



HAL
open science

Apprendre à lire avec un implant cochléaire : sur la base de quel signal auditif ?

Sophie Bouton

► **To cite this version:**

Sophie Bouton. Apprendre à lire avec un implant cochléaire : sur la base de quel signal auditif?. Psychologie. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2010. Français. NNT : . tel-00585948v1

HAL Id: tel-00585948

<https://theses.hal.science/tel-00585948v1>

Submitted on 14 Apr 2011 (v1), last revised 21 Aug 2013 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DOCTORAT AIX-MARSEILLE UNIVERSITE

UFR de Psychologie

délivré par *l'Université de Provence*

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'AIX-MARSEILLE UNIVERSITE

Formation doctorale : **Psychologie**

Présentée et soutenue publiquement par

Sophie Bouton

Le 3 Décembre 2010

Apprendre à lire avec un implant cochléaire : sur la base de quel signal auditif ?

Directeurs de thèse :

Mme Pascale Colé & M. Willy Serniclaes

JURY

Mme Josiane Bertoncini , Chargée de recherche, <i>CNRS</i> ,	Examineur
Mme Pascale Colé , Professeur, <i>Université de Provence</i> ,	Directeur
Mme Jacqueline Leybaert , Professeur, <i>Université Libre de Bruxelles</i> ,	Rapporteur
M. Christian Lorenzi , Professeur, <i>Université Paris-Descartes</i> ,	Rapporteur
M. Willy Serniclaes , Directeur de recherche, <i>CNRS</i> ,	Directeur
M. Johannes Ziegler , Directeur de recherche, <i>CNRS</i> ,	Examineur

Remerciements

Aucun art n'est plus difficile à atteindre que celui d'être un *guide* parfait. Un tel art réclame un véritable mentor qui ait un sentiment aigu de bienveillance, l'œil qui découvre les larges effets plutôt que les détails, et qui possède avant tout de l'imagination et de la patience, et vous, *Pascale*, vous savez être un tel guide. Votre assurance de ma réussite m'a permis de ne jamais renoncer. Merci de m'avoir menée et de m'accompagner dans le monde de la recherche. Merci de m'avoir transmis votre passion, votre assurance et votre audace.

Willy, vos qualités et vos connaissances scientifiques m'ont toujours captivée. Vos conseils ont fait naître de nouvelles idées et m'ont ouvert l'esprit. Je souhaite que vous trouviez dans ces quelques mots l'expression de ma profonde gratitude et le contentement que j'ai à travailler à vos côtés. Merci de m'avoir guidée dans la réalisation de ma thèse.

*J'*adresse mes remerciements aux chercheurs du LPC qui m'ont chaleureusement accueillie, qui m'ont aidée, conseillée et encouragée dans ma thèse. Je suis honorée d'avoir pu évoluer au sein de ce laboratoire.

Je tiens à remercier *Josiane Bertoncini, Jacqueline Leybaert, Christian Lorenzi, et Johannes Ziegler* qui me font l'honneur d'être membres du jury de ma thèse. Je tiens à vous exprimer toute ma reconnaissance pour avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail.

Je remercie les chercheurs qui ont participé à ma formation, *Josiane Bertoncini, Caroline Floccia, Edouard Gentaz, Christel Leuwers, Thierry Nazzi, Liliane Sprenger-Charolles*, ainsi que les chercheurs du LPP qui à chacune de nos rencontres m'ont aidée à progresser dans ma thèse.

Princesses... MERCI ! Que de bonheur à partager cette thèse avec vous. Vos esprits railleurs permettent de ne jamais baisser les bras et de relativiser tous les petits bobos qui s'amoncellent lors de la thèse. *Suzanne, Marina, Eléonore, Stéphanie, Soazig, Pauline, Stéphanie*, vos compétences scientifiques et votre bonne humeur ont largement contribué à la réussite de cette thèse. Merci.

Organiser les JJCAAS m'a apporté bien plus qu'il n'était possible de l'imaginer. Françoise (ma chère prez'), Pyo, Anaïk, et Giampiero, j'ai été ravie d'organiser ces journées jeunes chercheurs à vos côtés. Vous partagez avec générosité votre vitalité et votre enthousiasme. Ces qualités continueront à embellir mon parcours personnel et scientifique. Merci !

Pour nos rires qui m'ont détendue, merci à Sonia, Sylvain, Julie, Amélie, Thomas, Pascale, Alain, Maxime, Etienne, Gauthier, Francis, Karelle, Guy, Laetitia, Céline, Julie, Cécile, Jennifer, Diane, Louise, Guillaume, Julie, Adrien, Charly, Adrien, Charles, Alice, Clément.

Partir est l'aube de toutes les espérances. Ce n'est qu'après être partie, que je me suis rendue compte du désordre établi. Mais je sais que ce désordre finira par s'agencer, que tu finiras par réapprendre à aimer, à rire, à sentir, à toucher, ... que tu finiras par réapprendre tout. J'ai laissé 1000 belles choses derrière moi. Je ne les oublie pas. *Miguel*, un être qui a compté compte toujours. Merci pour tout ce que tu m'as apporté.

Jour après jour, rencontre après rencontre, j'ai découvert que vos plaisanteries, vos sourires, vos réussites, vos rêves sont ceux de tous les enfants mais que votre courage et votre détermination à *comprendre* vont bien au-delà de ce que d'autres *entendent*. Marie, Charlène, Elodie, Camille, Alexis, Yann, Cynthia, David, Mila, Victor, Nathan, Adèle, Joséphine, Florian, Océane, Anaïs, Claire, Teddy, Kamel, Myriam, Noémie, Nel, Théo, Matthias, Magali, Claire, Hugo, Yasmine, Jessie, Solène, Marc, Florian, Océane, Maher, Cédric, Mélanie, Joey, Youness, merci d'avoir assidument participé à mes expériences.

Ai-je encore rêvé après votre départ ? Oui, évidemment. Mais une fois que les adultes disent en pleurant "*ce n'est pas grave*", on ne rêve plus pareil. On sait que les rêves s'inscrivent sur un dé qui ne tombe pas toujours du bon côté. J'ai dissout au fil des ans les rêves vous concernant, enfouis par la distance et les différences culturelles. Mon rêve est qu'un jour s'annoncent de nouveaux échanges...

A mon frère, dont l'absence ne fait qu'accentuer la mélancolie présente dans mes joies. J'ai fini par comprendre qu'il existe des départs qui ne promettent nulles retrouvailles. Mon manque de toi est *inassouvi*.

Les plus difficiles à remercier sont ceux qui n'ont jamais failli. Il m'est plus difficile d'écrire sur ce qui va, sur ceux que j'aime, qui m'ont permis de ne manquer de rien, qui m'ont toujours poussée vers l'avant et qui me permettent de réaliser mes rêves. J'écris aujourd'hui sur la chance que j'ai de vous avoir comme parents. J'avance dans la vie en respectant les valeurs que j'apprends à vos côtés. En décodant vos comportements, j'ai d'abord compris "*modestie*" : on n'expose pas ses émotions à n'importe qui. Parler, c'est accepter de devenir vulnérable, il importe donc de savoir devant qui l'on s'exprime. Choisir ses confidents, c'est savoir reconnaître dans l'ami la bonté de ses sentiments. "*Audace*" : vous m'avez appris que les conditions matérielles et émotionnelles qui m'ont déterminée à la naissance ne sont pas tout, et que la façon de jouer mes cartes dépend de moi. J'ajouterais "*flexibilité*" : pour vivre, il ne suffit pas d'être fort et de surmonter les épreuves, il faut être capable de changer de stratégies autant de fois que le nécessite la réalité et le tracé de son itinéraire.

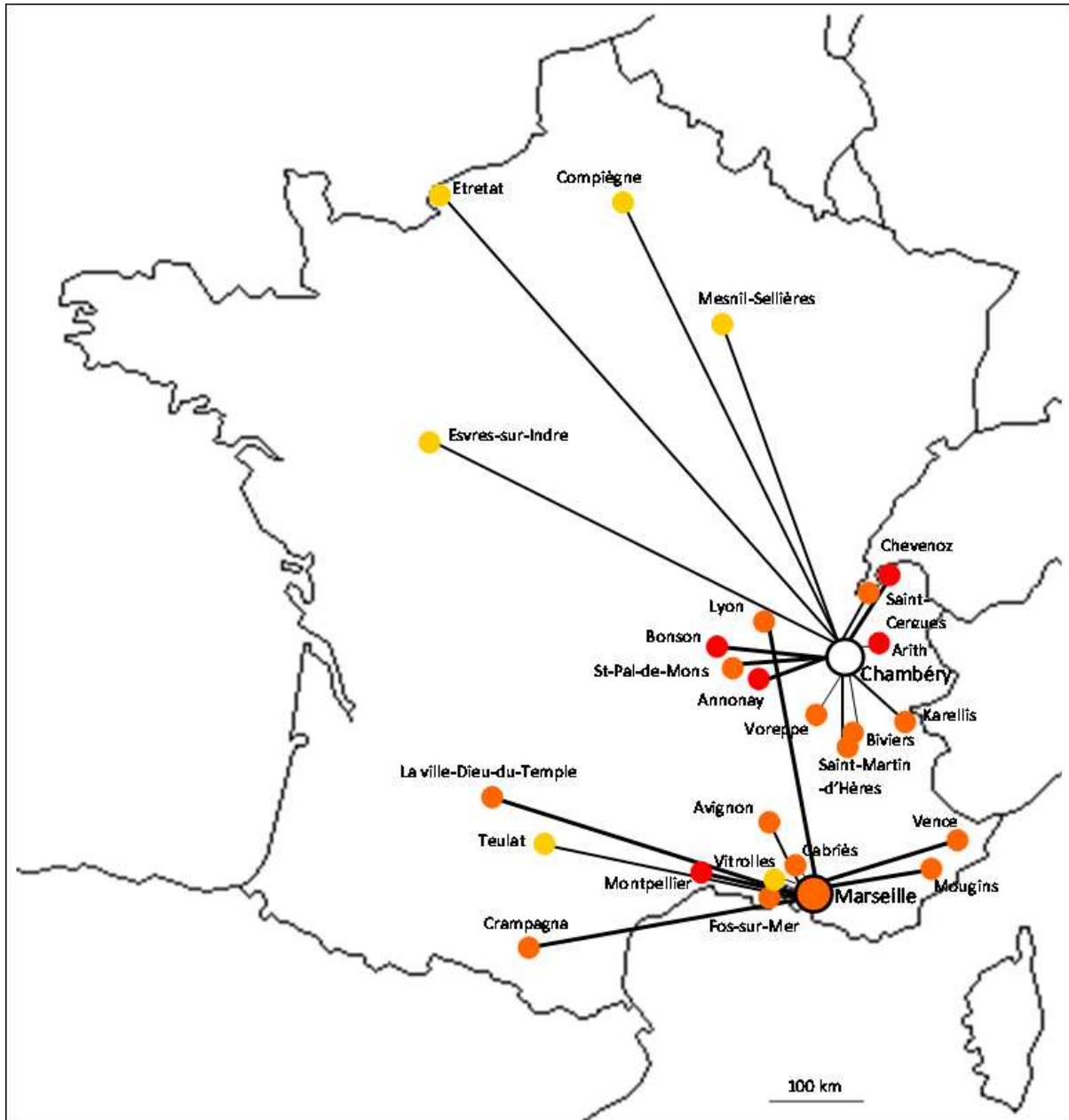
Vous êtes présent à chacun de mes pas. Merci *Maman*, Merci *Papa*

Après plusieurs années de confrontation avec moi-même, j'ai compris que mon vrai modèle, ce ne sont pas nos aînés, mais toi, Marie, car je lis le cheminement de ma vie dans la tienne. Avec Pierre, vous m'avez appris à rire de la vie, de ses petites et de ses grandes brûlures. Vous êtes ma force et me faites aller de l'avant à chaque moment partagé. Je continue à appliquer votre joie de vivre dans mon quotidien, pour garder la tête haute, et faire que le bonheur de vivre se love en moi. Merci *Marie*, Merci *Pierre*

A mon magicien des instants présents. Parce que c'est pour toi que j'ai souhaité apprendre à rire. Tu me fais perdre ce goût amer et cette mélancolie qui accompagnent mes jours (un apprentissage laborieux, je suis mauvaise élève...). Avec toi, je m'applique à ne pas m'ingénier à chercher une recette miracle du bien-être, mais à inscrire le bonheur dans la perspective de partager tes jours. Avec toi, je sais qu'être heureuse, c'est un talent, celui d'être en route vers nos quêtes, que je souhaite nombreuses et univoques. Sami... *Merci*

Sophie

Carte des déplacements effectués pour rencontrer les enfants implantés



	Nombres de trajets	Distance parcourue
○ Chambéry puis Marseille : lieu de résidence personnelle	● De 1 à 4 trajets	— De 180 à 900 kilomètres
○ Avignon : lieu de résidence des participants	● De 5 à 7 trajets	— De 900 à 2000 kilomètres
	● De 8 à 10 trajets	— Plus de 2000 kilomètres
	144 trajets au total	45548 kms au total

Sommaire

Introduction Générale	1
Partie 1. Cadre Théorique	3
<i>Chapitre 1. Apprentissage de la lecture chez l'enfant normo-entendant</i>	3
1. Acquisition de la lecture dans un système alphabétique	3
2. Habiletés associées à la réussite en lecture	6
2.1. Conscience phonémique	7
2.2. Mémoire à court terme phonologique	9
3. Développement des procédures de reconnaissance des mots écrits	12
3.1. Modèle connexionniste de Harm & Seidenberg (1999)	12
3.2. Modèle DRC de Coltheart et al. (2001)	14
3.3. Données expérimentales sur le développement des procédures de reconnaissance des mots écrits	16
3.4. Relation habiletés langagières orales et la lecture	18
<i>Chapitre 2. Percevoir les sons de parole et développer des représentations phonémiques</i>	27
1. Percevoir la parole : description phonétique	27
1.1. Traits phonologiques des consonnes	27
1.2. Traits phonologiques des voyelles	29
2. Acquisition des représentations phonémiques	30
2.1. Perception catégorielle	31
2.2. Perception catégorielle des sons de parole, un développement dynamique	36
2.2.1. Potentiel du nourrisson	36
2.2.2. Acquisition de la perception catégorielle chez l'enfant	39
2.3. Influence des représentations lexicales sur la perception phonémique	41
3. Relation perception des sons de parole et lecture	43
<i>Chapitre 3. Traitement auditif de la parole, surdité et implant cochléaire</i>	53
1. Perception auditive	53
2. Système auditif : anatomie et physiologie	53
2.1. Physiologie de la cochlée	54
2.2. Réponses nerveuses du nerf auditif	56
2.3. Traitement spectro-temporel dans le système auditif	57
3. Description acoustique du signal de parole	58
4. Pathologie de l'audition	63
4.1. Différents types de surdité	63

4.2. <i>Prévalence de la surdité</i>	65
4.3. <i>Population concernée par l'implantation cochléaire</i>	65
4.4. <i>Une prothèse particulière, l'implant cochléaire</i>	66
4.4.1. <i>Constitution d'un implant cochléaire</i>	66
4.4.2. <i>Fonctionnement de l'implant cochléaire et traitement impliqué</i>	67
4.4.3. <i>Facteurs associés à la réussite de la mise en place de l'implant</i>	70

5. Problématique

Partie 2. Etudes Expérimentales

<i>Chapitre 4. Categorical perception of speech sounds in French-speaking children with cochlear implant</i>	87
1. Introduction	89
1.1. <i>Perceptual development of phonological features</i>	89
1.2. <i>Overview of consonant and vowel recognition in CI children</i>	91
1.3. <i>The present study</i>	95
2. Methods	97
2.1. <i>Participants</i>	97
2.2. <i>Experimental tasks</i>	99
2.3. <i>Procedure</i>	101
3. Results	102
4. Discussion	107
4.1. <i>Categorical perception vs. precision</i>	108
4.2. <i>Differences between features</i>	109
4.3. <i>Conclusion</i>	111
<i>Chapitre 5. Influence of lexical knowledge on phoneme discrimination in deaf children with cochlear implant</i>	117
1. Introduction	119
1.1. <i>Lexical influences on speech perception</i>	119
1.2. <i>Speech perception in CI children</i>	121
1.3. <i>The present study</i>	124
2. Method	125
2.1. <i>Participants</i>	125
2.2. <i>Experimental tasks</i>	127
3. Results	129
4. Discussion	133
4.1. <i>Deficit in phonemic discrimination</i>	134
4.2. <i>Lexical effects in speech perception</i>	135
4.4. <i>Conclusion</i>	138

Chapitre 6. Reading acquisition and reading-related skills in French children with cochlear implant	145
1. Introduction	147
1.1. Reading-related skills in children with cochlear implant	148
1.2. Reading skills in children using cochlear implant	151
1.3. The present study	155
2. Method	156
2.1. Participants	156
2.1.1. Participants with cochlear implant	156
2.1.2. Hearing Comparison Group	157
2.2. Experimental tasks	159
2.2.1. Reading-related skills	159
2.2.2. Reading skills	161
2.2.3. Procedure	164
2.2.4. Data processing	165
3. Results	167
3.1. Reading-related skills in French children with cochlear implant	167
3.2. Reading skills in French children with cochlear implant	167
3.2.1. Lexicality effect between regular words and pseudowords	168
3.2.2. Lexicality effect between irregular words and pseudowords	169
4. Discussion	169
4.1. Reading-related skills in French children with cochlear implant	170
4.2. Reading skills in French children with cochlear implant	172

Chapitre 7. Sublexical and lexical processing in reading: data from French-children using cochlear implant	183
Introduction	185
Experiment 1. The use of sublexical and lexical reading procedures in children using cochlear implant	186
<i>Development of reading skills in normal hearing children</i>	186
<i>Reading skills in children using cochlear implant</i>	188
<i>The present study</i>	190
Method	191
Results	197
Discussion	200
Experiment 2. Automatic activation of phonological representations in reading development in children using cochlear implant	201
<i>The pseudohomophone effect</i>	202
Method	203
Results	205
Discussion	208
General Discussion	209

Chapitre 8. Reading and reading-related skills in children using cochlear implant: Prospects for the influence of Cued Speech	217
1. Introduction	219
1.1. <i>Influence of Cued speech on language acquisition in children using cochlear implant</i>	221
1.2. <i>Reading-related skills in children with cochlear implant</i>	222
1.3. <i>Development of reading skills in children using cochlear implant</i>	223
1.4. <i>The present study</i>	226
2. Method	227
2.1. <i>Participants</i>	227
2.2. <i>Experimental tasks</i>	229
3. Results	234
4. Discussion	249
Partie 3. Discussion générale	251
1. Perception des sons de parole chez les enfants munis d'un implant cochléaire	254
2. Reconnaissance des mots écrits chez les enfants munis d'un implant cochléaire	260
2.1. <i>Habilités associées à la réussite en lecture chez les enfants munis d'un implant cochléaire</i>	260
2.2. <i>Procédures de lecture chez les enfants munis d'un implant cochléaire</i>	262
2.3. <i>Influence de la Langue Parlée Complétée sur l'acquisition des représentations phonémiques chez les enfants munis d'un implant cochléaire</i>	266
3. Perspectives de recherche	268
3.1. <i>Etude de la correspondance entre signaux acoustiques et phonémiques</i>	268
3.2. <i>Etude développementale de l'influence des connaissances lexicales sur la perception phonémique</i>	270
3.3. <i>Etude des compétences de compréhension orale et de compréhension écrite</i>	272

Introduction générale

Dans les sociétés industrialisées, savoir lire est une condition essentielle à l'intégration sociale et professionnelle. Une altération des capacités de lecture constitue un véritable handicap et il est important de détecter les populations susceptibles de souffrir de troubles de la lecture.

La déficience auditive est le déficit sensoriel le plus fréquent chez l'enfant. En France, la prévalence de la surdité est estimée entre 0,49 et 0,8 pour mille naissances (Avan, Cazals, Dauman, Denoyelle, et Hardelin, 2006). Ses conséquences sur le développement de la perception de la parole et l'acquisition de la lecture sont importantes. L'objectif de ce travail de thèse est de préciser les compétences de perception de la parole et de reconnaissance des mots écrits des enfants sourds profonds congénitaux munis d'un appareillage particulier, l'implant cochléaire. L'implant cochléaire correspond à l'appareillage le plus fréquemment utilisé (en 2010, plus de 6000 patients sont porteur d'un implant cochléaire en France). Il est donc nécessaire de préciser le développement de compétences langagières particulières chez les enfants implantés afin d'apporter une réponse possible au questionnement sociétal sur la prise en charge de la surdité. L'étude du développement du langage chez les enfants implantés est néanmoins complexe puisque des facteurs tels que le degré de surdité, l'âge d'entrée dans la surdité, l'âge d'implantation, et la durée d'utilisation de l'implant influencent le développement des compétences langagières. Il est nécessaire de limiter l'impact de ces facteurs en sélectionnant les enfants selon des critères stricts. Les enfants participants aux études présentées dans cette thèse, sont sourds profonds congénitaux, et ont été munis d'un implant cochléaire avant l'âge de 3 ans 1/2.

Plus précisément, les travaux présentés dans cette thèse s'attache à (i) Evaluer les compétences des enfants implantés à percevoir les sons de parole, (ii) Préciser les compétences en lecture des enfants implantés, (iii) Estimer indirectement la relation entre perception des sons de parole et apprentissage de la lecture chez les enfants munis d'un implant cochléaire.

