size and luminance on contrast sensitivity differences between specifically reading disabled and normal children. *Neuropsychologia*, 22(1), 73-77.
- Merzenich, M. M., Jenkins, W. M., Johnston, P., Schreiner, C., Miller, S. L., & Tallal, P. (1996). Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science*, 271, 77-80.
- Trubetzkoy, N. (1939). Grundzuege der Phonologie. In *Travaux du Cercle Linguistique de Prague* 7.
- Wertz, R. T., LaPointe, L. L., & Rosenbek, J. C. (1991). *Apraxia of speech in adults: The disorder and its management*. San Diego: Singular Publishing Group.