La première partie de la thèse présente les résultats importants de la recherche dans le domaine de l'acquisition *normale* de la lecture, susceptibles de fournir un cadre général aux études menées chez les enfants munis d'un implant cochléaire. Cette partie se compose de trois chapitres. Le chapitre 1 décrit comment l'enfant normo-entendant apprend à lire et

précise l'importance des compétences de perception des sons de parole au cours de la lecture. Le chapitre 2 décrit les traitements phonétiques et lexicaux impliqués dans la perception des sons de parole ainsi que leurs implications dans la réussite en lecture. Le chapitre 3 décrit le traitement acoustique des sons de parole réalisé par l'oreille et le compare au traitement réalisé par l'implant cochléaire. Après avoir fourni un cadre général de l'apprentissage de la lecture chez l'enfant normo-entendant, il est possible de préciser l'acquisition des compétences langagières orale et écrite chez l'enfant muni d'un implant cochléaire. C'est l'objectif des études réalisées au cours de cette thèse.

La seconde partie de la thèse présente les résultats de deux études réalisées sur la perception des sons de parole chez les enfants munis d'un implant cochléaire et sur les traitements impliqués pour percevoir les sons de parole. Parce que les enfants implantés présentent une période de privation auditive avant implantation et que le traitement des sons de parole effectué par l'implant cochléaire est dégradé par rapport au traitement effectué par l'oreille, il est intéressant d'étudier les compétences des enfants implantés à percevoir les phonèmes.

La troisième partie de la thèse présente les résultats de trois études sur les compétences en lecture des enfants munis d'un implant cochléaire. Ces compétences sont habituellement décomposées en habiletés associées à la réussite en lecture (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique) et en reconnaissance des mots écrits. Parce que ces compétences sont dépendantes des habiletés à percevoir les sons de parole, il est nécessaire de préciser l'impact de l'implantation cochléaire sur le développement de la lecture. Nous présentons également une étude sur l'influence d'une aide possible au développement langagier, la Langue Parlée Complétée.

PARTIE 1.

CADRE THEORIQUE

Apprentissage de la lecture et perception de la parole chez l'enfant normo-entendant :

un cadre pour les recherches chez l'enfant muni d'un implant cochléaire

Chapitre 1. Apprentissage de la lecture chez l'enfant normo-entendant

1. Acquisition de la lecture dans un système alphabétique

Confronté à une écriture alphabétique, l'apprenti-lecteur doit d'abord comprendre le principe alphabétique qui fait correspondre une unité de l'oral, le phonème, à une unité graphique qui équivaut à la lettre ou au graphème. Par exemple, les enfants doivent comprendre que la forme écrite du mot parlé /lak/ (composée de trois unités phonologiques, c'est-à-dire trois phonèmes) est *lac* (composée de trois unités graphiques, c'est-à-dire trois graphèmes). Pour acquérir cette compétence de décodage, spécifique à la lecture, les enfants doivent apprendre explicitement les correspondances entre les unités écrites (les graphèmes) et les unités orales (les phonèmes). La compréhension du principe alphabétique nécessite donc à la fois que l'enfant perçoive les sons de la parole en trait phonémique, connaisse les lettres de l'alphabet, acquière des compétences de conscience phonémique, de mémoire à court terme phonologique et de dénomination rapide (Figure 1). Connaître les lettres de l'alphabet permet de nommer les graphèmes visualisés (exemple : matin est composé d'un 'm', d'un 'a', d'un 't', d'un 'i' et d'un 'n'). L'enfant met ensuite en œuvre des compétences phonémiques puisqu'il va devoir identifier chaque phonème en établissant des correspondances grapho-phonémiques (exemple : la lettre 'm' correspond au phonème [m], la lettre 'a' correspond au phonème [a], la lettre 't' correspond au phonème [t], les lettres 'i' et 'n' forment un seul graphème qui correspond au phonème [ɛ]). Ensuite, l'enfant recourt à des compétences de mémoire à court terme phonologique pour assembler et retenir les unités phonémiques pour former des syllabes (exemple : les phonèmes [m] et [a] forment la syllabe [ma] et les phonèmes [t] et [ɛ] forment la syllabe [tɛ]) et également d'assembler les unités syllabiques pour former des mots (exemple : les syllabes [ma] et [tɛ] peuvent s'assembler pour former le mot [matɛ]). Enfin, les compétences de dénomination correspondent à l'habileté à accéder rapidement et précisément au lexique oral afin de vérifier que le pattern fourni correspond à un mot connu.

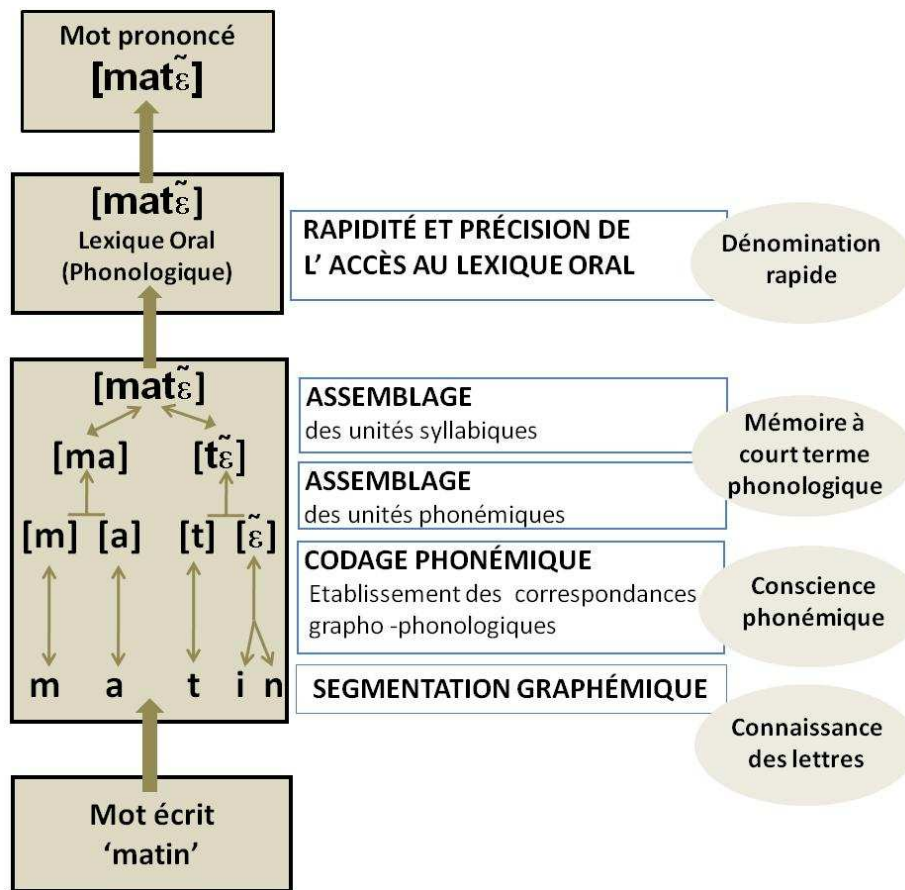


Figure 1. Rôle de la connaissance des lettres de l’alphabet, des compétences de décodage phonémique, de mémoire à court terme phonologique et de dénomination rapide dans le décodage chez l’enfant apprenti-lecteur. Figure adaptée avec l’autorisation de Liliane Sprenger-Charolles.

L’objectif final de l’apprentissage de la lecture est de comprendre ce qui est lu. Selon Hoover et Gough (1990), réussir à comprendre ce qui est lu est influencé par les compétences de reconnaissance des mots écrits et de compréhension orale. Afin de devenir un lecteur expert, l’enfant doit donc développer des compétences de reconnaissance des mots écrits qui soient précises, rapides et automatiques (Ehri, 1976 ; Guttentag et Haith, 1978). L’automatisation des processus de reconnaissance des mots écrits permet de diminuer des ressources cognitives pour reconnaître les mots écrits et d’effectuer d’autres traitements en parallèle telle que la compréhension de phrases ou de textes. Chez le lecteur expert (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, et Ziegler, 2001 ; Plaut, McClelland, Seidenberg, et Patterson, 1996) et le lecteur débutant (Harm et Seidenberg, 1999), la reconnaissance des mots écrits résulte de l’activation de 3 codes : orthographique, phonologique et sémantique¹. Le code

¹ Une récente étude a apporté des preuves supplémentaires sur le recours à un autre type de traitement des mots écrits chez les lecteurs débutants de langue française: le

orthographique renvoie à l'identité des lettres qui composent les mots et à leur combinaison (exemple : m+a+t+i+n). L'activation du code phonologique permet l'encodage de l'identité des phonèmes composants les mots et leurs combinaisons (exemple : /m/+a/+t/+i/+n/). Le code sémantique correspond aux connaissances conceptuelles nécessaires à la compréhension des mots. Les recherches menées dans ce domaine ont mis en évidence que l'activation de ces trois codes suit un décours temporel précis : le code orthographique s'active plus précocement que le code phonologique, et le code sémantique s'active en dernier (Ferrand et Grainger, 1992, 1993 ; Perea et Gotor, 1997). Pour comprendre ce qui est lu, l'enfant apprenti-lecteur s'appuie également sur ces compétences de compréhension orale. Ces compétences sont acquises par exposition au langage plutôt que par un enseignement explicite.

2. Habiletés associées à la réussite en lecture

Les habiletés associées à la réussite en lecture sont les compétences qui permettent de comprendre le principe alphabétique : la connaissance des lettres de l'alphabet, le décodage phonémique (perception et conscience phonémique), la mémoire à court terme phonologique et la dénomination rapide. Comme expliqué dans la Figure 1, ces compétences permettent à l'enfant de décoder les mots écrits. Pour les études présentées dans cette thèse, nous avons fait le choix d'étudier la perception des sons de la parole en traits phonémiques, la conscience phonémique et la mémoire à court terme phonologique chez les enfants implantés, mais pas la dénomination rapide et la connaissance des lettres. La connaissance des lettres renvoie non seulement à la connaissance de l'identité visuelle des lettres (majuscule et minuscule) de l'alphabet mais également à leur nom et aux sons qui leur correspondent (McBride-Chang, 1999 ; Foulin, 2007). La capacité à nommer les lettres de l'alphabet en début de grande section de maternelle est le second prédicteur, derrière la discrimination phonémique, du niveau de décodage en cours préparatoire (Kipffer-Piquard, 2003). Cette compétence cruciale n'est cependant pas étudiée dans cette thèse puisqu'elle s'acquière dès la maternelle alors que les enfants munis d'un implant cochléaire dont les compétences langagières sont rapportées dans cette thèse sont scolarisés du CE1 au CM1. Tester cette

traitement et l'identification des morphèmes (Colé, Bouton, Leuwers, Casalis, et Sprenger-Charolles, accepted). Les morphèmes sont définis comme les plus petites unités de sens du langage. En français, par exemple, le mot suffixé *chaton* peut être reconnu par l'identification de ses morphèmes *chat* et *-on*. Les résultats de cette étude montrent que les lecteurs débutants français sont capables d'utiliser les unités morphologiques (les bases et les suffixes dérivationnels) pour décoder les mots nouveaux. Des études supplémentaires sont nécessaires pour montrer l'importance de ce traitement.

compétence reviendrait à obtenir des performances plafonds. La dénomination rapide est la capacité à dénommer rapidement des couleurs, des chiffres, des lettres ou des images (Compton, 2003). Bien que certaines études aient mis en évidence une relation entre la capacité à dénommer rapidement des items et des difficultés en lecture (Bowers & Wolf, 1993; Wolf, 1991), la relation entre dénomination rapide et réussite en lecture est très controversée (Sprenger-Charolles, Colé et Serniclaes, 2006). C'est pourquoi cette compétence n'est pas évaluée chez les enfants munis d'un implant cochléaire qui ont participé à nos études.

2.1. Conscience phonémique

La conscience phonémique est définie comme la compétence à identifier les unités phonémiques des mots parlés et à les manipuler intentionnellement (Gombert, 1990 ; Gombert, & Colé, 2000). Cette compétence amène l'apprenti-lecteur à concevoir que les mots parlés sont constitués d'une séquence de sons élémentaires (les phonèmes). Dans une écriture alphabétique, la conscience phonémique lui permet – à terme – de comprendre que les correspondants des phonèmes à l'écrit, sont des graphèmes (a, t, ou, ch). Cette capacité à segmenter le mot parlé en ses unités les plus élémentaires s'avère indispensable pour que l'apprenti-lecteur soit en mesure de découvrir et d'utiliser les correspondances grapho-phonémiques.

La conscience phonémique est nécessaire à l'apprentissage de la lecture et permet l'activation des codes phonologiques des mots écrits. Certaines recherches ont mis en évidence que la conscience phonémique est le meilleur prédicteur des compétences ultérieures en lecture (Duncan, Seymour, et Hill, 1997 ; Hulme, Muter, et Snowling, 1998 ; Hulme, Hatcher, Nation, Brown, Adams, et Stuart, 2002 ; Kirby, Parrila, et Pfeiffer, 2003 ; Parrila, Kirby et McQuarrie, 2004 ; Schatschneider, Fletcher, Francis, Carlson, et Foorman, 2004 ; Share, Jorm, MacLean, et Matthews, 1984), par rapport à la conscience syllabique (Morais, Bertelson, Cary et Alegria, 1986), ou la mémoire à court terme phonologique (Snowling, Goulandris, Bowlby, et Howell, 1986; Van Bon et Van der Pijl, 1997 ; Chiappe, Siegel et Wade-Wooley, 2002). Un autre argument en faveur de l'importance de la conscience phonémique dans l'apprentissage de la lecture a été mis en évidence par les recherches sur la dyslexie. Plusieurs études ont indiqué que dans les tâches de conscience phonémique, les scores obtenus par les lecteurs en difficulté sont significativement plus faibles que ceux obtenus par les lecteurs appariés sur l'âge chronologique et/ou le niveau de lecture (en anglais : Bradley et Bryant, 1983 ; Bruck, 1992 ; Fawcett et Nicolson, 1994 ; en allemand, Wimmer, 1993 ; en français, Colé et Sprenger-Charolles, 1999 ; Lecocq, 1991).

Certaines recherches ont mis en évidence que l'acquisition de la lecture est nécessaire au développement de la conscience phonémique (Alegria et Morais, 1979 ; Alegria, Pignot et Morais, 1982 ; Morais, Cary, Alegria, et Bertelson, 1979 ; Morais, Bertelson, Cary et Alegria, 1986). Alegria et Morais (1979) ont comparé les compétences de conscience syllabique et phonémique d'enfants de même âge, testés soit durant le troisième mois d'apprentissage de la lecture (en Novembre), soit durant le sixième mois d'apprentissage de la lecture (en Février). Les deux groupes différaient donc dans leur expérience en lecture. Les résultats indiquent que le groupe « Février » obtient de meilleures performances aux tâches de conscience phonémique que le groupe « Novembre ». C'est une preuve de l'effet de l'enseignement de la lecture sur la conscience phonémique. Ce phénomène est également justifié par les études qui ont permis de constater que des adultes illettrés portugais présentent de faibles résultats dans les tests de conscience phonémique comparativement à d'anciens illettrés récemment alphabétisés (Morais et al., 1979). De meilleurs scores sur la tâche de manipulation phonémique ont été obtenus par les sujets alphabétisés (72% de réponses correctes) par rapport au groupe illettré (19% de réponses correctes). Si la conscience phonémique s'améliore spontanément au cours du développement, les adultes illettrés ou non confrontés à un système alphabétique (Read, Zhang, Nie et Ding, 1986) devraient faire preuve d'un certain niveau de conscience phonémique. Or les études citées précédemment n'ont pas permis de corroborer cette hypothèse (voir également Morais et al., 1986). La conscience phonémique serait donc en partie le produit de l'apprentissage de la lecture.

Les deux hypothèses précédemment décrites ne semblent pas contradictoires : le fait que la conscience phonémique soit nécessaire pour apprendre à lire n'est pas incompatible avec le fait que l'apprentissage de la lecture facilite le développement de la conscience phonémique. On peut concevoir que la conscience phonémique est à la fois la cause et la conséquence de l'acquisition de la lecture : l'enfant doit disposer d'un minimum de conscience phonémique pour acquérir les compétences fondamentales à la lecture, cette acquisition permettant en retour le développement de capacités secondaires, servant de base à la réalisation de traitements métalinguistiques (Stanovich, 1986). La confirmation de l'interdépendance entre conscience phonémique et apprentissage de la lecture est fournie par les données obtenues par Perfetti (1987). Il a réalisé une étude longitudinale au cours de laquelle les connaissances phonémiques et le niveau de lecture étaient évalués à quatre reprises au cours d'une année. Il met en évidence des relations réciproques entre conscience phonémique et apprentissage de la lecture : les progrès en lecture amélioraient la réussite à

une tâche de suppression de phonème, et l'augmentation de cette capacité semblait elle-même entraîner de nouvelles améliorations du niveau de lecture.

Les études présentées ci-dessus ont donc mis en évidence l'importance de la conscience phonémique dans l'apprentissage de la lecture. Malgré le fait que la lecture améliore la conscience phonémique des appreni-lecteurs, il est nécessaire que l'enfant développe des capacités d'identification et de manipulation de phonèmes pour réussir à apprendre à lire.

2.2. *Mémoire à court terme phonologique*

La mémoire à court terme phonologique a pour fonction de maintenir temporairement les éléments phonémiques en mémoire, pendant 1 à 2 secondes, puis de les fusionner (Baddeley, 1986, Geers, 2003). Selon le modèle décrit par Baddeley (2003), la mémoire à court terme phonologique est un composant de la mémoire de travail, appelé boucle phonologique. La boucle phonologique peut être divisée en deux composants : le système de stockage temporaire de l'information (le stock phonologique) qui garde les informations en mémoire durant quelques secondes ; la boucle de récapitulation articulaire qui décompose et rafraîchit les informations pendant les quelques secondes où elles sont mémorisées par le stock phonologique (Figure 2).

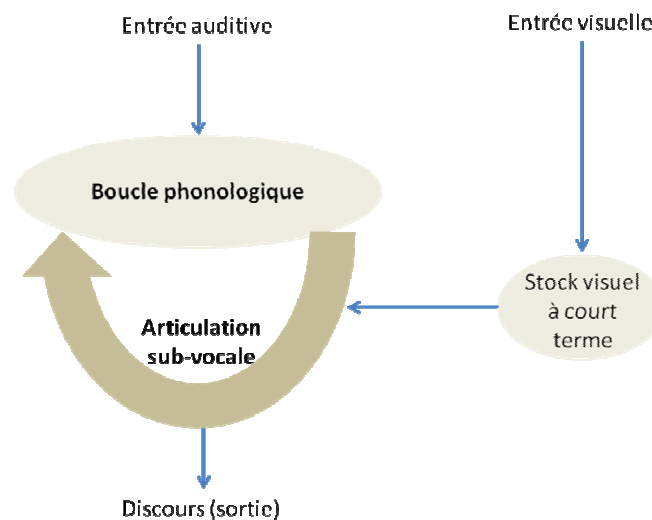


Figure 2. Composants de la boucle phonologique selon le modèle de Baddeley (2003)

Le stock phonologique est un composant passif de stockage qui reçoit directement l'information verbale présentée auditivement. Il encode cette information sous forme d'un code phonologique, mais ne peut maintenir cette information en mémoire que pendant une durée très brève, de 1 à 2 secondes. L'information peut être réintroduite et maintenue dans le stock phonologique grâce à la boucle de récapitulation articulaire. Son rôle est de réaliser un

maintien actif de l'information dans le stock grâce au processus de récapitulation articulatoire qui fonctionne sur la base du code phonologique. Par conséquent, lorsque les sujets doivent rappeler des séquences de mots, il ont davantage de difficultés à retenir des mots dont les noms sont phonologiquement similaires, tels que man, cat, map, cab, plutôt que pit, day, cow, sup, pen (Baddeley, 1966a). Les participants obtiennent moins de 20% de réponses correctes pour les mots phonologiquement similaires, mais plus de 80% de réponses correctes pour un rappel de mots dissimilaires. Cette étude présente un argument empirique de la présence de la boucle phonologique, l'effet de similarité phonologique. Plus la similarité phonologique entre stimuli est élevée, plus on a de difficultés à les différencier et à les restituer. Un autre argument empirique de la présence d'une boucle phonologique est l'effet de longueur de mots. Cet effet met en évidence que le rappel sériel immédiat d'une liste de mots courts tels que pain, jupe, sac, est meilleur que celui d'une liste de mots longs, tels que bibliothèque, médicament, anniversaire. Les performances de mémorisation pour une séquence de cinq mots sont supérieures à 90% lorsque les mots sont monosyllabiques mais diminuent jusqu'à 50% lorsque les mots sont plurisyllabiques (Baddeley, Thomson, & Buchanan, 1975). Cet effet est lié au processus de récapitulation articulatoire. Plus les mots sont longs, plus le temps de récapitulation articulatoire est long. La conséquence est que la boucle articulatoire ne parvient pas à empêcher l'effacement de la trace mnésique des mots précédents contenus dans le stock. La répétition de pseudo-mots est également une tâche habituellement utilisée pour mettre en évidence le recours aux compétences de mémoire à court terme phonologique.

Les chercheurs du laboratoire Haskins (Liberman, Mann, Shankweiler, Werfelman, 1982 ; Mann et Liberman, 1984, Brady, 1986 ; Rapala et Brady, 1990 ; voir aussi McDougall, Hulme, Ellis, Monk, 1994 ; Spenger-Charolles, Colé, Lacert et Serniclaes, 2000 ; Ramus, 2003) ont été les premiers à établir que la mémoire à court terme phonologique est impliquée dans l'acquisition de la lecture. Mann et Liberman (1984), Mann (1984) et Chiappe et al. (2002) ont étudié les relations entre les compétences de mémoire à court terme phonologique d'enfants de maternelle et les compétences en lecture d'enfants de CP (grade 1). En Mai de l'année de grande section de maternelle, 62 enfants réalisent une tâche de répétition de mots phonologiquement similaires ou phonologiquement dissemblables (Mann et Liberman, 1984. Un an après, les enfants réalisent les tests « word recognition² » et « word attack³ » du « Woodcock Reading Mastery Test » (Woodcock, 1987). Les résultats indiquent que les corrélations simples entre les compétences de lecture au CP et de mémoire en maternelle sont

² Tâche de lecture de mots à haute voix dans laquelle le temps de réponse est limité.

³ Tâche de lecture de pseudo-mots à haute voix dans laquelle le temps de réponse est limité.

de .39 ($p < .01$) pour les mots phonologiquement dissemblables, et de .26 ($p < .05$) pour les mots phonologiquement similaires. Chiappe et al. (2002) ont confirmé ces résultats : les enfants réalisent les mêmes tâches de lecture que dans l'étude de Mann et Liberman (1984) ainsi qu'une tâche de répétition de pseudo-mots dont la complexité augmente. Les premiers pseudo-mots sont composés de syllabes VC (*ab* et *id*) alors que les derniers pseudo-mots sont polysyllabiques (*deponiel* et *bafmotbem*). Les résultats indiquent une corrélation positive entre la tâche de répétition de pseudo-mots et la tâche de reconnaissance de mots ($r = .36$) et de pseudo-mots ($r = .40$). Par conséquent, ces résultats indiquent que la mémoire à court terme phonologique est reliée à la réussite en lecture.

Néanmoins, un important débat de la littérature porte sur la part de la réussite en lecture justifiée par les compétences de mémoire à court terme phonologique. En effet, certaines recherches indiquent que la mémoire à court terme phonologique ne justifie pas la réussite en lecture indépendamment des compétences en conscience phonémique. La mémoire à court terme phonologique serait alors une compétence nécessaire à la conscience phonémique mais n'aurait pas de relation directe avec la lecture. Les résultats de plusieurs études longitudinales indiquent que l'impact de la mémoire sur l'apprentissage de la lecture est moins important que celui de la conscience phonémique (Lecocq, 1991 ; Parrila et al., 2004 ; Wagner, Torgesen, et Rashotte, 1994 ; Wagner, Torgesen, Rashotte, Hecht, Barker, Burgess et al., 1997). Plaza et Cohen (2003) confirment ces résultats puisqu'ils indiquent que les scores de répétition de mots non familiers corrélaient avec ceux de suppression du premier phonème ($r = .36$) et avec ceux des tâches de lecture (reconnaissance de mots, de pseudo-mots et compréhension en lecture) ($r = .28$) mais cette relation est minime par rapport à la corrélation entre les tâches de lecture et la tâche de suppression du premier phonème ($r = .76$). D'autres recherches ne mettent pas en évidence de lien entre la mémoire à court terme phonologique et la lecture et indique que seule la conscience phonémique justifie la lecture (McBride-Chang, 1995 ; Bradley & Bryant, 1985 ; Wagner, Torgesen, Laughon, Simmons, et Rashotte, 1993 ; Gathercole, Alloway, Willis, et Adams, 2006). Catts, Fey, Zhang, et Tomblin (1999) observent une absence de corrélation entre la répétition de pseudo-mots et la lecture au CE1 (grade 2) : la répétition de pseudo-mots justifie 2.2% de la variance des compétences de reconnaissance des mots écrits.

Par conséquent, la mémoire à court terme phonologique serait liée à l'apprentissage de la lecture mais le développement de cette compétence ne constitue pas une condition sine qua non à la réussite en lecture. Quelles que soient les spécificités des relations entre mémoire à court terme phonologique et conscience phonémique, et entre mémoire à court terme

phonologique et lecture, la conscience phonémique et la mémoire à court terme phonologique participent à l'acquisition de la lecture. Le développement de ces habiletés sera donc étudié chez les enfants munis d'un implant cochléaire dans les chapitres expérimentaux de cette thèse.

3. Développement des procédures de reconnaissance des mots écrits

Les deux modèles de lecture les plus utilisés pour décrire la reconnaissance des mots écrits par les apprentis-lecteurs sont le modèle connexionniste de Harm et Seidenberg (1999) et le modèle DRC (Dual Route Cascaded Model, Coltheart, Rastle, Perry, Langdom, and Ziegler, 2001). Ces modèles computationnels sont actuellement des modèles influents de l'apprentissage de la lecture et simulent le fonctionnement cognitif normal et pathologique.

Du fait de sa simplicité didactique le modèle DRC est le modèle théorique dans lequel s'inscrivent les études évaluant les compétences en lecture présentées dans cette thèse. En effet, c'est un modèle de référence pour les diagnostics cliniques des troubles des apprentissages de la lecture. Il est particulièrement utilisé dans les outils d'évaluation diagnostique tels que la batterie EVALEC (Sprenger-Charolles, Colé, Béchennec, Kipffer-Piquard, 2005), ou la BELEC (Mousty et Leybaert, 1999). Les paragraphes suivants décrivent ces deux modèles et permettent de justifier le choix de recourir au modèle DRC plutôt qu'au modèle de Harm et Seidenberg (1999).

3.1. Modèle connexionniste de Harm & Seidenberg (1999)

Alors que les précédents modèles computationnels ont simulé les performances adultes, le modèle de Harm et Seidenberg (1999) décrit l'apprentissage de la lecture à l'aide de réseaux d'unités interconnectées. Généralement, les unités, également appelées « neurones formels », sont disposées en couches. La première couche reçoit le signal et la dernière couche fournit le résultat recherché. Entre ces deux couches, la structure des connexions peut être variable en fonction de la modélisation. Dans le réseau récurrent déterminé par Harm et Seidenberg (1999), le fonctionnement est à la fois ascendant et descendant et permet des interactions entre les différents niveaux représentationnels. Les états du monde sont représentés par l'état du réseau et la connaissance devient distribuée sur le poids des connexions. La cognition est donc envisagée comme un calcul parallèle distribué sur l'ensemble du réseau. Au sein d'un réseau, les unités fonctionnent en parallèle sans contrôle hiérarchique. Chaque unité du réseau possède une fonction qui lui permet de calculer son état présent à partir des états des unités voisines à l'instant précédent. Ainsi, la dynamique globale

du réseau est bien définie : l'état présent global du réseau est fonction de son état précédent. Une équation définit la dynamique d'un système comme fonction de la structure du réseau et des poids, inhibiteurs ou excitateurs, des connexions. Un modèle connexionniste peut donc contenir un réseau qui soit le support d'un apprentissage. Si le réseau est doté d'une autre dynamique, alors le poids des connexions est modifié et sa structure peut éventuellement également varier. Par conséquent, cette nouvelle dynamique viendra modifier la dynamique initiale du réseau. On parle alors de métadynamique.

Ce modèle connexionniste implémente la reconnaissance des mots écrits selon l'activation de trois types de représentations: les représentations orthographiques, phonologiques et sémantiques. Au sein de ce modèle distribué, l'activation de ces représentations s'applique à tous les stimuli. Les pseudo-mots, les mots réguliers et irréguliers sont donc traités de la même façon : la présentation du pattern orthographique est l'input qui initie l'activation via des poids de connexions à l'intérieur du réseau. Le réseau s'active en connectant toutes les unités correspondant aux traits phonologiques de l'input. La représentation phonologique d'un mot sera générée lorsque l'activation d'un ensemble d'unités cachées se stabilisera dans un bassin d'attraction de l'espace phonologique à n dimensions dont les dimensions correspondent à l'unique représentation phonologique correcte.

Toutefois, le résultat de cet apprentissage est peu transparent du fait de l'emploi d'unités cachées dans le réseau. La présence d'unités cachées entre les représentations phonologiques et orthographiques empêche le modèle d'établir de bonnes performances en lecture de pseudo-mots. En un sens, ce modèle apprend des correspondances ortho-phonologiques opaques et difficilement identifiables. Harm et Seidenberg (2004) ont répondu à cette critique dans un travail plus récent. Ils ont implémenté l'ajout d'un composant sémantique qui intègre les représentations phonologiques, orthographiques, et sémantiques. Cet ajout permet de simuler plusieurs effets liés aux unités sémantiques, jusqu'alors impossible à implémenter, incluant les effets d'homophonie et de pseudo-homophonie. Ils ont également ajouté des connections directes entre les représentations phonologiques et orthographiques, qui ne sont donc plus médiatisées par des unités cachées. Cette modification a l'effet d'augmenter les performances de décodage des pseudo-mots et donc de généraliser les performances du modèle. Néanmoins, la manière dont l'apprentissage est réalisé dans le modèle connexionniste de Harm et Seidenberg, suivant un principe de rétro-propagation de l'erreur, demeure très critiquée car peu plausible d'un point de vue neurobiologique (e.g., Grainger & Jacobs, 1998 ; O'Reilly, 1998). Parce que le système apprend à associer unités

orthographiques et unités phonologiques en suivant des principes d'apprentissage peu réalistes, nous avons préféré inclure nos recherches au sein du modèle DRC.

3.2. *Modèle DRC de Coltheart et al. (2001)*

Le modèle DRC est un modèle de référence pour les études sur la lecture et permet également de préciser le déroulement de l'apprentissage de la lecture (Coltheart et al., 2001). Selon ce modèle, le lecteur dispose de deux procédures pour lire un mot : par la procédure lexicale (également appelée, voie directe ou procédure orthographique), ou par la procédure sous-lexicale (également appelée, voie indirecte ou médiation phonologique) (Figure 3). La procédure lexicale procède par appariement direct de la configuration orthographique du mot avec sa représentation en mémoire et permet de reconnaître les mots familiers. Cette procédure est nécessaire pour la reconnaissance des mots dont les graphèmes se prononcent de manière irrégulière, comme le 'e' de 'femme' qui se prononce [a], ou la séquence 'll' qui se prononce différemment dans 'ville' et 'fille' ([vil] et [fij]), ou encore les graphèmes à prononciation multiple comme 'ch' de 'orchidée' ou 'archive' (/orkide/ ou /ar[ch]iv/). La procédure lexicale permet donc de reconnaître les mots irréguliers mais elle est également utilisée pour reconnaître des mots réguliers. Néanmoins, la procédure lexicale ne peut pas être utilisée pour des mots que le lecteur n'a jamais rencontrés. Dans le cas de mots nouveaux (ou de pseudo-mots) tels que 'tibulo', 'tople' ou 'funve', le lecteur utilise la procédure sous-lexicale. Elle consiste à traduire la séquence de graphèmes du mot lu en une séquence de phonèmes en utilisant les correspondances graphème-phonème. Le recours à cette procédure permet de reconnaître les pseudo-mots, les mots réguliers, qu'ils soient ou non connus, et également de reconnaître au moins partiellement les mots irréguliers puisqu'ils contiennent en partie des correspondances graphème-phonème régulières. Le lecteur peut par conséquent lire en partie des mots irréguliers en utilisant les correspondances graphème-phonème et puis, corriger les erreurs. Par exemple, pour le mot français « femme » /fam/, il est possible d'inférer que le « e » de « femme » peut être lu /a/.

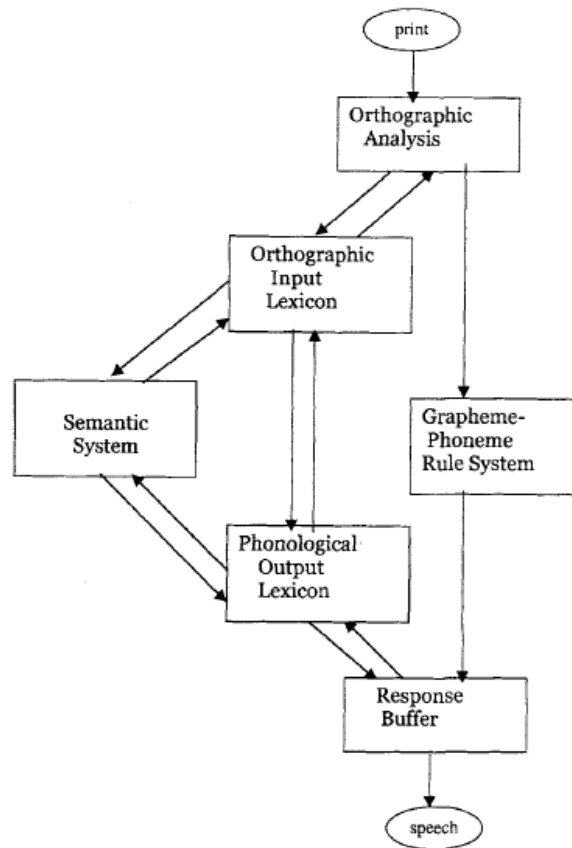


Figure 3. Architecture générale du modèle DRC pour la reconnaissance de mots écrits. (Coltheart et al., 2001).

Selon le modèle de Coltheart et al. (2001), plusieurs effets indiquant le recours aux procédures lexicales ou sous-lexicales peuvent être estimés en utilisant des tâches de lecture à haute voix. Un effet de fréquence est considéré comme la signature du recours à la procédure lexicale ; les mots de haute fréquence étant mieux lus que les mots de basse fréquence. Les mots de haute fréquence sont plus facilement accessibles parce que leur accès est plus souvent sollicité. Un effet de lexicalité (la supériorité des mots de haute fréquence sur des pseudo-mots) est un autre indicateur du recours à la procédure lexicale puisque les pseudo-mots ne peuvent pas être identifiés par cette procédure étant donné qu'ils ne sont pas présents dans le lexique interne du sujet (Ferrand, 2001). Lorsque l'item à lire ne correspond pas aux mots encodés dans le lexique orthographique, alors le lecteur est incapable d'utiliser la procédure lexicale et a par conséquent recours à la procédure sous-lexicale. Cette procédure, qui permet au lecteur de reconnaître des mots qui font partis de son lexique, aussi bien que d'identifier des nouveaux mots, peut entraîner des erreurs de régularisations sur des items qui présentent des correspondances grapho-phonémiques irrégulières (par exemple, « sept » /set/ peut être lu comme le mot « septembre » /septābr/). Utiliser la procédure sous-lexicale est par conséquent

attesté par la production de ce type d'erreur et par la présence d'un effet de régularité (supériorité des mots réguliers sur les mots irréguliers), en l'absence d'un effet de fréquence ou de lexicalité. Une tâche de lecture silencieuse permet également de mettre en évidence le recours à la procédure sous-lexicale pour reconnaître les mots écrits. Dans une tâche de décision lexicale qui implique une catégorisation sémantique, une haute fréquence d'acceptation erronée de pseudo-homophones (exemple, « oto » pour « auto » /oto/) est interprétée comme une indication du recours à la procédure sous-lexicale.

Le principal intérêt du modèle DRC par rapport aux modèles de Harm et Seidenberg (1999, 2004), est sa capacité à mettre en évidence l'ensemble des effets caractéristiques du recours aux procédures lexicale et sous-lexicale de lecture (effets de lexicalité, de régularité, d'homophonie, et de longueur). Le souci des auteurs de spécifier à un niveau computationnel l'ensemble de ces paramètres permet de mettre en correspondance les performances de ce modèle avec celles qui sont rapportées dans de nombreuses études empiriques.

3.3. Données expérimentales sur le développement des procédures de reconnaissance des mots écrits

L'apprenti-lecteur recourt essentiellement à la procédure sous-lexicale pour reconnaître les mots écrits, hormis pour quelques mots appris par cœur. Cela a été mis en évidence en anglais (Backman, Bruck, Hebert, et Seidenberg, 1984 ; Waters, Seidenberg, et Bruck, 1984), en allemand (Wimmer et Hummer, 1990) et en français (Leybaert et Content, 1995 ; Sprenger-Charolles et Bonnet, 1996 ; Sprenger-Charolles, Siegel, Béchenec, et Serniclaes, 2003 ; Sprenger-Charolles, Siegel, et Bonnet, 1998b). La procédure sous-lexicale joue un rôle central dans l'apprentissage de la lecture et plus particulièrement dans la formation du lexique orthographique. De fortes associations entre les unités phonologiques et orthographiques sont créées et mémorisées. Le modèle DRC implémente cette relation et suppose que le lexique phonologique représenté au sein de la voie lexicale s'est construit à partir des indices phonologiques fournis par la procédure sous-lexicale. La formation des associations entre unités phonémiques et orthographiques dépend de la fréquence des correspondances grapho-phonémiques et de la fréquence des mots. Elle est donc représentée à la fois au niveau sous-lexical (entre graphèmes et phonèmes) et au niveau lexical (entre les représentations phonologique et orthographique des mots).

La connaissance des correspondances grapho-phonologiques est nécessaire à la reconnaissance des mots écrits rencontrés pour la première fois, et à la mise en place d'un niveau de pratique indispensable pour rendre automatique le mécanisme de reconnaissance

des mots écrits (Share, Jorm, McLean et Matthews, 1984 ; Stanovich, 1986). Selon Share (1999), la pratique du déchiffrage conduirait à la fois à la production d'une forme orale susceptible d'être mise en relation avec le lexique verbal déjà connu et à la mémorisation de la forme orthographique correspondante. Afin de tester cette hypothèse selon laquelle la procédure phonologique est la base de la procédure lexicale, Share (1999) a demandé à des élèves de CE2, apprenant à lire l'hébreu, de lire des textes brefs contenant des pseudo-mots. Trois jours plus tard, l'apprentissage de l'orthographe de ces pseudo-mots était évalué par une épreuve de choix orthographique. Cette épreuve étudiait si, dans un choix multiple entre plusieurs formes orthographiques, les orthographes cibles (i.e., présentes dans les textes) étaient plus souvent sélectionnées que d'autres orthographes qui présentaient (1) une orthographe homophone avec le pseudo-mot cible, (2) une orthographe similaire à l'item cible mais dont une lettre est substituée par une autre lettre visuellement similaire, (3) une orthographe similaire à l'item cible mais dont deux lettres adjacentes sont transposées. Les résultats indiquent que les mots les plus sélectionnés sont les mots cibles. Ils se différencient des 3 conditions expérimentales. Parmi ces 3 conditions expérimentales, une condition est davantage sélectionnée par les enfants : les pseudo-mots homophones aux pseudo-mots cibles. Conformément aux attentes, l'utilisation des correspondances grapho-phonologiques dans le décodage de pseudo-mots a permis la mémorisation de la forme orthographique du pseudo-mot. Cet apprentissage s'établit à partir du recodage de la forme phonologique du mot puisque les plus fortes confusions s'observent avec des pseudo-mots homophones aux pseudo-mots cibles.

De nombreuses preuves de la relation entre la qualité du décodage grapho-phonologique et l'acquisition des représentations orthographiques sont également fournies par les études longitudinales. Elles montrent que les enfants qui recourent précisément à la procédure sous-lexicale (attesté par les scores en lecture de pseudo-mots) dès le début de l'apprentissage de la lecture, obtiennent plus tard les meilleurs résultats en lecture de mots réguliers et irréguliers (Byrne, Freebody et Gates, 1992; Jorm Share, Matthews, et Maclean, 1986). Une étude longitudinale a mis en évidence le fait que la lecture de pseudo-mots au CP explique la majeure partie de la variance en lecture au CM1 (Sprenger-Charolles et al., 2003). Sprenger-Charolles et al. (2003) ont évalué les performances en lecture de pseudo-mots, de mots réguliers et de mots irréguliers après 4 mois d'apprentissage de la lecture, et également à la fin de chaque année scolaire (à la fin du CP, du CE1, du CE2 et du CM1). En milieu de CP, les réponses correctes pour les mots réguliers et les pseudo-mots ne diffèrent pas mais sont supérieures à celles pour les mots irréguliers (les scores pour les mots irréguliers sont assez

faibles). Ces résultats indiquent que le lecteur recourt essentiellement à la procédure sous-lexicale après 4 mois d'apprentissage de la lecture. Quelques mois plus tard, en fin de CP, le recours aux procédures de lecture change considérablement. Des progrès sont observés pour les trois types d'items, mais sont plus importants pour les mots réguliers qui sont mieux lus que les pseudo-mots. Les pseudo-mots sont également mieux lus que les mots irréguliers. L'amélioration des performances pour les mots réguliers peut être expliquée par le double bénéfice de l'exposition à la régularité et à la fréquence. Comme le suggèrent les plus faibles progrès en lecture de pseudo-mots et de mots irréguliers, ni la fréquence d'exposition seule, ni la régularité seule ne sont suffisantes. Ces données expliquent donc que l'acquisition des correspondances grapho-phonologiques est un mécanisme essentiel à la réussite en lecture. La procédure sous-lexicale semble par conséquent être un mécanisme bootstrapping au cours de l'acquisition de la lecture (Share, 1995, 1999, 2008) et son efficacité est fonction de la consistance des correspondances grapho-phonémiques.

3.4. Relation habiletés langagières orales et la lecture

L'hypothèse générale d'une relation entre la maîtrise des sons de la parole et celle de la lecture dans un système alphabétique s'appuie en premier lieu sur le fait que ce type de système d'écriture s'attache à représenter des unités de la parole. Étudier l'acquisition de la lecture nécessite de préciser le développement des compétences langagières orales des apprenti-lecteurs. Les travaux cités précédemment ont mis en évidence la relation existant entre lecture et habiletés associées à la réussite en lecture. Pour réussir à apprendre à lire, l'enfant doit connaître le nom des lettres et doit acquérir des compétences de conscience phonémique, de mémoire à court terme phonologique et de dénomination rapide. Ces compétences correspondent à des capacités langagières orales. La figure 4 représente la relation entre lecture et ces quatre habiletés associées à la réussite en lecture. Sur cette figure, les compétences langagières orales sont représentées par la couleur bleue alors que les compétences langagières écrites sont de couleur marron. On observe que les compétences langagières orales sont cruciales pour l'acquisition de la procédure sous-lexicale de lecture et influencent également le développement de la procédure lexicale de lecture. Lorsque l'apprenti-lecteur doit décoder le mot écrit 'matin', il doit décomposer ce mot en ses constituants graphémiques puis faire correspondre chaque graphème à un phonème. Ce codage phonémique ne peut se mettre en place que si l'enfant est capable d'identifier et de manipuler les phonèmes, c'est-à-dire s'il est conscient de la structure phonémique des mots. Après établissement des correspondances grapho-phonémiques, l'enfant doit assembler les

phonèmes en syllabes puis les syllabes en mots. L'assemblage phonémique est possible si l'enfant a acquis des habiletés de mémoire à court terme phonologique. Il doit être capable d'encoder et de stocker temporairement les phonèmes afin de les regrouper pour former une syllabe. Il doit également réaliser le même processus pour la seconde syllabe puis avoir mémorisé ces deux syllabes pour les assembler et former un mot.

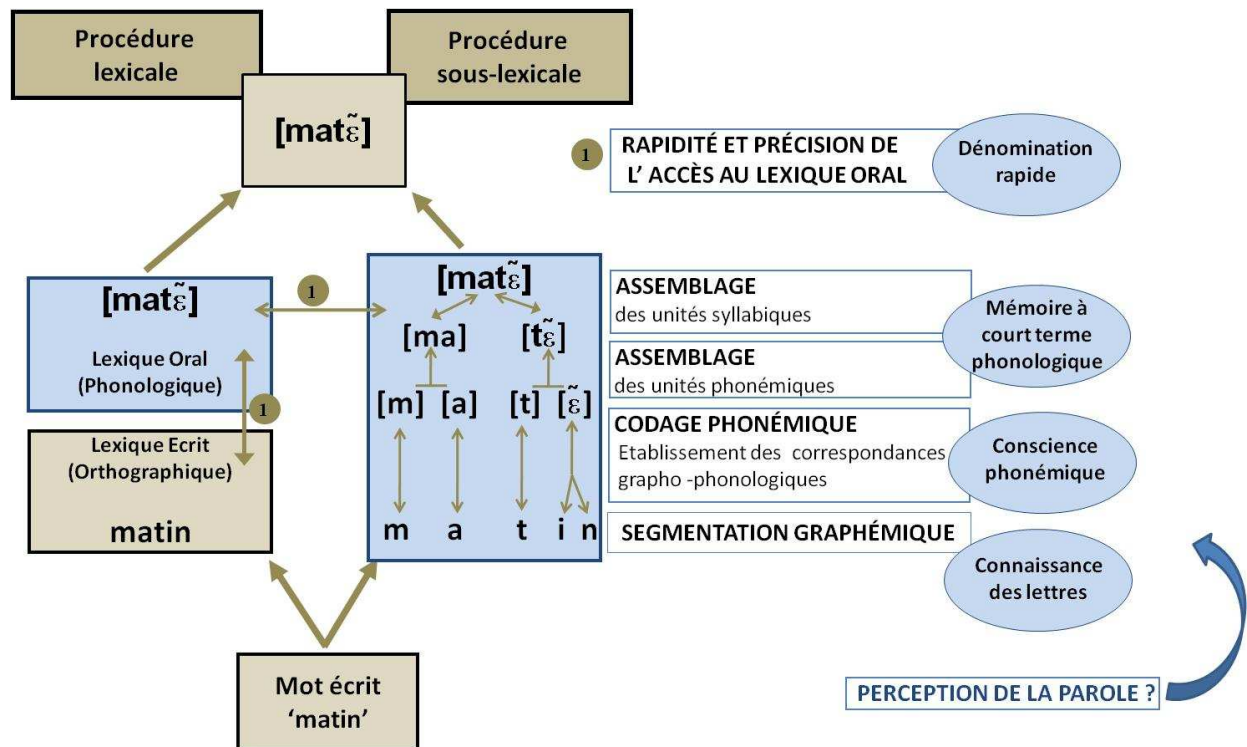


Figure 4. Représentation schématique des procédures de lecture et habiletés associées à la réussite en lecture. (figure adaptée avec l'autorisation de Liliane Sprenger-Charolles).

En résumé, pour décoder les mots écrits, l'enfant doit donc apprendre les correspondances grapho-phonologiques. Mais ceci n'est possible que s'il dispose de représentations phonémiques spécifiées. La description de cette compétence est l'enjeu de la seconde partie. Les relations entre lecture et habiletés associées à la réussite en lecture peuvent-être expliquées par le fait que ces compétences dépendent des représentations phonémiques que l'enfant a acquis avant l'apprentissage de la lecture. Le chapitre suivant décrit le rôle du langage oral et plus particulièrement des représentations phonémiques au cours de la reconnaissance des mots écrits et permet de préciser leur importance dans l'acquisition des habiletés associées à la réussite en lecture.

Références

- Alegria, J., & Morais, J. (1979). Le développement de l'habileté d'analyse phonétique consciente de la parole et l'apprentissage de la lecture. *Archives de psychologie*, 47, 251-270.
- Alegria, J., Pignot, E., & Morais, J. (1982). Phonetic analysis of speech and memory codes in beginning readers. *Memory and Cognition*, 10(5), 451-456.
- Avan, P., Cazals, Y., Dauman, R., Denoyelle, F., & Hardelin, J.P. (2006). *Déficits Auditifs, Recherches émergentes et applications chez l'enfant*. Paris : Presses de l'Inserm.
- Backman, J., Bruck, M., Hebert, M., & Seidenberg, M.S. (1984). Acquisition and use of spelling sound correspondences in reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38, 114-133.
- Baddeley, A. D. (1966a). 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. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon Press.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Review: Neuroscience*, 4(10), 829-839.
- Baddeley, A.D., Thompson, N., & Buchanan, M. (1975). Word Length and the Structure of Memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 1, 575-589.
- Bowers, P. G., & Wolf, M. (1993). Theoretical links among naming speed, precise timing mechanisms and orthographic skill in dyslexia. *Reading and Writing: an interdisciplinary Journal*, 5, 69-85.
- Bradley, L., & Bryant, P.E. (1983). Categorizing sounds and learning to read-a causal connection. *Nature*, 301(3), 419-421.
- Bradley, L., & Bryant, P.E. (1985). *Rhyme and Reason in Reading and Spelling*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Brady, S. (1986). Short-term Memory, Phonological Processing and Reading Ability. *Annals of Dyslexia*, 36, 138-153.
- Bruck, M. (1992). Persistence of dyslexics' phonological awareness deficits. *Developmental Psychology*, 28, 874 -886.
- Byrne, B., Freebody, P., & Gates, A. (1992). Longitudinal data on the relations of word-reading strategies to comprehension, reading time and phonemic awareness. *Reading Research Quarterly*, 27, 141-151.
- Catts, H., Fey, M., Zhang, X., & Tomblin, J.B. (1999). Language basis of reading and reading disabilities: Evidence from a longitudinal study. *Scientific Studies of Reading*, 3, 331-361.

- Chiappe, P., Siegel, L.S., & Wade-Wooley, L. (2002). Linguistic diversity and the development of reading skills: A longitudinal study. *Scientific Studies of Reading*, 6, 369-400.
- Colé, P., Bouton, S., Leuwers, C., Casalis, S., Sprenger-Charolles, L. (accepted). Stem and Derivational-Suffix Processing During Reading by French Second and Third Graders. *Applied Psycholinguistics*.
- Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (1999). Traitement syllabique au cours de la reconnaissance des mots écrits chez les enfants dyslexiques, lecteurs en retard et normo-lecteurs de 11 ans. *Revue de Neuropsychologie*, 4, 323-360.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204-256.
- Compton, D. L. (2003). Modeling the relationship between growth in rapid naming speed and growth in decoding skill in first-grade children. *Journal of Educational Psychology*, 95, 225-239.
- Duncan, L., Seymour, P., & Hill, S. (1997). How important are rhyme and analogy in beginning reading? *Cognition*, 63(2), 171-208.
- Ehri, L. C. (1976). Comprehension and production of adjectives and seriation. *Journal of Child Language*, 3, 369-384
- Fawcett, A., & Nicolson, R. (1994). Naming speed in children with dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, 27(10), 641-646.
- Ferrand, L. (2001). *Cognition et lecture : processus de base de la reconnaissance des mots écrits chez l'adulte*. De Boeck & Larcier, Bruxelles.
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1992). Phonology and orthography in visual word recognition: evidence from masked non-word priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human experimental psychology*, 45(3), 353-372.
- Ferrand, L. & Grainger, J. (1993). The time-course of phonological and orthographic code activation in the early phases of visual word recognition. *Bulletin of the psychonomic society*, 31, 119-122.
- Foulin, J.N. (2007). La connaissance des lettres chez les pré-lecteurs : aspects pronostiques, fonctionnels et diagnostiques. *Psychologie Française*, 52(4), 431-444
- Gathercole, S., Alloway, T., Willis, C., & Adams, A. (2006). Working memory in children with reading disabilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 93(3), 265-281.
- Geers, A. (2003). Predictors of reading skill development in children with early cochlear implantation. *Ear and Hearing*, 24, 59S-68S.
- Gombert, J.E. (1990). *Le développement métalinguistique*. Paris: PUR.

Gombert, J.E., & Colé, P. (2000). Activités métalinguistiques, lecture et illettrisme, in M. Kail et M. Fayol (Eds), *L'acquisition du langage : Le langage au delà de 3 ans* (pp 117-150), Vol 2, PUF, collection « Psychologie et sciences de la pensée ».

Grainger, J. & Jacobs, A.M. (1998). Localist connectionism fits the bill. Commentary on Green on connectionist explanation. *Psychology*, 9(10).

Guttentag, R. & Haith, M. (1978). Automatic processing as a function of age and reading ability. *Child Development*, 49, 707-716.

Harm, M., & Seidenberg, M. (1999). Understanding normal and impaired word reading: computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, 106(3), 491-528.

Harm, M., & Seidenberg, M. (2004). Computing the meanings of words in reading: cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychological Review*, 111(3), 662-720.

Hoover, W.A. & Gough, P.B. (1990). The simple view of reading. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 2, 127-160.

Hulme, C., Hatcher, P., Nation, K., Brown, A., Adams, J., & Stuart, G. (2002). Phoneme awareness is a better predictor of early reading skill than onset-rime awareness. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82(1), 2-28.

Hulme, C., Muter, V., & Snowling, M. (1998). Segmentation does predict early progress in learning to read better than rhyme: a reply to Bryant. *Journal of Experimental Child Psychology*, 71(1), 39-44.

Jorm A.F., Share D.L., Matthews R., & Maclean R. (1986). Behaviour problems in specific reading retarded and general reading backward children: A longitudinal study. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 27, 33-43.

Kipffer-Piquard, A. (2003). *Prédiction de la réussite ou de l'échec spécifique en lecture au cycle 2 : Suivi d'une population à risque et d'une population contrôle de la moyenne section de maternelle à la deuxième année de scolarisation primaire*. [thèse de doctorat]. Paris : Université Paris 7, Département de linguistique.

Kirby, J. R., Parrila, R., & Pfeiffer, S. (2003). Naming speed and phonological processing as predictors of reading development. *Journal of Educational Psychology*, 95, 453-464.

Lecocq, P. (1991). *Apprentissage de la lecture et dyslexie*. Liège: Mardaga.

Leybaert, J., & Content, A. (1995). Reading and spelling acquisition in two different teaching methods: a test of the independence hypothesis. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 7, 65-88.

Liberman, I., Mann, V., Shankweiler, D., & Werfelman, M. (1982). Children's memory for recurring linguistic and nonlinguistic material in relation to reading ability. *Cortex*, 18(3), 367-375.

- Mann, V. (1984). Reading skill and language skill. *Developmental Review*, 4, 1-15.
- Mann V. & Liberman I.Y (1984) Phonological awareness and verbal short term memory. *Journal of Learning Disabilities*, 17, 592-599.
- McBride-Chang, C. (1995). What is phonological awareness? *Journal of Educational Psychology*, 87, 179-192.
- McBride-Chang, C. (1999). The ABC's of the ABC's: The development of letter-name and letter-sound knowledge. *Merrill-Palmer Quarterly*, 45, 278-301.
- 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(1), 112-133.
- Morais, J., Bertelson, P., Cary, L., & Alegria, J. (1986). Literacy training and speech segmentation. *Cognition*, 24, 45-64.
- Morais, J., Cary, L., Alegria, J. & Bertelson, P. (1979). Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously? *Cognition*, 7, 323-331.
- Mousty, P., & Leybaert, J. (1999). Evaluation des habiletés de lecture et d'orthographe au moyen de la BELEC : Données longitudinales auprès d'enfants francophones testés en 2^{ème} et 4^{ème} années. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 49(4), 325-342.
- O'Reilly, R.C. (1998). Six Principles for Biologically-Based Computational Models of Cortical Cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 455-462.
- Parrila, R. K., Kirby, J. R., & McQuarrie, L. (2004). Articulation rate, naming speed, verbal short-term memory, and phonological awareness: Longitudinal predictors of early reading development? *Scientific Studies of Reading*, 8, 3-26.
- Perea, M., & Gotor, A. (1997). Associative and semantic priming effects occur at very short stimulus-onset asynchronies in lexical decision and naming. *Cognition*, 62(2), 223-240.
- Perfetti, C.A. (1987). Language, speech and print: some asymmetries in the acquisition of literacy, in R. Horowitz & SJ Samuels (eds), *Comprehending oral and written language* (pp 355-369), New York: Academic Press.
- Plaut, D., McClelland, J., Seidenberg, M., & Patterson, K. (1996). Phonology, reading acquisition, and dyslexia: insights from connectionist models. *Psychological Review*, 103(1), 56-115.
- Plaza, M., & Cohen, H. (2003). The interaction between phonological processing, syntactic awareness, and naming speed in the reading and spelling performance of first-grade children. *Brain and Cognition*, 53(2), 287-292.
- Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology*, 13(2), 212-218.

- Rapala, M.M., & Brady, S. (1990). Reading ability and short-term memory: the role of phonological processing. *Reading and Writing: an interdisciplinary Journal*, 2, 1-25.
- Read, C., Zhang, Y., Nie, H., & Ding, B. (1986). The ability to manipulate speech sounds depends on knowing alphabetic writing. *Cognition*, 24(1-2), 31-44.
- Schatschneider, C., Carlson, C., Francis, D., Foorman, B., & Fletcher, J. (2002). Relationship of rapid automatized naming and phonological awareness in early reading development: implications for the double-deficit hypothesis. *Journal of Learning Disabilities*, 35(3), 245-256.
- Share, D.L. (1995) Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55, 151-218.
- Share, D. L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: a direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72, 95-129.
- Share, D. (2008). Orthographic learning, phonological recoding, and self-teaching. *Advances in Child Development and Behavior*, 36, 31-82.
- Share D.L., Jorm A.F., Maclean R., & Matthews, R. (1984). Sources of individual differences in reading acquisition. *Journal of Educational Psychology*, 76, 1309-1324.
- Snowling, M., Goulandris, N., Bowlby, M., & Howell, P. (1986). Segmentation and speech perception in relation to reading skill: a developmental analysis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 41(3), 489-507.
- Sprenger-Charolles, L., & Bonnet, P. (1996). New doubts on the importance of the logographic stage. *Current Psychology of Cognition*, 15, 173–208.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2006). *Reading acquisition and developmental dyslexia*. London: Psychology Press.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S., & Bonnet, P. (1998b). Phonological mediation and orthographic factors in reading and spelling. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 134–155.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchennec, D., & Kippfer-Piquard, A. (2005). French normative data on reading and related skills from EVALEC, a new computerized battery of tests (end Grade 1, Grade 2, Grade 3, and Grade 4). *Revue européenne de psychologie appliquée*, 55, 157-186.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S., Béchennec, D., & Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading and in spelling: a 4 year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84, 194–217.
- Stanovich, K. E. (1986). Matthew effects in reading: Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy, *Reading Research Quarterly*, 21, 360-406.

- Van Bon, W., & Van der Pijl, J. (1997). Effects of word length and wordlikeness on pseudoword repetition by poor and normal readers. *Applied Psycholinguistics*, *18*, 101-114.
- Wagner, R. K., Torgesen, J. K., Laughon, P., Simmons, K., & Rashotte, C. A. (1993). Development of young readers' phonological processing abilities. *Journal of Educational Psychology*, *85*, 83-103.
- Wagner, R. K., Torgesen, J. K., & Rashotte, C. A. (1994). Development of reading related phonological processing abilities: New evidence of bi-directional causality from a latent variable longitudinal study. *Developmental Psychology*, *30*, 73-87.
- Wagner, R. K., Torgesen, J. K., Rashotte, C. A., Hecht, S.A., Barker, T. A., Burgess, S. P., et al. (1997). Changing relations between phonological processing abilities and word-level reading as children develop from beginning to skilled readers: A 5-year longitudinal study. *Developmental Psychology*, *33*, 468-479.
- Waters, G.S., Seidenberg, G.M.S., & Bruck, M. (1984). Children's and adults' use of spelling sound information in three reading tasks. *Memory & Cognition*, *12*, 293-305.
- Wimmer, H. (1993). Characteristics of developmental dyslexia in a regular writing system. *Applied Psycholinguistics*, *14*, 1-33.
- Wimmer, H., Hummer, P. (1990). How German speaking first graders read and spell: doubts on the importance of the logographic stage. *Applied Psycholinguistics*, *11*, 349-368.
- Wolf, M. (1991). Naming speed and reading: The contribution of the cognitive neurosciences. *Reading Research Quarterly*, *26*, 123-140.
- Woodcock, R.W. (1987). *Woodcock Reading Mastery Tests-Revised examiners manual*. Circle Pines, MN: American Guidance Service.

Chapitre 2. Percevoir les sons de parole et développer des représentations phonémiques

Les recherches sur la perception des sons de parole chez le sujet normo-entendant aboutissent à un modèle à trois niveaux de traitement (auditif, phonétique, lexical) pour identifier précisément les phonèmes (Serniclaes, 2000; Ramus, Peperkamp, Christophe, Jacquemot, Kouider, et Dupoux, 2010). Plus précisément, l'enfant normo-entendant extrait les indices acoustiques du signal de parole pour les intégrer et les associer aux traits articulatoires qui lui permettront d'identifier les phonèmes. Les informations lexicales présentes dans le signal de parole influencent également l'identification des phonèmes contenus dans les mots. Les processus phonétiques et lexicaux sont présentés dans les paragraphes suivant alors que le processus auditif sera décrit dans le chapitre 3.

1. Percevoir la parole : description phonétique

La parole est un signal complexe. Faire la différence entre les mots « bar », « par », « dard » et « tard » implique de savoir identifier précisément les phonèmes 'b', 'p', 'd' et 't', et de les discriminer entre eux. Les linguistes, et notamment les structuralistes, ont postulé l'existence d'unités telles que les traits et les phonèmes (Jakobson, Fant & Halle, 1952). Dans cette approche, le trait distinctif correspond à une combinaison d'indices acoustiques et le phonème à un ensemble de traits. Les traits distinctifs sont des classes d'oppositions phonétiques minimales entre phonèmes. Si, dans une approche linguistique, le trait se concrétise lorsqu'il a une valeur distinctive dans une langue, sa réalité psychologique reste une hypothèse (Fromkin, 1979) qui n'a reçu que des confirmations partielles (Morais & Kolinsky, 1994). Le concept de trait est cependant au centre de nombreux travaux sur la perception et la production de la parole qui ont notamment cherché à comprendre comment le sujet isole les traits qui ont une valeur distinctive dans sa langue ou encore à comprendre comment on passe d'une multiplicité d'indices acoustiques à un nombre limité de traits.

1.1. Traits phonologiques des consonnes

Le français comporte 16 consonnes (p, b, m, t, d, n, k, g, f, v, s, z, ʃ, j, l, r) qu'il est possible de décrire selon quatre traits phonologiques : le voisement, le mode d'articulation, le lieu d'articulation et la nasalité.

Le trait de voisement. Le trait de voisement est défini comme la présence/absence de vibrations laryngées durant la production de la consonne (Jakobson et al., 1952). Les consonnes sont donc voisées (en français : /b/, /d/, /g/, /m/, /n/, /v/, /z/, /j/, /l/, /r/) ou non voisées (en français : /p/, /t/, /k/, /f/, /s/, /f/). La production du trait de voisement repose dans la majorité des langues sur la relation temporelle entre le début des vibrations laryngées et le relâchement de l'occlusion (explosion), ou *timing laryngé*, dont le corrélat acoustique le plus direct est le délai d'établissement du voisement (VOT, Voice Onset Time, Lisker & Abramson, 1964).

Le trait de mode d'articulation. La plupart des consonnes du français se caractérisent soit par un bruit de frottement (les consonnes fricatives), soit par des transitions rapides (les consonnes occlusives). Le bruit de frottement est obtenu par un resserrement du passage de l'air en un endroit quelconque du conduit buccal (en français : /v/, /f/, /z/, /s/, /j/, /f/). Toutes les consonnes qui se caractérisent entre autres par un bruit de frottement sont appelées consonnes fricatives. Les transitions rapides résultent d'un relâchement brusque d'une occlusion du conduit buccal (en français : /b/, /p/, /m/, /t/, /d/, /n/, /k/, /g/). Toutes les consonnes qui se caractérisent entre autres par des transitions rapides sont appelées consonnes occlusives car, dans un premier temps, il est pratiqué une occlusion (c'est-à-dire une "fermeture") du conduit buccal.

Le trait de lieu d'articulation. On distingue le mode d'articulation du lieu d'articulation. Les consonnes occlusive ou fricative ne sont pas toujours produites dans le même endroit de la cavité buccale. Les consonnes réalisées par une occlusion avec le concours des deux lèvres sont appelées consonnes bilabiales (en français : /b/, /p/, /m/). Les consonnes réalisées par une constriction du canal oral avec la lèvre inférieure et les dents du haut sont appelées consonnes labio-dentales (en français : /f/, /v/). Les consonnes réalisées avec une occlusion ou une constriction avec la pointe de la langue (apex) dans la région des alvéoles, des dents ou du début du palais dur sont appelées consonnes apicales (en français : /t/, /d/, /n/, /s/, /z/). Les consonnes réalisées par une friction entre le dos de la langue et le palais dur sont appelées consonnes palatales (en français : /ʃ/, /j/). Les consonnes réalisées par une occlusion entre le voile du palais et le dos de la langue sont appelées consonnes vélares (ou, éventuellement, consonnes dorso-vélares ; en français : /g/, /k/).

Le trait de nasalité. Les traits de mode d'articulation, de lieu d'articulation et de voisement ne permettent pas de classer tous les phonèmes. En français, les consonnes /d/ et /n/ sont occlusives, apicales et voisées, et /b/ et /m/ sont occlusives, bilabiales et voisées. Ainsi /d/ et /n/, d'une part, et /b/ et /m/, d'autre part, reçoivent pour l'instant une même définition. Il est nécessaire, pour décrire chaque consonne du français, de recourir à un quatrième (et dernier) critère, celui de la résonance dans les cavités nasales. Le voile du palais est mobile et peut venir fermer le passage de l'air entre le pharynx et les cavités nasales. Les consonnes /n/ et /d/, d'une part, ainsi que /m/ et /b/, d'autre part, ne se distinguent l'un de l'autre que par ce seul critère, la résonance ou la non-résonance dans les fosses nasales. Ce critère s'appelle la nasalité et les consonnes comme /n/ et /m/ qui présentent ce trait sont appelées consonnes nasales, par opposition à la plupart des autres consonnes qui sont seulement orales.

Les quatre traits qui viennent d'être présentés permettent de caractériser chaque consonne du français. En effet, ils suffisent à individualiser chaque phonème indépendamment de tous les autres, comme le montre ce tableau récapitulatif (Tableau 1).

Mode	Occlusives			Fricatives	
Voisement	Voisées		Non voisées	Voisées	Non voisées
Nasalité	Orales	Nasales	Orales	Orales	Orales
Lieu					
Bilabiales	b	m	p		
Labiodentales				v	f
Alvéolaires	d	n	t	z	s
Palatales		ɲ*		j	ʃ
Vélares	g		k		

Tableau 1. Classement des consonnes en fonction des quatre traits phonologiques (*l'occlusive nasale vélaire ɲ -comme dans vigne- n'a pratiquement plus de fonction distinctive).

1.2. Traits phonologiques des voyelles

Le français comporte 15 voyelles (i, y, u, e, ø, o, ə, ε, œ, ɔ, a, ɑ, ā, ɔ̃, ē) qui se réduit à 10 voyelles lorsque l'on ne tient compte que des voyelles distinctives dans l'ensemble des dialectes (système minimal décrit par Malmberg, 1954, Vaissière, 2006). Il est possible de décrire ces voyelles selon trois traits phonologiques : l'aperture, l'antériorité et la nasalité.

Le trait d'aperture. La position de la langue (et de la mâchoire) sur un axe vertical détermine l'ouverture de la cavité orale et donc l'aperture de la voyelle. En français, on distingue 4 degrés d'aperture : voyelles fermées (exemple : /i/, /u/, /y/), semi-fermées (exemple : /e/, /ø/, /o/, /ə/), semi-ouvertes (exemple : /ɛ/, /œ/, /ɔ/, /ɔ̃/, /ɛ̃/), et ouvertes (exemple : /a/, /ɑ/, /ã/).

Le trait d'antériorité. La position de la langue sur un axe antérieur/postérieur caractérise l'antériorité-postériorité de la voyelle : voyelles antérieures (/i/, /e/, /ɛ/, /ɛ̃/, et /a/), centrales (/y/, /ə/, /œ/, et /ø/) et postérieures (/u/, /o/, /ɑ/, /ɔ/, /ɔ̃/, et /ã/).

Le trait de nasalité. La position du velum (et donc l'ouverture ou non du passage velopharyngé) détermine la nasalité de la voyelle : voyelles orales (voile du palais relevé ; /i/, /u/, /y/, /e/, /o/, /ø/, /ə/, /ɛ/, /œ/, /ɔ/, /ɑ/, /ɑ/) et nasales (voile du palais abaissé ; /ɔ̃/, /ã/, /ɛ̃/).

L'ensemble de ces informations est représenté dans le Tableau 2.

Aperture Nasalité Antériorité	Antérieures		Centrales		Postérieures	
	Orales	Nasales	Orales	Nasales	Orales	Nasales
Fermées	i		y		u	
Semi-Fermées	e		ø		o	
Semi-ouvertes	ɛ	ɛ̃	œ	œ̃	ɔ	ɔ̃
Ouvertes	a				ɑ	ã

Tableau 2. Les 15 voyelles du français regroupées selon leurs caractéristiques articulatoires.

2. Acquisition des représentations phonémiques

L'hypothèse générale d'une relation entre la maîtrise des sons de la parole et celle de la lecture dans un système alphabétique s'appuie en premier lieu sur le fait que ce type de système d'écriture s'attache à représenter les plus fines unités de la parole, les phonèmes. Il faut donc posséder, ou du moins développer, des représentations phonémiques pour apprendre à lire et les performances de lecture dépendront de la précision de ses représentations. Dans la partie suivante, nous explorons les mécanismes susceptibles d'être mis en œuvre par l'auditeur au cours de la perception des phonèmes. L'habileté à reconnaître la parole repose sur de nombreuses compétences perceptives dont la capacité à catégoriser les sons de parole. L'enfant doit avoir acquis la capacité à déterminer quel son a été entendu à partir d'un

inventaire phonémique de sa langue maternelle, cet inventaire pouvant être constitué soit directement de segments phonémiques soit de traits phonologiques susceptibles d'être combinés en segments. L'enfant doit donc avoir acquis des compétences de discrimination et d'identification des sons de sa langue maternelle, que celles-ci soient organisées en catégories segmentales (en phonèmes) ou en traits.

2.1. Perception catégorielle

Des études fondamentales sur l'identification phonémique ont été menées dès les années 1950 aux laboratoires Haskins par Liberman et ses collaborateurs. Lors de leurs premières études sur la perception de la parole, Liberman, Harris, Hoffman & Griffiths (1957) ont établi que les différences acoustiques entre variants d'une même catégorie phonémique ne sont généralement pas perceptibles (deux variants de /ba/ par exemple), tandis que des différences de même amplitude acoustique entre des sons appartenant à des catégories différentes sont perceptibles (/ba/ et /da/). Ce phénomène est connu sous le nom de perception catégorielle (Liberman, Cooper, Shankweiler & Studdert-Kennedy, 1967). La perception catégorielle est définie par le fait que l'auditeur perçoit plus facilement les différences entre deux sons lorsqu'ils appartiennent à deux catégories phonémiques différentes, plutôt que lorsqu'ils font partie d'une même catégorie (Repp, 1984). La Figure 5 représente de manière schématique les réponses produites par l'auditeur dans une expérience de ce type.

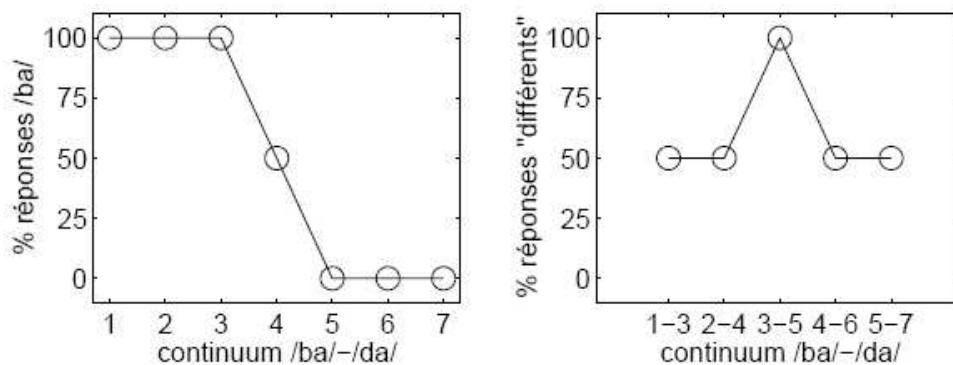


Figure 5. Réponses-typiques dans un test d'identification (à gauche) et dans un test de discrimination (à droite)

Dans cet exemple théorique, le continuum acoustique entre la syllabe /ba/ et la syllabe /da/ est composé de sept stimuli, espacés à intervalles égaux. Phonétiquement, chaque stimulus se présente sous la forme d'une syllabe synthétique dont les formants varient en fréquence dans la partie initiale. Par exemple, le F2 peut varier entre 500 Hz pour le /ba/ et 2600 Hz pour le /da/ avec un pas de 350 Hz. Ces stimuli sont présentés à plusieurs reprises

chacun et dans un ordre aléatoire à l'auditeur. Dans une tâche d'identification avec choix forcé entre deux réponses possibles (/ba/ et /da/), les données généralement obtenues sont illustrées à gauche de la Figure 6, sous la forme d'une courbe d'identification (pourcentage de réponses /ba/). La figure montre que l'auditeur associe les stimuli 1 à 3, à gauche du continuum, à la catégorie /ba/, mais que sa réponse "bascule" vers la droite du continuum au profit de l'autre catégorie proposée (/da/) pour les stimuli 5 à 7. Le stimulus 4 situé au centre du continuum est jugé ambigu. Dans une tâche de discrimination, les stimuli sont présentés par paires. La tâche de l'auditeur est de dire pour chaque paire si les stimuli dont elle se compose sont identiques ou différents. Le patron de réponse observé est représenté à droite de la Figure 6, sous la forme d'une courbe de discrimination (pourcentage de réponses "différents"). La courbe révèle que l'auditeur ne perçoit pas les différences entre stimuli à gauche et à droite sur le continuum pour les paires 1-3, 2-4, 4-6 et 5-7. L'auditeur répond "différents" une fois sur deux, c'est-à-dire au hasard, alors que la différence qui s'établit entre les stimuli 3 et 5 est correctement détectée.

Dès les premières expériences étudiant le phénomène de perception catégorielle, des tâches d'identification et de discrimination ont été utilisées. La définition classique de la Perception Catégorielle implique d'une part que la fonction d'identification présente une frontière catégorielle, et d'autre part que les performances de discrimination puissent être prédites sur base des résultats obtenus en identification. Bien que les recherches sur la perception catégorielle fassent systématiquement appel à des stimuli variant le long d'un continuum, il est également possible de se fonder sur la discrimination et l'identification de paires minimales. Une paire minimale est composée de deux items qui se différencient uniquement en fonction d'un seul trait phonologique, de manière semblable à ceux situés aux extrémités d'un continuum. Par exemple, /ba/ et /pa/ ne se différencient que par le lieu d'articulation de la première consonne. Plus précisément, les résultats des tests d'identification et de discrimination de paires minimales, comme ceux d'identification et de discrimination le long d'un continuum, permettent d'évaluer deux propriétés : la perception catégorielle et la précision catégorielle (Medina, Hoonhorst, Bogliotti & Serniclaes, in press ; Van Hossen & Shouten, 1999). La *perception catégorielle* (PC) correspond à la relation entre la discrimination et l'identification et est d'autant plus forte que la *différence* entre les deux types de scores est faible, tandis que *précision catégorielle* correspond aux capacités de discrimination et d'identification, et est d'autant plus élevée que la *somme (moyenne)* des deux types de scores est élevée. La capacité de catégorisation d'un individu dépend de ces

deux propriétés. Comparer une population atypique à une population contrôle conduit à observer l'un des quatre patterns de réponse suivants (Figure 6).

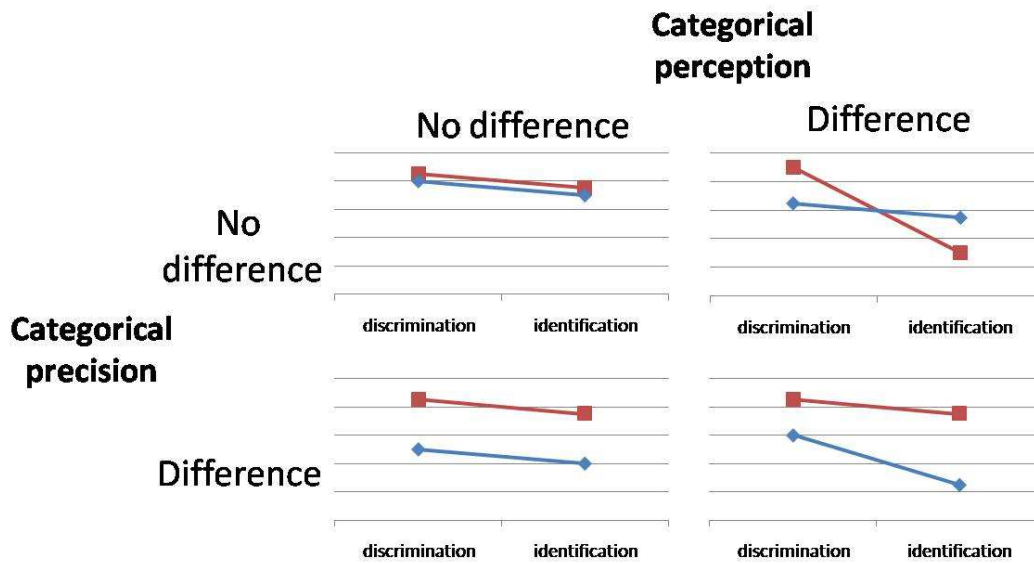


Figure 6. Représentations schématiques de différences de perception catégorielle (PC) et de précision catégorielle entre un groupe contrôle (en rouge) et un groupe atypique (en bleu). Les lignes représentent le profil des scores de réponses d'identification et de discrimination. La PC dépend de la correspondance entre les scores d'identification et de discrimination : plus la *différence* entre les deux types de scores est faible (plus les lignes sont horizontales) plus la PC est forte. La précision dépend de la valeur des scores d'identification et de discrimination, plus la *somme (moyenne)* de ces deux scores est élevée plus la précision est forte.

Dans la Figure 6, le pattern en haut à gauche indique qu'il n'y a pas de différence entre les groupes tant pour la PC, comme le montre l'égalité des pentes des profils de réponses, que pour la précision catégorielle, comme le montre l'égalité des scores de discrimination et d'identification. Dans le pattern en haut à droite la pente des profils est plus forte pour le groupe atypique, indiquant que la PC est plus faible pour ce groupe, mais la précision catégorielle est similaire entre les deux groupes, comme l'égalité entre les moyennes des scores de discrimination et d'identification (le croisement des lignes au milieu du graphique). Dans le pattern en bas à gauche, la PC est équivalente pour les deux groupes, comme le montre l'égalité des pentes des profils, alors que la précision catégorielle est plus faible pour le groupe atypique comme le montre l'abaissement des deux types de scores de ce groupe par rapport au groupe contrôle. Enfin, le pattern en bas à droite indique à la fois une différence de perception catégorielle et de précision catégorielle.

La capacité à catégoriser des sons et à les percevoir de manière catégorielle a des implications fonctionnelles importantes pour la perception de la parole car elle permet d'inhiber en tout ou en partie (lorsqu'elle n'est pas parfaite) la discrimination de variations acoustiques non pertinentes pour l'identification des traits et phonèmes. Bien que ces derniers soient en nombre limité, la variabilité intrinsèque de leurs corrélats acoustiques dans le signal de parole (en fonction de divers facteurs tels que le sexe, l'accent, l'intonation, l'état émotionnel, ...), est très large. Cette variabilité ne semble pas empêcher la communication normale, les individus ayant développé un mécanisme de catégorisation qui gère cette variabilité. Tout se passe donc comme si l'auditeur faisait abstraction des variations acoustiques à l'intérieur de chaque catégorie phonémique, pour se focaliser sur les variations intercatégorielles susceptibles de différencier les phonèmes les uns des autres. Nous allons examiner les différents arguments de la théorie motrice et de la théorie de la perception directe (Fowler, 1996), ces deux théories suggérant que l'invariance perceptive à l'origine du phénomène de perception catégorielle est une invariance articulatoire, et les comparer aux arguments des théories auditives, pour lesquelles l'invariance est acoustique.

Origine de la perception catégorielle : invariance articulatoire ou invariance proprement perceptive

La théorie motrice (Lieberman et al., 1967; Lieberman & Mattingly, 1985) postule qu'il existe un lien étroit entre perception et production de la parole. Ainsi, la théorie motrice suppose que des sons acoustiquement différents sont le produit d'un même *geste articulatoire* lorsqu'ils appartiennent à la même catégorie. Les phénomènes de perception catégorielle présentent donc un grand intérêt pour la théorie motrice : ils suggèrent que la catégorisation des sons de la parole est basée sur des invariants articulatoires. La différence acoustique entre deux sons produits par les mêmes articulateurs serait négligée par l'auditeur. L'expérience princeps de Lieberman et al. (1957), qui utilisait un continuum /bə-də-gə/, a permis de mettre en évidence une fonction d'identification abrupte lors du passage d'une catégorie de son à une autre, ainsi qu'une discrimination faible lors de la présentation de deux stimuli appartenant à la même catégorie, et une discrimination accrue lorsqu'il s'agissait de distinguer deux stimuli chevauchant la frontière phonémique. L'auditeur parviendrait donc à distinguer des stimuli en se référant à des gestes discrets de production, qualitativement différents pour les trois types de stimuli. Les stimuli /ba/, /da/ et /ga/ ne varient que sur un seul geste articulatoire : le lieu d'articulation. Il a en cela été interprété comme un argument majeur en faveur de la théorie motrice de la perception de la parole dans laquelle un lien étroit est postulé entre perception et

production de la parole. Dans la théorie motrice, l'auditeur interprète le signal de parole comme le produit de plusieurs mouvements articulatoires, et la présence de ces frontières articulatoires dans l'espace des consonnes et des voyelles expliquerait que les phonèmes soient perçus sur un mode catégoriel.

D'autres théories en référence à l'articulation ont été proposées, mais elles ne s'appuient pas sur la connaissance des mécanismes de production comme dans la théorie motrice. La théorie de la perception directe (Fowler, 1996) s'inspire de la théorie de la perception de l'objet (Gibson, 1966), qui considère que les objets sont perçus 'directement' plutôt qu'au travers d'une analyse de leurs composants (c'est-à-dire une analyse des traits). Le pattern de stimulation visuelle, produit par le mouvement d'un objet dans l'espace, permettrait de lui attribuer des propriétés invariantes de haut niveau, ce qui permettrait une perception directe de celui-ci. La perception directe permet d'extraire des invariants articulatoires, comme dans la théorie motrice, mais précise que ces invariants sont directement perçus dans une interface modulaire spécifique et sans inférence cognitive de la part du sujet. Pour Fowler, le percept n'est pas une représentation, il est ce que l'environnement donne à saisir sans intermédiaire cognitif. Les sons sont supposés disposer d'un pattern acoustique systématique car les articulateurs qui produisent les patterns sont contraints dans les mouvements qu'ils peuvent réaliser. De ce fait, le sujet récepteur ne serait pas sensible aux variations acoustiques contextuelles liées au même geste articulatoire. A ce sujet Fowler (1996) donne l'exemple de la perception du phonème /d/ qui, en fonction du contexte vocalique, varie dans sa structure acoustique. Selon cet auteur, le phonème /d/ est perçu de la même manière dans les occurrences /di/ et /du/ parce que le geste articulatoire (la constriction apicale) est identique dans ces deux syllabes. Selon la théorie de la perception directe, un auditeur perçoit la parole en utilisant l'information tirée des changements des patterns auditifs, pour accéder ensuite à l'information donnée par les mouvements articulatoires.

Bien que ces deux courants de recherche s'opposent sur le fait que le traitement des invariants articulatoires soit sériel ou direct, ils postulent que la perception des phonèmes par un sujet normo-entendant ne serait pas sensible aux variations acoustiques contextuelles mais serait déterminée par les gestes articulatoires qui caractérisent chaque phonème. Cette capacité à percevoir de manière catégorielle les sons de parole a fait l'objet de nombreuses études chez l'adulte mais aucune des théories présentées n'explique précisément comment les catégories sont acquises. Selon les théories de la perception directe réaliste, les invariants « Gibsoniens » de niveau supérieur se construisent par simple apprentissage discriminant. Cette explication semble difficile au vu des échecs d'apprentissage de contrastes

phonologiques d'une langue étrangère (Strange & Dittmann, 1984). Au contraire, pour les partisans des théories auditives (Schouten, 1980 ; Miller, Wier, Pastore, Kelly, & Dooling, 1976), la perception catégorielle peut être expliquée par des propriétés générales du système auditif, ce dernier étant par nature et de manière innée sensible aux propriétés des sons de la parole. Les recherches qui ont montré que la perception catégorielle n'était ni limitée aux sons linguistiques (Cutting & Rosner, 1974) ni aux humains (e.g. Kuhl & Miller, 1975 ; 1978) ont donné une validité expérimentale à ces théories. De même, les travaux de Eimas, Siqueland, Jusczyk et Vigorito (1971) qui mettent en évidence une perception catégorielle chez des enfants âgés de 1 à 4 mois laissent à penser qu'elle est basée sur des propriétés auditives générales en place très tôt dans le développement, voire dès la naissance. Bien que séduisantes par leurs approches, ces théories ne sont pas suffisamment flexibles pour rendre compte de la réalité. Ces trois théories ne permettent pas d'expliquer l'intégration phonologique de traits universels, qui sont perçus de manière catégorielle en dehors de tout apprentissage. Une description du développement de la perception catégorielle chez le nourrisson et chez l'enfant permettra de préciser le caractère dynamique de la perception de la parole.

2.2. Perception catégorielle des sons de parole, un développement dynamique

2.2.1. Potentiel du nourrisson

L'émergence du langage, habileté cognitive complexe, nécessiterait que l'individu soit soumis à une stimulation spécifique pendant une période dite sensible voire critique. L'expérience influence profondément le développement du cerveau et donc celui du comportement. Knudsen (2004) définit les notions de période sensible et de période critique. La période sensible peut être définie comme le laps de temps pendant lequel les effets de l'expérience sur la structuration cérébrale (élaboration et élimination de circuits axonaux et synaptiques) sont majeurs. Les effets de l'expérience sur le développement d'un comportement sont particulièrement forts pendant une période sensible puisque le nourrisson acquiert des compétences pendant ce laps de temps. Ces compétences sont donc altérées en l'absence de stimulation. La période critique est une sous-catégorie de la période sensible. Elle correspond à la période pendant laquelle un certain type d'expériences est requis pour permettre à l'individu de se développer normalement ; l'absence de stimulation adéquate altérant irrémédiablement la suite du développement. Il en résulte des changements irréversibles dans le fonctionnement du cerveau. Identifier les périodes critiques est donc important puisque les

effets négatifs d'une expérience atypique pendant une période critique ne peuvent pas être restaurés par une expérience critique ultérieure.

Les recherches concernant le développement de la perception de la parole, ont montré que le bébé humain testé in-utero a développé des compétences à traiter le langage. Le fœtus détecte la voix humaine (Querleu, Renard, et Crépin, 1981), et préfère la voix de sa mère à celle d'une femme inconnue (DeCasper, Lecanuet, Busnel, Granier-Deferre, et Maugeais, 1994). Après la naissance, le nouveau-né continue à acquérir des compétences variées de traitement de la parole. Les recherches ont mis en évidence que les nouveaux nés issus d'un milieu francophone traitent les unités syllabiques du langage (Bertoncini et Mehler, 1981), montrent une préférence pour la prosodie du français plutôt que pour celle du russe (Mehler, Jusczyk, Lambertz, Amiel-Tison, et Bertoncini, 1988). Ils sont également capables de distinguer des langues qu'ils n'ont jamais entendu (Nazzi, Bertoncini, et Mehler, 1998 ; Ramus, Hauser, Miller, Norris, et Mehler, 2000). Nazzi et al. (1998) ont précisé ces résultats en montrant que cette capacité à distinguer deux langues est basée sur une différence de rythme entre les langues.

Plus spécifiquement, le nouveau-né acquiert également des compétences langagières dévolues à la catégorisation des sons de parole. Les études présentées ci-après précisent que le nouveau né catégorise les sons de parole dès les premiers mois de vie mais ne semble pas avoir acquis des catégories phonémiques similaires à celles de l'adulte. Les compétences de perception catégorielle sont évaluées avec un continuum de stimuli voisés et non voisés (/ba-pa/), caractérisées par des frontières universelles qui se situent à -30ms et +30ms de VOT (Lisker et Abramson, 1964). Des bébés hispanophones âgés de 4 à 6 mois discriminent les contrastes -60/-40ms de VOT et +40/+60ms de VOT alors que le contraste phonologique en espagnol se situe à -20/+20ms de VOT (Lasky, Syrdal-Lasky et Klein, 1975). Les nouveaux nés hispanophones ne catégorisent donc pas le trait de voisement selon l'opposition phonémique caractéristique de la perception adulte mais plutôt selon les frontières universelles de voisement. Ces résultats ont été répliqués par Streeter (1976) sur des enfants de 2 mois exposés au Kikuyu⁴. Cette conclusion ne s'applique pas aux nourrissons de 1 à 4 mois élevés dans un environnement anglophone puisque que la frontière de l'opposition voisée / non voisée caractéristique de l'adulte anglophone correspond à la frontière universelle en anglais (Eimas et al., 1971).

⁴ Le Kikuyu est une langue bantoue du Kenya dans laquelle la frontière phonologique du voisement est, comme en espagnol, située à 0 ms DEV.

Une autre étude, réalisée par Eilers, Gavin et Wilson (1979), permet de préciser l'effet de la langue maternelle (anglais vs espagnol) sur la discrimination des syllabes /ba-pa/ chez des nourrissons plus âgés, testés à l'âge de 6, 7 et 8 mois. Les résultats indiquent que dès 6 mois, les nouveaux nés espagnols acquièrent la frontière phonémique caractéristique de leur langue maternelle. Les résultats montrent que, quelle que soit la langue maternelle, les bébés sont sensibles au contraste +10/+40ms de VOT, alors que seuls les bébés exposés à la langue espagnole sont sensibles au contraste -20/+40ms de VOT. Cette étude indique donc que les bébés hispanophones âgés de 6 à 8 mois sont sensibles aux frontières universelles de voisement située à +30ms de VOT mais également que le processus de spécialisation phonologique est amorcé. En effet, les nourrissons discriminent la paire de stimuli situés de part et d'autre de l'opposition phonologique caractéristique du voisement en espagnol (à 0ms de VOT). Ces études posent la question du rôle joué par l'expérience linguistique dans la formation des compétences perceptives initiales.

Les études décrites précédemment constituent les premières preuves expérimentales du processus de spécialisation phonologique, spécifique à la langue du sujet. Les études de Werker et Tees (1984a, 1984b) permettent de préciser le décours développemental de ce phénomène. Werker et Tees (1984a) présentent à des nourrissons issus d'un milieu anglophone des contrastes de lieu d'articulation du thompson⁵ (consonnes glottales non voisées vélaires et uvulaires), de l'hindi (consonnes non aspirées non voisées rétroflexe et dentale) et de l'anglais (consonnes voisées bilabiale et apicale). Les résultats indiquent que les nourrissons âgés de 6-8 mois sont capables de discriminer l'ensemble des contrastes, alors que les compétences à discriminer les contrastes non natifs thompson et hindi diminuent à 8-10 mois jusqu'à devenir quasiment nulles à 10-12 mois. La bascule entre les compétences à discriminer les contrastes universelles et les compétences à discriminer uniquement les contrastes natifs aurait donc lieu pendant la première année de vie.

Enfin, les enfants exposés au français discriminent les paires de stimuli aux frontières situées à -30 et +30ms de VOT lorsqu'ils sont âgés de 4 mois mais ils discriminent davantage la frontière située à 0ms de VOT lorsqu'ils sont âgés de 8 mois (Hoonhorst, Colin, Markessis, Radeau, Deltenre & Serniclaes, 2009b). Etant donné que la frontière située à 0ms de VOT correspond à une opposition phonémique en Français, ces résultats indiquent que l'exposition à la langue maternelle permet au nouveau-né de se former des catégories de sons de parole spécifique à son environnement langagier. Les enfants exposés à l'anglais discriminent

⁵ La langue thompson est une langue indienne parlée en Colombie britannique.

également davantage les contrastes non natifs lorsqu'ils sont âgés de 6 à 8 mois que lorsqu'ils sont âgés de 12 mois (Rivera-Gaxiola, Silva-Peyrera & Kuhl, 2005; Burns, Yoshida, Hill & Werker, 2007).

En résumé, les données collectées chez les nouveaux nés indiquent un apport essentiel de l'exposition à la langue maternelle pour acquérir des frontières phonémiques spécifiques à la langue maternelle. La précision des représentations phonémiques acquises par l'enfant est liée à la capacité du nourrisson à détecter les patterns articulatoires de sa langue maternelle. Selon Serniclaes (in press), il semble que ce soit davantage une restructuration de l'espace perceptif qui se déroule plutôt qu'une sélection des sons phonologiquement pertinents dans la langue de l'auditeur. En témoignent les résultats par exemple de Hoonhorst et collaborateurs (Hoonhorst, Serniclaes, Collet, Colin, Markessis, Radeau & Deltenre, 2009a ; Hoonhorst et al., 2009b) qui montrent que les nourrissons francophones de moins de six mois discriminent le VOT sur base de frontières perceptives naturelles (à -30 et +30 ms VOT) alors que les nourrissons de plus de six mois sont sensibles à la frontière phonologique adulte, aux alentours de 0 ms de VOT. Ainsi, Serniclaes a émis l'hypothèse que les frontières phonémiques d'un auditeur résultent d'un couplage des oppositions non natives. Les traits issus du couplage sont donc spécifiques à la langue, et de nature phonémique. Acquérir des frontières phonémiques spécifiques à sa langue maternelle est une condition nécessaire à la compréhension de sa langue. Néanmoins, catégoriser les phonèmes selon une frontière phonémique ne suffit pas à percevoir les sons de parole de manière catégorielle. Des recherches ont montré que l'enfant continue à développer des compétences de perception catégorielle après la première année de vie.

2.2.2. *Acquisition de la perception catégorielle chez l'enfant*

Un problème de base dans l'étude du développement de la parole est de comprendre le décours développemental de l'acquisition de la perception catégorielle. L'époque à laquelle se déroule la réorganisation perceptive est particulièrement intéressante. Plusieurs études ont mis en lumière une tendance développementale des compétences de perception catégorielle et de précision catégorielle. Deux études différentes indiquent une absence d'effet de l'âge sur la perception catégorielle mais bien un effet de l'âge sur la précision catégorielle : on constate une augmentation de la précision de la frontière sur un continuum de voisement avec l'augmentation de l'âge (enfants de 6 à 8 ans et adultes), alors que la perception catégorielle ne varie pas entre les groupes (Medina et al., in press ; Hoonhorst, Medina, Colin, Markessis, Radeau, Deltenre & Serniclaes, en révision).

La précision catégorielle semble donc se développer jusqu'à l'âge adulte. Ce résultat est en accord avec différents travaux antérieurs. Des précédentes études montrent que l'identification de l'opposition du contraste natif s'améliore avec l'âge alors que l'identification de l'opposition non native se dégrade avec l'âge. Burnham, Earnshaw et Clark (1991) testent la perception d'un continuum de voisement chez 4 groupes de sujets anglophones : des bébés de 9 et 11 mois, des enfants de 2 ans, des enfants de 6 ans et des adultes. Les continuums de voisement sont composés de contrastes natifs et non natifs. Burnham et collaborateurs ont remarqué que l'identification devenait de plus en plus centrée sur les contrastes natifs avec l'accroissement de l'âge. Plus précisément, c'est à l'âge de 6 ans que la catégorisation selon la frontière non native se situe au niveau du hasard, et que la catégorisation selon la frontière native s'améliore nettement. La pente de la fonction d'identification devient également plus raide entre 2 ans et l'âge adulte (Zlatin & Koeningsknecht, 1975; Simon & Fourcin, 1978; Burnham et al., 1991 ; Hazan et Barrett, 2000). Hazan et Barrett (2000) ont mis en évidence une progression dans la cohérence de la catégorisation phonémique entre 6 et 12 ans, et cette progression s'est également manifestée dans la comparaison des performances des enfants de 12 ans à celles des adultes (environ 30 ans). Par l'examen des pentes d'identification obtenues sur des contrastes occlusifs /k/-/g/ et /d/-/g/ et fricatifs /s/-/z/ et /s/-/ʃ/, les auteurs ont constaté que la catégorisation phonémique était plus développée chez les adultes que chez les enfants.

Considérés ensemble, ces résultats sont caractéristiques de deux phénomènes importants : la stabilité de la perception catégorielle d'une part et la maturation progressive des performances de précision catégorielle d'autre part. Ces études indiquent que l'accroissement de l'âge joue un rôle important dans la précision des compétences de catégorisation mais que la perception catégorielle semble acquise avant l'âge de 6 ans. Les études précédemment citées ont permis de mettre en évidence que les périodes entre 0 et 1 an et entre 0 et 6 ans peuvent correspondre respectivement à une période sensible ou critique de la détermination des frontières phonémiques et de l'acquisition de la perception catégorielle. Au contraire, la période de développement de la précision catégorielle s'étend jusqu'à l'âge adulte.

Percevoir les phonèmes de manière catégorielle ne consiste pas uniquement en la capacité à percevoir des invariants phonologiques. Les connaissances que les enfants acquièrent dans le domaine sémantique sont également susceptibles d'influencer la perception des mots et donc des phonèmes qui les composent. La partie suivante porte donc sur l'influence des représentations lexicales sur la perception des unités phonémiques.

2.3. Influence des représentations lexicales sur la perception phonémique

De nombreuses recherches ont précisé le rôle du lexique dans la capacité à percevoir les sons de parole de manière catégorielle. Différents modèles ont été développés pour rendre compte de la façon dont les auditeurs effectuent l'appariement entre les catégories phonémiques et les représentations lexicales stockées en mémoire. Les modèles Cohorte II (Marslen-Wilson, 1987, 1989, 1990) et TRACE (McClelland et Elman, 1986) s'opposent sur l'influence des informations lexicales pendant la reconnaissance des mots écrits. Selon le modèle de la cohorte II, il n'y a pas d'activation des informations lexicales lors de la perception de la parole. Un auditeur sélectionne dès les premières 100 à 150 ms, un ensemble de candidats (cohorte) possibles commençant par le premier trait phonétique du mot traité. Il y a donc une réduction séquentielle du nombre de candidats lexicaux à mesure que l'information acoustique est traitée. Seule l'information acoustique permet l'activation et l'élimination des candidats pour aboutir à la perception correcte du mot entendu. Suite à l'activation du mot correct, le sujet accède à sa représentation lexicale. Selon le modèle TRACE (McClelland et Elman, 1986), les représentations des traits phonémiques, des phonèmes et des informations lexicales interagissent pour percevoir les mots. Les informations lexicales influencent la perception des phonèmes puisque ce n'est qu'après avoir reconnu le mot, qu'un mécanisme de rétroaction d'activation descendante permettra l'identification des phonèmes contenus dans ce mot.

Ces modèles ont fourni un cadre permettant de déterminer dans quelle mesure l'auditeur tire parti de ses connaissances lexicales pour identifier les phonèmes dont un mot est composé. Afin de pouvoir identifier correctement les phonèmes dans le signal de parole, la solution envisagée par le modèle TRACE pour faciliter l'appariement d'une image auditive avec des représentations phonémiques ou phonologiques consiste à faire intervenir des procédures de rétroaction des niveaux lexicaux vers les niveaux de représentation prélexicaux. Ainsi, des connaissances de haut niveau faciliteraient la tâche du système d'identification phonémique en guidant les choix perceptifs dans les situations problématiques. Les partisans d'une approche interactive (notamment McClelland & Elman, 1986) se sont également heurtés à un courant autonome dont les représentants (Cutler, Mehler, Norris, & Segui, 1987) affirmaient l'indépendance entre niveaux de traitement de bas niveau et représentations plus élaborées. Nous décrivons dans les paragraphes suivants certaines données expérimentales présentées comme reflétant des preuves du recours à des rétroactions lexicales.

Certaines recherches ont mis en évidence que les connaissances lexicales permettent de reconnaître un phonème mal prononcé ou masqué par un bruit. Les célèbres expériences de

Warren (1970) sur la restauration phonémique ont montré que le lexique permet à l'auditeur de reconstituer la forme sonore d'un phonème remplacé par du bruit dans une phrase. Selon Warren, l'influence des informations lexicales entraîne un véritable phénomène d'illusion perceptive, dans la mesure où l'auditeur "entend" le phonème bien que le segment acoustique correspondant ait été supprimé. Par ailleurs, Cutler et al. (1987) ont montré qu'un même phonème est plus facilement détecté dans un mot que dans un non-mot. Ainsi, les informations lexicales facilitent la perception phonémique. Une autre étude fondamentale montrant un effet de lexicalité est celle de Ganong (1980). Lorsqu'on demande à des sujets de catégoriser des phonèmes dont on fait varier le VOT sur un continuum allant de /d/ à /t/, on observe une courbe de perception catégorielle classique (c'est-à-dire un basculement brutal de la perception de /d/ à /t/ pour les valeurs situées au milieu du continuum). Lorsqu'à une extrémité du continuum, le stimulus forme un mot (task) et à l'autre extrémité du continuum, le stimulus forme un non-mot (dask), on observe alors un déplacement de la frontière catégorielle en faveur de la réponse « mot ». Il semble donc que l'information lexicale affecte le jugement des sujets sur l'identité des phonèmes.

Selon l'une des hypothèses avancées pour expliquer ce phénomène, un transfert d'informations de haut en bas (du lexique vers les niveaux inférieurs de traitement) a lieu dans la perception de la parole. On parle d'un effet descendant du lexique sur la perception de la parole, ou effet top-down (Elman et McClelland, 1988). En effet, pour expliquer pourquoi les connaissances lexicales influencent la perception des phonèmes, on peut adopter une vue interactive de l'architecture du système de traitement. Il y aurait des procédures de rétroaction du niveau lexical vers le niveau prélexical, c'est-à-dire une influence descendante sur la perception. C'est le point de vue adopté par le modèle TRACE qui postule des connexions facilitatrices descendantes. Ainsi, quand un mot est activé, il active en retour les phonèmes contenus dans ce mot par un mécanisme d'excitation de haut en bas. Ceci peut expliquer, par exemple, pourquoi un phonème est identifié plus rapidement dans un mot que dans un non-mot (Cutler et al., 1987 ; Frauenfelder, Segui, et Dijkstra 1990).

L'existence de ces effets top-down est loin d'être reconnue par tous les auteurs (voir par exemple Norris, McQueen, Cutler, 2000 ; McQueen, Norris, Cutler, 2001, pour un état des discussions actuelles). Tous les chercheurs n'adoptent pas cette conception interactive du fonctionnement du système de traitement. Selon Cutler et Norris, il n'y a pas d'influence descendante du niveau lexical sur le niveau des phonèmes. Selon eux, l'identification des phonèmes résulte d'une course entre une route phonémique et une route lexicale (par laquelle on accède aux représentations phonologiques des mots à partir du lexique). Les phonèmes

peuvent donc être identifiés soit directement sur la base d'une analyse de l'input ou bien, en accédant aux représentations phonologiques des mots, stockés dans le lexique. L'intervention d'un mécanisme de rétroaction du niveau lexical sur le niveau phonémique ne serait donc pas nécessaire pour rendre compte des effets décrits plus haut.

3. Relation perception des sons de parole et lecture

L'examen des unités et processus impliqués dans la perception des sons de parole permet d'établir des relations avec les processus de lecture. Pouvoir lire nécessite des compétences langagières orales. Plus particulièrement, pouvoir mettre en œuvre la procédure sous-lexicale de lecture nécessite des capacités de perception phonémique et de mémoire à court terme phonologique (voir Figure 7). L'opération de segmentation de la parole en phonèmes nécessite des représentations phonémiques bien spécifiées. De pauvres représentations phonémiques ou des représentations phonémiques mal définies peuvent interférer ou entraîner un retard d'acquisition de la lecture. Des représentations phonologiques mal définies influencent le développement de la conscience phonémique (Fowler, 1991), et entraînent des difficultés à apprendre à lire. Notons ici que les représentations phonémiques ne précèdent pas nécessairement l'acquisition de la lecture (Serniclaes, Ventura, Morais, Kolinsky, 2005). La perception de la parole pourrait se faire en termes d'unités non-segmentales (les traits) qui s'organiseraient ensuite sous forme de phonèmes sous l'influence de l'écriture alphabétique. Ce serait alors la qualité des représentations en traits phonologiques, plutôt que celles des unités phonémiques si ces dernières étaient absentes au départ, qui serait déterminante pour acquérir simultanément phonèmes et graphèmes à partir de leurs interrelations. Selon les modèles Dual Route (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001) et CDP++ (Connectionist Dual Process ; Perry, Ziegler and Zorzi, 2010), les enfants qui ont des difficultés à apprendre à lire présentent des difficultés à mettre en relation les représentations phonologiques des mots parlés et la structure orthographique des mots écrits.

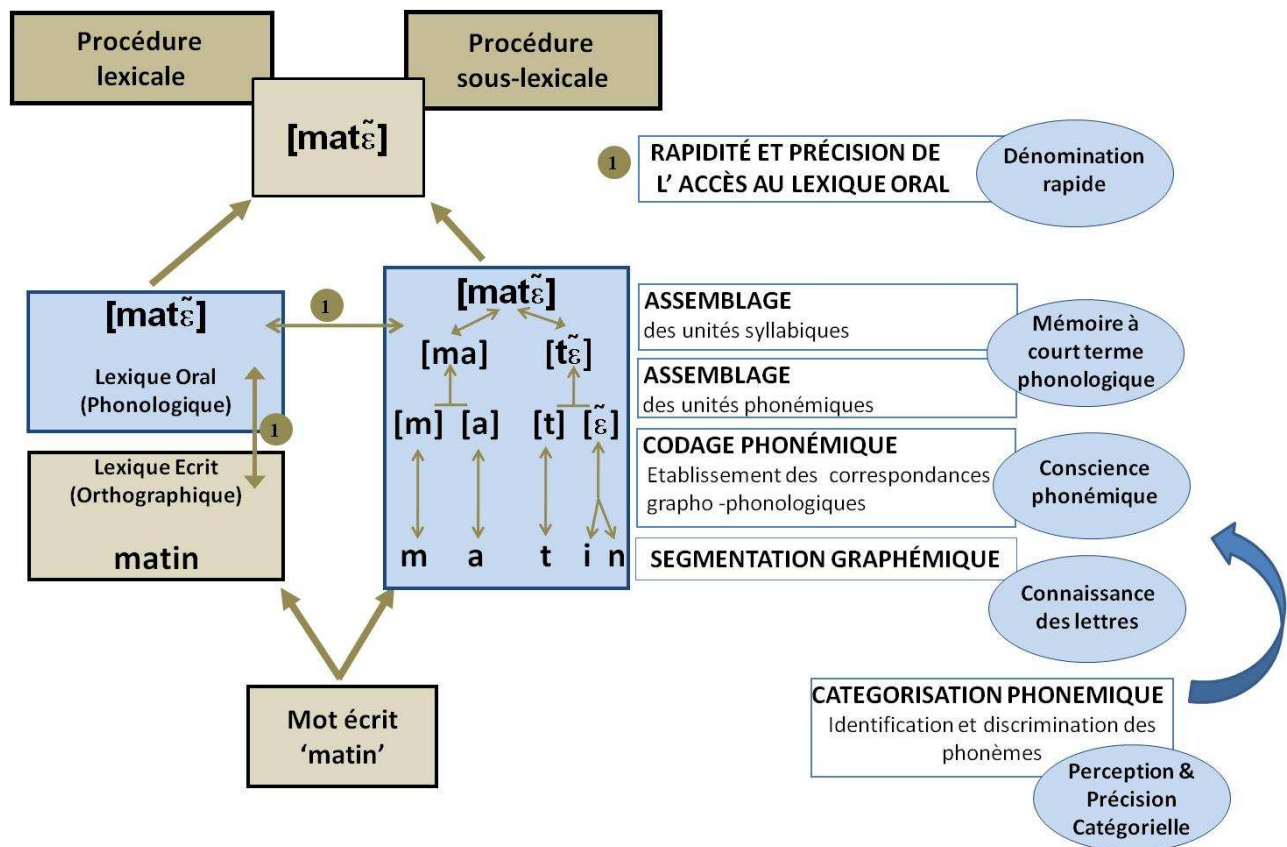


Figure 7. Représentation schématique des processus de lecture et des habiletés langagières orales associées à la réussite en lecture. Les compétences langagières orales sont en bleu et les compétences langagières écrites sont en marron. (figure adaptée avec l'autorisation de Liliane Sprenger-Charolles).

Burnham a conduit une étude sur la discrimination d'une opposition de voisement phonémique en thaï mais non en anglais (celle entre VOT négatif et VOT nul) avec des enfants anglophones au début de l'apprentissage de la lecture (Burnham, 2003). Il a constaté que la perception d'un contraste non natif dépendait de l'âge et du niveau de lecture. Dans le système scolaire australien, les parents peuvent choisir l'âge du début de l'apprentissage de la lecture pour leurs enfants. Burnham a observé que les performances de discrimination d'une paire intra-catégorie étaient plus fortes chez les enfants les plus jeunes, mais également chez les enfants qui ont appris à lire tard (comparativement à des enfants de même âge chronologique). Dans la mesure où ce résultat n'est pas dû à un biais de sélection (le choix de l'âge pouvant être influencé par les capacités langagières de l'enfant), il mettrait en évidence les relations existant entre la perception de la parole et l'apprentissage de la lecture. De manière similaire, Hoonhorst et al. (in revision) ont mis en évidence une corrélation entre les compétences de lecture et la perception catégorielle. En effet, les mesures de lecture étaient significativement corrélées à celle de pente de la fonction d'identification pour la rapidité de

lecture des mots réguliers ($r = .60$) et des pseudo-mots ($r = .46$). Cette corrélation positive suggère que plus la lecture des participants est rapide, plus la précision catégorielle est élevée, sans que l'on puisse déterminer le sens de la causalité. Cependant Serniclaes et al., (2005) ont mis en évidence un lien entre la précision de la frontière et la lecture lorsqu'ils comparent les performances de perception d'un continuum de voisement d'adultes illettrés et lettrés, la pente de la fonction étant plus faible pour les illettrés. Par contre, les deux groupes présentaient le même degré de relation entre discrimination et identification, donc les mêmes performances de perception catégorielle. Ceci va à l'appui d'un effet causal de la lecture sur la précision catégorielle mais non sur la perception catégorielle.

La relation entre lecture et perception des sons de parole a également été mise en évidence par les études menées sur la dyslexie. De nombreuses études ont montré que les dyslexiques ont des difficultés à percevoir les unités phonémiques. Ils obtiennent des scores inférieurs à ceux d'enfants normo-lecteurs dans des tâches de discrimination de paires minimales de syllabes (par exemple /ba-/da/ ; Reed, 1989 ; Masterson, Hazan & Wijayatilake, 1995 ; Mody, Studdert-Kennedy, & Brady, 1997 ; Adlard et Hazan, 1998). Les différences entre ces deux groupes ne résulteraient pas de difficultés d'acuité perceptive de la part des dyslexiques, mais plutôt d'une capacité dégradée à catégoriser les sons en classes phonémiques. Dès lors, plusieurs auteurs ont fait l'hypothèse qu'un déficit de perception catégorielle des sons de la parole était à l'origine de la dyslexie. Le déficit de perception catégorielle se caractérise par une difficulté à percevoir des différences entre stimuli appartenant à des catégories phonémiques distinctes (Godfrey, Syrdal-Lasky, Millay & Knox, 1981 ; Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré, & Démonet, 2001 ; Bogliotti, Messaoud-Galusi & Serniclaes, 2002), et une discrimination accrue des différences intra catégorie (Serniclaes et al., 2001). Comme le suggèrent des études récentes (pour une revue, voir Sprenger-Charolles, Colé & Serniclaes, 2006), cette sensibilité accrue des dyslexiques aux composants phonétiques des oppositions phonologiques pourrait être la conséquence d'un mode de perception allophonique (Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré & Sprenger-Charolles, 2004 a & b; Bogliotti, 2003). La perception allophonique se caractérise par une meilleure perception des traits phonétiques non pertinents sur le plan phonologique dans la langue (Dufor, Serniclaes, Sprenger-Charolles & Démonet, 2009; Serniclaes et al., 2004). Cette perception allophonique résulterait de l'absence de couplage entre prédispositions perceptives, et ce déficit de couplages constitue un obstacle à l'établissement des associations entre les graphèmes et les phonèmes, plusieurs phonèmes s'associant à un même graphème, entravant la mise en œuvre de la procédure sous-lexicale de lecture. Ainsi, un enfant qui

perçoit les allophones de la catégorie phonémique /p/, par exemple /p/ et /p^h/ aura des difficultés à associer le même symbole graphique « p » aux phonèmes /p/ et /p^h/, étant donné que ces deux unités appartiennent à des catégories phonémiques distinctes dans son répertoire. Par conséquent, la présence d'un déficit de perception catégorielle chez les dyslexiques fait entrevoir la possibilité d'une relation de cause à effet avec leurs difficultés dans la mise en œuvre de la procédure sous-lexicale. Un manque de cohésion de leurs percepts phonémiques peut constituer un obstacle à l'établissement des correspondances graphème-phonème (Carré, Sprenger-Charolles, Messaoud-Galusi & Serniclaes, 2000).

Références

- Adlard, A., & Hazan, V. (1998). Speech perception in children with specific reading difficulties (Dyslexia). *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51, 153-177.
- Bertoncini, J., & Mehler, J. (1981). Perception in newborn infants. *La Revue du Praticien*, 31(5), 387-396.
- Bogliotti, C. (2003). *Relation between categorical perception of speech and reading acquisition 15th International Congress of Phonetic Sciences, Barcelona, August 2003 pp. 885-888.*
- Bogliotti, C., Messaoud-Galusi, S. & Serniclaes, W. (2002). Relations entre la perception catégorielle de la parole et l'apprentissage de la lecture. In *XXIV^{èmes} Journées d'Etudes sur la Parole (JEP)*. Le Chesnay, France: INRIA, 197-200.
- Burnham, D. (2003). Language specific speech perception and the onset of reading. *Reading and Writing: an interdisciplinary journal*, 16 (6), 573-609.
- Burnham, D.K., Earnshaw, L.J., & Clark, J.E. (1991). Development of categorical identification of native and non-native bilabial stops: Infants, children and adults. *Journal of Child Language*, 18, 231-260.
- Burns, T.C., Yoshida, K.A., Hill, K., & Werker, J.F. (2007). The development of phonetic representation in bilingual and monolingual infants. *Applied Psycholinguistics*, 28, 455- 474.
- Carré, R., Sprenger-Charolles, L., Messaoud-Galusi, S., & Serniclaes, W. (2000). *On auditory-phonetic short-term transformation*. In International Congress of Speech and Language (ICSLP) (pp. 937-940). Beijing: ICSLP.
- 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.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204-256.
- +Cutler, A., Mehler, J., Norris, D., & Segui, J. (1987). Phoneme identification and the lexicon. *Cognitive Psychology*, 19, 141-177. (à la place de l'autre cutler, 1986)
- Cutting, J.E., & Rosner, B.S. (1974). Categories and boundaries in speech and music. *Perception & Psychophysics*, 16, 564-570.
- DeCasper, A.J., Lecanuet, J.P., Busnel, M.C., Granier-Deferre, C., & Maugeais, R. (1994). Fetal reactions to recurrent maternal speech. *Infant Behavior and Development*, 17, 159-164.
- 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(1), 241-248.

Eilers, R., Gavin, W., & Wilson, W. (1979). Linguistic exposure and phonetic perception in infancy: a cross-linguistic study. *Child Development*, 50, 14-18.

Eimas, P.D., Siqueland, E.R., Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science*, 171, 303-306.

Elman, J.L., & McClelland, J.L. (1988). Cognitive penetration of the mechanisms of perception: Compensation for Co-articulation of lexically restored phonemes. *Journal of Memory and Language*, 27, 143-165.

Fowler, C.A. (1996). Listeners do ear sounds, not tongues. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99, 1730-1741.

Frauenfelder, U., Segui, J., & Dijkstra, T. (1990). Lexical effects in phonemic processing: facilitatory or inhibitory. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance*, 16(1), 77-91.

Fromkin, V.A. (1979). Persistent questions concerning distinctive features. In B. Lindblom & S. Ohman (Eds.), *Frontiers of Speech Communication Research* (pp. 323-334). Academic Press: London.

Ganong, W. (1980). Phonetic categorization in auditory word perception. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance*, 6(1), 110-125.

Gibson, J.J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*, Houghton Mifflin: Boston.

Godfrey, J.J., Syrdal-Lasky, A.K., Millay, K.K., & Knox, C.M. (1981). Performance of dyslexic children on speech tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, 32, 401-424.

Hazan, V., & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6-12. *Journal of Phonetics*, 28, 377-396.

Hoonhorst, I., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., Deltenre, P., & Serniclaes, W. (2009b). French native speakers in the making: from language-general to language-specific voicing boundaries. *Journal of Experimental Child Psychology*, 104(4), 353-366.

Hoonhorst, I., Serniclaes, W., Collet, G., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., & Deltenre, P. (2009a). The acoustic correlates of voicing perception in French. *Clinical Neurophysiology*, 120, 897-903.

Hoonhorst, I., Medina, V., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., Deltenre, P., Serniclaes, W. (en revision). Development of categorical perception: changes in boundary precision across voicing, colors and facial expressions. *Journal of Experimental Child Psychology*.

Jakobson, R., Fant, G., & Halle, M. (1952). *Preliminaries to speech analysis*. Cambridge, MA: MIT Press.

Knudsen, E.I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 1412-1425.

- 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. & Miller, J.D. (1978). Speech perception by the chinchilla: Identification functions for synthetic VOT stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63, 905-917.
- Lasky, R.E., Syrdal-Lasky, A., & Klein, R.E. (1975). VOT discrimination by four to six and a half month old infants from Spanish environment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 20, 215-225.
- Lieberman, A., Cooper, F., Shankweiler, D., & Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological Review*, 74(6), 431-461.
- Lieberman, A., Harris, K., Hoffman, H., & Griffith, B. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54(5), 358-368.
- Lieberman, A., & Mattingly, I. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1), 1-36.
- Lisker, L., & Abramson, A.S. (1964). A cross-language study of voicing in initial stops: acoustical measurements. *Word*, 20, 384-422.
- Malmberg, B. (1954). *La phonétique*. Paris: PUF.
- Marslen-Wilson, W.D. (1987). Functional parallelism in spoken word-recognition. *Cognition*, 25(1-2), 71-102.
- Marslen-Wilson, W.D. (1989). *Lexical Representation and Process*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Marslen-Wilson, W.D. (1990). Activation, competition, and frequency in lexical access. In G.T.M., Altmann (Ed.), *Cognitive Models of Speech Processing: Psycholinguistics and Computational Perspectives* (pp.148-172). Cambridge, MA: MIT Press.
- Masterson J., Hazan V., & Wijayatilake L. (1995). Phonemic processing problems in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 12, 233-259.
- McClelland, J., & Elman, J. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, 18(1), 1-86.
- Mcqueen, J.M., Norris, D.G., & Cutler, A.C. (2001) *Can lexical knowledge modulate prelexical representations over time?*, Proceedings of the workshop on speech recognition as pattern classification, Nijmegen, 11-13th July 2001, 9-14.
- Medina, V., Hoonhorst, I., Bogliotti, C., & Serniclaes, W. (in press). Development of voicing perception in French: Comparing adults, adolescents and children. *Journal of Phonetics*.
- Mehler, J., Jusczyk, P., Lambertz, G., Halsted, N., Bertoncini, J., & Amiel-Tison, C. (1988). A precursor of language acquisition in young infants. *Cognition*, 29, 143-178.

- Miller J.D., Wier, C.C., Pastore, R.E., Kelly, W.J. & Dooling, R.J. (1976). Discrimination and labeling of noise-buzz sequences with varying noise-lead times: an example of categorical perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 60, 410-417.
- 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.
- Morais, J., & Kolinsky, R. (1994). Perception and awareness in phonological processing: the case of the phoneme. *Cognition*, 50(1-3), 287-297.
- Nazzi, T., Bertoncini, J., & Mehler, J. (1998). Language discrimination by newborns: toward an understanding of the role of rhythm. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 24, 756-766.
- Norris, D., McQueen, J., & Cutler, A. (2000). Merging information in speech recognition: feedback is never necessary. *The Behavioral and Brain Sciences*, 23(3), 299-370.
- Perry, C., Ziegler, J., & Zorzi, M. (2010). Beyond single syllables: Large-scale modeling of reading aloud with the Connectionist Dual Process (CDP++) model. *Cognitive Psychology*, 24.
- Querleu, D., Renard, X., & Crepin, G. (1981). Intra-uterine sound and fetal auditory perception. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 165(5), 581-588.
- Ramus, F., Hauser, M. D., Miller, C., Morris, D., & Mehler, J. (2000). Language discrimination by human newborns and by cotton-top tamarin monkeys. *Science*, 288, 349-351.
- Ramus, F., Peperkamp, S., Christophe, A., Jacquemot, C., Kouider, S., & Dupoux, E. (2010). A psycholinguistic perspective on the acquisition of phonology. In C. Fougeron, B. Kühnert, M. d'Imperio & N. Vallée (Eds.), *Laboratory Phonology 10: Variation, Phonetic Detail and Phonological Representation* (pp. 311-340). Berlin: Mouton de Gruyter.
- Reed, M. (1989). Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48(2), 270-292.
- Repp, B.H. (1984). Categorical perception: issues, methods, finding. *Speech and Language: Advances in Basic Research and Practise*, 10, 234-335.
- Rivera-Gaxiola, M., Silva-Peyrera, J., & Kuhl, P.K. (2005). Brain potentials to native and nonnative speech contrasts in 7- and 11-month-old American infants. *Developmental Science*, 8, 162-172.
- Schouten, M.E.H. (1980). The case against a speech mode of perception. *Acta Psychologica*, 44, 71-98.

- Serniclaes, W. (2000). La perception de la parole. In P. Escudier, G. Feng, P. Perrier, J.-L. Schwartz (Eds.), *La parole, des modèles cognitifs aux machines communicantes* (pp. 159-190). Paris: Hermès.
- Serniclaes, W. (in press). Features are phonological transforms of natural boundaries. In N. Clements R. Ridouane (Eds.) *Where do phonological contrasts come from?* Language Faculty and Beyond (LFAB): Internal and External Variation in Linguistics (John Benjamins).
- Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Carré, R., & Démonet, J.F. (2001). Perceptual discrimination of speech sounds in dyslexics. *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*(4), 336-361.
- Serniclaes, W., Ventura, P., Morais, J., & Kolinsky, R. (2005). Categorical perception of speech sounds in illiterate adults. *Cognition, 98*, 35-44.
- Simon, C., & Fourcin, A.J. (1978). Cross-language study of speech-pattern learning. *Journal of the Acoustical Society of America, 63*, 925-935.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2006). *Reading acquisition and developmental dyslexia*. London: Psychology Press.
- Strange, W., & Dittmann, S. (1984). Effects of discrimination training on the perception of /r-/l/ by Japanese adults learning English. *Perception & Psychophysics, 36*(2), 131-45.
- Streeter, L.A. (1976). Language perception of two-month-old infants shows effects of both innate mechanisms and experience. *Nature, 259*, 39-41.
- Vaissière, J. (2006). La phonétique. *Que-Sais-Je? No. 637*, PUF.
- Van Hesson, A.J., & Shouten, M.E.H. (1999). Categorical perception as a function of stimulus quality. *Phonetica, 56*, 56-72.
- Warren, R.M. (1970). Perceptual Restoration of Missing Speech Sounds. *Science, 167*, 392-393.
- Werker, J.F., & Tees, R.C. (1984a). 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. (1984b). Phonemic and phonetic factors in adult cross-language speech perception. *Journal of the Acoustical Society of America, 75*, 1866-1878.
- Zlatin, M.A., & Koeningsknecht, R.A. (1975). Development of the voicing contrast: Perception of stop consonants. *Journal of Speech and Hearing Research, 18*, 541-553.

Chapitre 3. Traitement auditif de la parole, surdité et implant cochléaire

1. Perception auditive

Le son consiste en des variations de pression au cours du temps. Les sons de parole sont des sons complexes et la méthode habituellement utilisée pour les décrire est basée sur le théorème de Fourier. Ce théorème indique que la plupart des sons complexes peut être décomposée en une série de signaux sinusoïdaux. En ajoutant les composants sinusoïdaux, on peut retrouver la forme sonore complexe. Chaque sinusoïde est caractérisée par une fréquence, une amplitude et une phase qui lui est propre. Les composants fréquentiels de chaque sinusoïde sont les harmoniques⁶ et correspondent à un multiple entier de la fréquence fondamentale. Par cette technique analytique, il est possible de décrire tous les sons de parole en termes d'une distribution d'énergie en fréquence et en temps. Une des raisons de représenter les sons de cette façon est que les humains sont capables d'entendre les harmoniques d'un son périodique. Une autre raison est que ce type de traitement est réalisée par le système auditif.

2. Système auditif : anatomie et physiologie

Les sons subissent une série de transformations lorsqu'ils traversent l'oreille externe, l'oreille moyenne, l'oreille interne, le nerf auditif, pour être enfin traités par le cerveau (Loizou, 2002) (Figure 8). L'oreille externe, composée du pavillon et du canal auditif externe, capte les ondes acoustiques et les transmet vers l'oreille moyenne. Les ondes acoustiques sont converties en vibrations mécaniques par les 3 osselets présents dans l'oreille moyenne (le marteau, l'enclume et l'étrier). Les vibrations mécaniques sont ensuite transmises à l'oreille interne, qui contient la cochlée. La cochlée est un long cône enroulée en spirale. La cochlée est composée de la membrane basilaire, tapissée de cellules ciliées qui baignent dans un fluide. Les cellules ciliées sont des cellules sensorielles qui traduisent le mouvement mécanique en stimuli nerveux. Le déplacement de la membrane basilaire et du fluide contenu dans la cochlée cause l'activation des cellules ciliées qui dégagent ainsi une impulsion électrique. Les

⁶ Un harmonique est un élément constitutif d'un phénomène périodique ou vibratoire.

cellules ciliées traduisent les mouvements mécaniques en activité nerveuse. Il y a alors initiation d'un potentiel d'action dans les neurones du nerf auditif. La cochlée est donc le lieu de transduction des informations mécaniques provenant de l'oreille moyenne en stimulation électrique. Ces impulsions électriques vont stimuler le nerf auditif qui communique avec le système nerveux central et transmet le signal acoustique au cerveau.

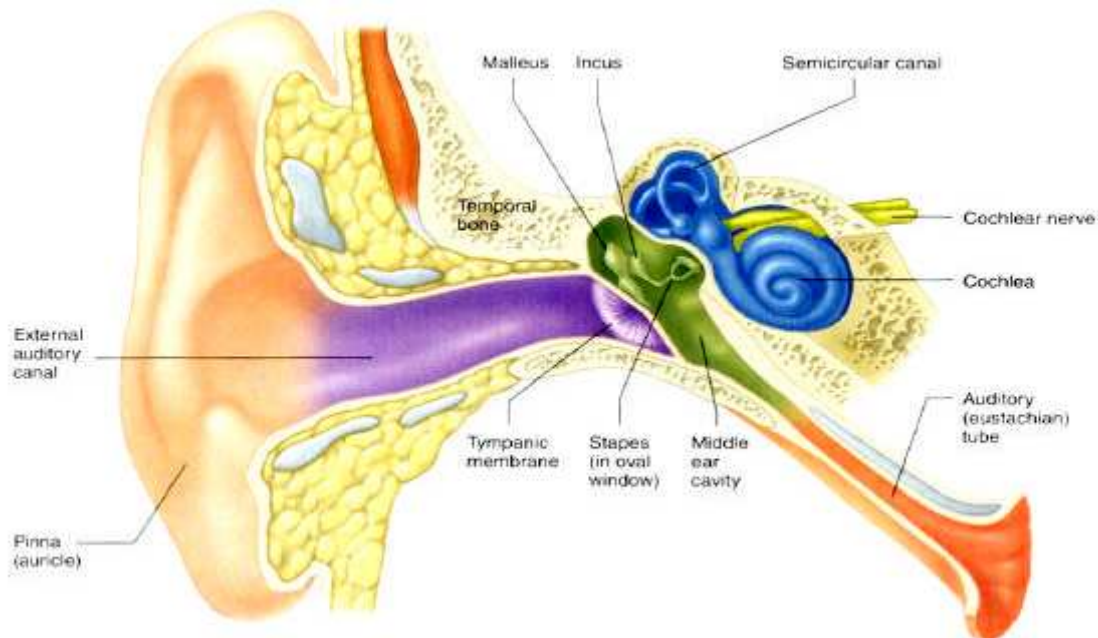


Figure 8. Anatomie de l'oreille humaine. La couleur violette représente l'oreille externe, la couleur verte, l'oreille moyenne et la couleur bleue, l'oreille interne (Vander, Sherman, & Luciano, 2001).

2.1. Physiologie de la cochlée

La cochlée est caractérisée par une sélectivité fréquentielle fine. Les sons entrant dans la cochlée créent une variation de pression sur la membrane basilaire, induisant ainsi la mise en mouvement de la membrane basilaire et des cellules ciliées. La réponse de la membrane basilaire aux sons de différentes fréquences, qui varie de la base à l'apex, est fortement affectée par ses propriétés mécaniques. La base et l'apex représentent les deux extrémités de la membrane basilaire. La base est relativement étroite et rigide, alors que l'apex est large et souple (von Békésy, 1960) (Figure 9). Il en résulte que la position du pic du pattern de vibration de la membrane basilaire varie en fonction de la fréquence de stimulation.

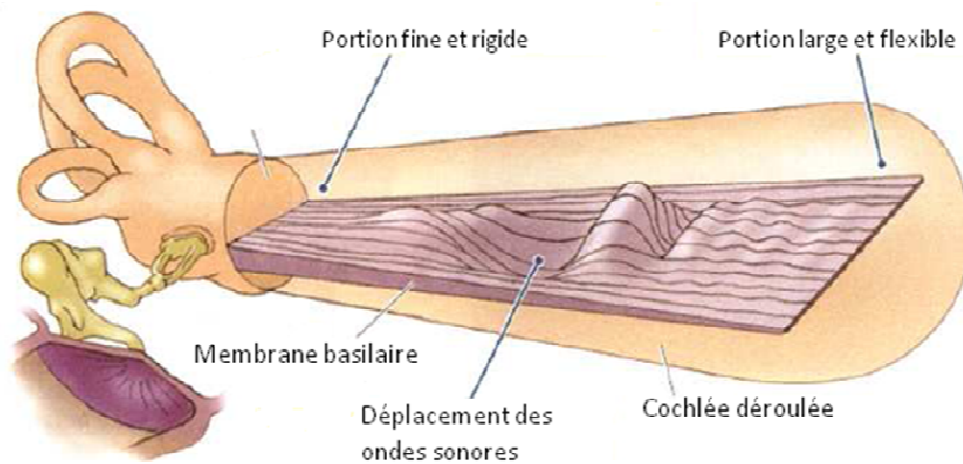


Figure 9. Présentation d'une cochlée déroulée (Kolb et Whishaw, 2002)

Les sons de hautes fréquences produisent un maximum de déplacement de la membrane à la base, ainsi que peu de mouvement sur le reste de la membrane. Les sons de basses fréquences produisent un pattern de vibration qui s'étend tout au long de la membrane basilaire, mais qui atteint un maximum au niveau de l'apex. On parle alors d'une organisation tonotopique (Figure 10a), ce qui signifie que la cochlée est caractérisée par un codage place-fréquence. La cochlée et ses constituants fonctionnent comme un analyseur de fréquence puisque la parole est décomposée en plusieurs bandes fréquentielles. La Figure 10b illustre que les sons de différentes fréquences produisent un déplacement maximum sur différents lieux le long de la membrane basilaire. Cette figure montre les enveloppes de différents patterns de vibration pour des sinusoïdes de fréquences différentes (inspiré de Von Békésy, 1960). En effet, la cochlée présente un comportement similaire à l'analyse de Fourier, bien que moins précise sur l'analyse fréquentielle. La fréquence qui implique une réponse maximale à un point particulier de la membrane basilaire est connue comme étant la fréquence caractéristique de ce point.

Ainsi, la membrane résonne avec des hautes fréquences à la base, et avec des fréquences progressivement plus basses en direction de l'apex. Avec ce mécanisme, la cochlée humaine fournit un filtre de 10 rangs d'octaves et traite les sons complexes par une décomposition fréquentielle.

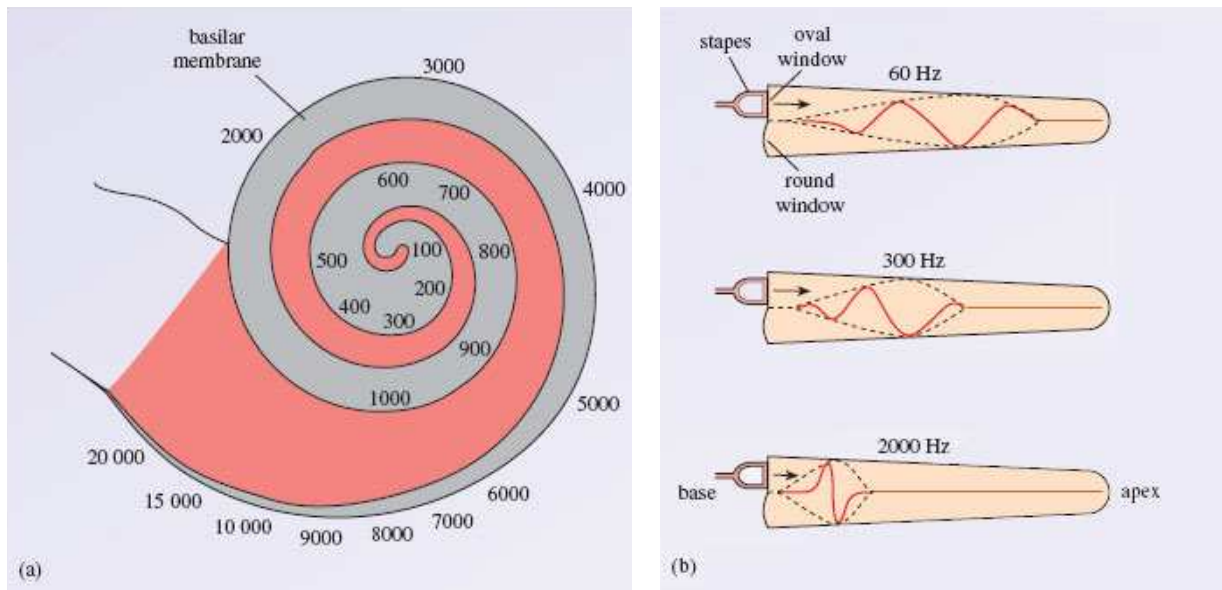


Figure 10. (a) Correspondance tonotopique entre la position sur la cochlée et la fréquence caractéristique. La réponse de la membrane basilaire dépend de la fréquence du son. (b) Une représentation schématique de la cochlée et des enveloppes de différents patterns de vibration correspondant à des sinusoides de fréquences différentes (Kolb et Whishaw, 2002).

2.2. Réponses nerveuses du nerf auditif

Environ 30000 neurones dans chaque nerf auditif transportent l'information de la cochlée au système nerveux central. Les réponses nerveuses semblent être influencées par 3 phénomènes. Premièrement, les fibres montrent une autostimulation spontanée (ou environnementale) en l'absence de stimulation sonore. Deuxièmement, les fibres répondent mieux à certaines fréquences qu'à d'autres ; elles montrent une sélectivité fréquentielle. Troisièmement, les fibres répondent à un mécanisme de verrouillage en phase (phase-locking). Le mécanisme de verrouillage en phase correspond au pattern temporel des décharges dans les fibres du nerf auditif et représente la modulation du potentiel d'activation des cellules ciliées (e.g. Johnson et Kiang, 1976). La déflexion des cellules ciliées, produit par le mouvement de la membrane basilaire, fournit une excitation neuronale. Aucune excitation ne se produit quand la membrane basilaire bouge dans la direction opposée puisque les parties négatives du signal génèrent une hyperpolarisation des cellules ciliées (Ruggero, Robles, et Rich, 1986). A cause de l'absence de décharge pendant l'hyperpolarisation, le signal est modulé par des « trous », des absences de stimulation. Ce phénomène correspond au mécanisme de verrouillage en phase. L'autostimulation spontanée, la sélectivité fréquentielle et le verrouillage en phase sont donc des processus qui influencent la transmission des indices spectraux et temporels du signal de parole.

2.3. *Traitement spectro-temporel dans le système auditif*

Le système auditif est traditionnellement conçu comme un analyseur de fréquence (Ohm, 1843; Von Helmholtz, 1863), avec une capacité limitée (Plomp, 1964), fournissant une représentation fidèle des propriétés spectro-temporelles du signal acoustique. La parole est décomposée par la cochlée en plusieurs bandes de signal à bande passante étroite. Sa décomposition fréquentielle permet d'obtenir une représentation spectrale, indiquant la répartition de l'énergie du signal dans un grand nombre de bandes fréquentielles. Les informations spectrales du signal de parole sont codées par leur emplacement sur la cochlée.

Le système auditif fournit non seulement des informations fréquentiels au système nerveux central, mais également des informations temporelles. De nombreuses études (*e.g.*, Johnson et Kiang, 1976) ont par exemple démontré que les potentiels d'action dans des fibres du nerf auditif surviennent préférentiellement lors d'une phase particulière du signal. Les paragraphes suivants décrivent les aspects temporels de la perception des sons. Les informations temporelles correspondent à une dimension importante dans l'audition, puisque la plupart des sons varient au cours du temps. Par exemple, pour les sons de parole, la plupart des informations semble être portée par les variations temporelles, plutôt que par les parties relativement stables du son. Le système auditif traite la résolution temporelle du signal qui se réfère à l'habileté à détecter un changement dans le stimulus au cours du temps, par exemple, un bref trou entre deux stimuli, ou à détecter qu'un son est modulé d'une certaine façon. La résolution temporelle dépend principalement d'un processus : l'analyse des patterns temporels qui s'effectue à l'intérieur de chaque bande de fréquence.

Les informations temporelles présentes dans chaque bande de signal peuvent être de différentes formes. Dudley (1940) a distingué la porteuse (composée de modulations de phase (PM) et de modulations de fréquence (FM)), des modulations d'amplitude de la porteuse au cours du temps (AM). Les modulations de phases peuvent être codées par le mécanisme de « verrouillage en phase ». Les modulations d'amplitude peuvent également être codées par un mécanisme de verrouillage en phase, ainsi que par des variations du taux de décharges des fibres du nerf auditif (*e.g.*, Joris, Schreiner, et Rees, 2004). La porteuse correspond à l'information temporelle la plus rapide alors que les modulations d'amplitude (AM) de la porteuse dans le temps correspondent aux informations temporelles les plus lentes. Ces deux structures temporelles (porteuse et modulations d'amplitude) correspondent respectivement aux concepts de structure temporelle fine (TFS : temporal fine structure) et d'enveloppe temporelle (E). Les stimuli linguistiques d'E et de TFS sont représentés dans la figure 11.

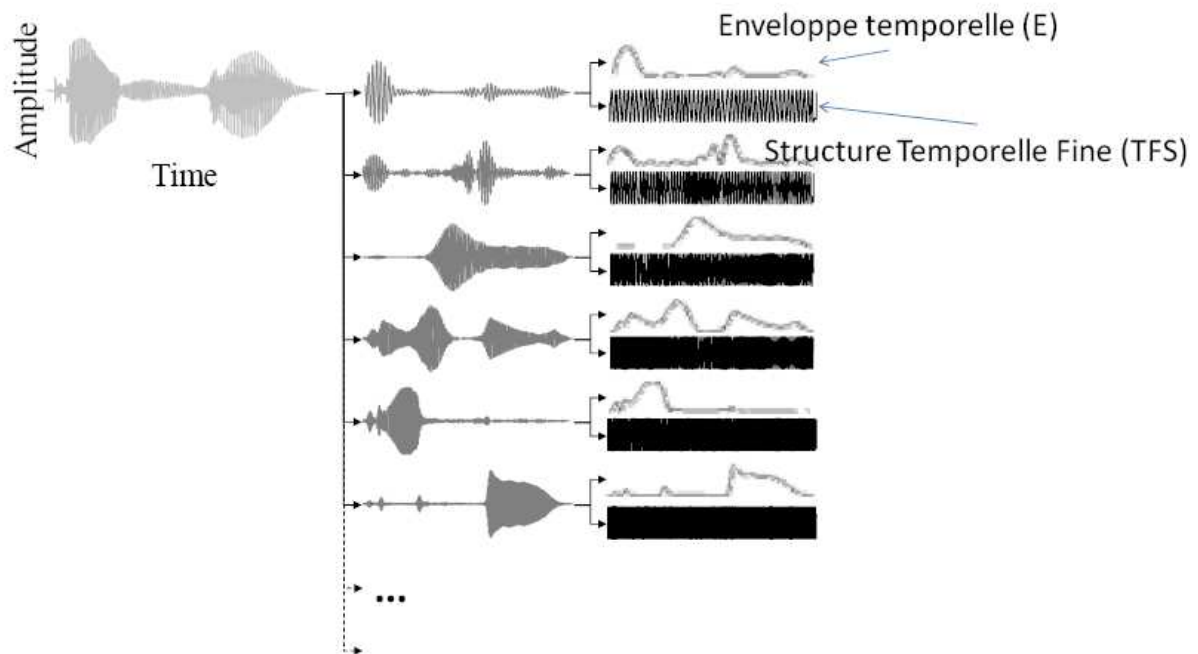


Figure 11. Représentation schématique de la décomposition d'un signal de parole /aba/ par le système auditif périphérique. Le signal de parole est décomposé en différentes bandes fréquentielles (ici 6). Chaque signal à bande passante étroite peut être décomposé comme le produit d'une enveloppe temporelle (E) et d'une structure temporelle fine (TFS). (Figure reproduite avec l'autorisation de Marine Ardoint).

3. Description acoustique du signal de parole

La question qui se pose est de savoir comment des patterns acoustiques complexes, composés d'informations spectrales et temporelles, sont interprétés par le cerveau comme étant des signaux de parole. Bien que de nombreuses recherches aient été menées ces cinquante dernières années, les traitements acoustiques impliqués dans la perception des sons de parole ne sont pas encore bien déterminés. Un point est cependant clair : la perception de la parole ne dépend pas de l'extraction de patterns acoustiques invariants spécifiques à chaque son de parole (Lieberman, Cooper, Shankweiler, et Studdert-Kennedy, 1967). Par conséquent, les patterns acoustiques n'ont pas de correspondances uniques avec les phonèmes. Pour comprendre les représentations acoustiques des sons de parole, il est nécessaire de considérer ce qui les définit.

Les sons de parole sont produits par l'appareil phonatoire. Les spécificités articulatoires de chaque phonème permettent de les classer. Comme défini dans le chapitre 2, on peut considérer qu'il existe 4 traits articulatoires caractéristiques des consonnes du français: le mode d'articulation, le voisement, le lieu d'articulation et la nasalité ; ainsi que 3 traits articulatoires caractéristiques des voyelles en français : la nasalité, l'aperture et

l'antériorité. Les paragraphes suivants présentent une description de la relation entre les caractéristiques acoustiques et articulatoires de la parole d'après les recherches menées par Fant (1970), Pickett (1980), Rosen (1992), Calliope (1989), et Vaissière (2006).

Les indices acoustiques constituent le premier niveau de l'analyse phonétique : le substrat physique de la parole. La figure 12 représente les spectrogrammes des mots « bar », « par », « dard » et « tard ». Un spectrogramme est une représentation graphique des indices acoustiques de la parole. La dimension temporelle est représentée en abscisse, la dimension spectrale en ordonnée et la noirceur du tracé rend compte de la répartition de l'intensité sonore. Sur la figure 11, on peut observer plusieurs de ces indices :

- Les formants (dont les valeurs centrales sont surlignées en jaune) sont des bandes de fréquence qui, par résonance, sont amplifiées lors du passage du son dans les cavités pharyngales (Formant 1 ou F1), buccales (F2) et labiales (F3) (pour une vision plus complète des relations entre formants et cavités, voir Rothenberg, 1981). Les transitions de formants désignent les changements de fréquence entre configurations articulatoires successives, comme par exemple celles des consonnes et des voyelles. On parle de locus du formant pour indiquer le point d'origine de la transition du formant.
- La barre d'explosion (en vert) correspond au relâchement de l'air bloqué dans le conduit vocal lors de l'occlusion de la consonne.
- La barre de voisement (en rouge) est une bande d'énergie périodique engendrée par la vibration des cordes vocales durant l'occlusion de la consonne.
- L'intervalle de temps entre ces deux derniers événements (barre d'explosion et barre de voisement) correspond au Délai d'Etablissement du Voisement (DEV) ou Voice Onset Time (VOT). Lisker et Abramson (1964) ont défini cet indice comme le délai entre le relâchement de l'occlusion (signalé par la barre verticale surlignée en vert) et le début de la vibration des cordes vocales (signalé par le début des stries périodiques, cerclées en rouge). Le VOT est négatif lorsque la vibration des cordes vocales commence avant le relâchement de l'occlusion et positif lorsqu'elle intervient après.

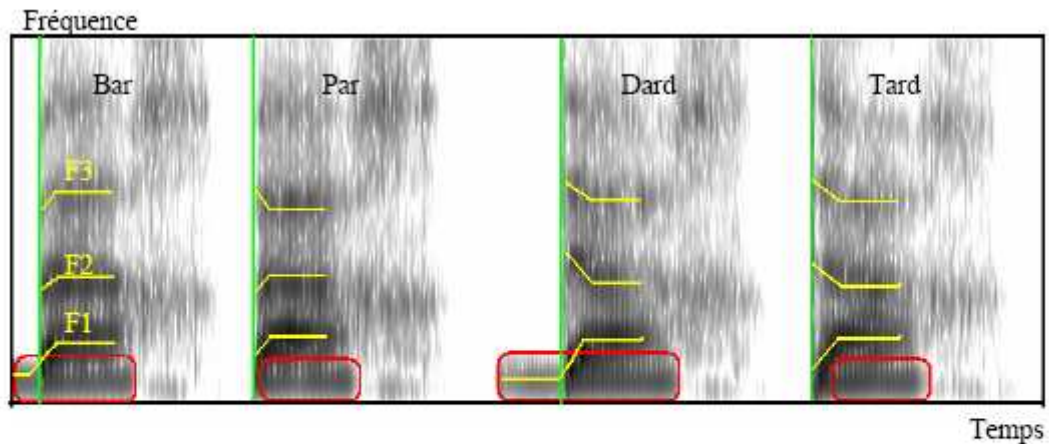


Figure 12: Spectrogrammes des mots « bar », « par », « dard », et « tard » produits par un même sujet. Les barres de voisement sont entourées en rouge ; les barres d’explosion sont représentées par les barres verticales vertes ; les formants sont en jaune. Reproduit avec l’autorisation de Ingrid Hoonhorst.

A chaque trait correspond deux types d’indices acoustiques : « temporels », ceux transmis par l’Enveloppe, et « spectraux », ceux transmis par la TFS.

Les voyelles

Pour les voyelles, les indices sont essentiellement spectraux.

Le spectre des harmoniques est modifié par le conduit vocal qui agit comme un filtre complexe, introduisant une résonance (les formants) à certaines fréquences. Le formant le plus bas est appelé le premier formant (F1), le suivant est le second formant (F2) et ainsi de suite. Les formants des voyelles sont relativement stables au cours du temps. Les voyelles sont donc des signaux de parole facile à décrire. La figure 13 décrit la forme du conduit vocal lors de la prononciation des voyelles /i/, /a/ et /u/, ainsi que les spectres de fréquences associés à ces voyelles. On observe que la structure des formants permet de distinguer les voyelles.

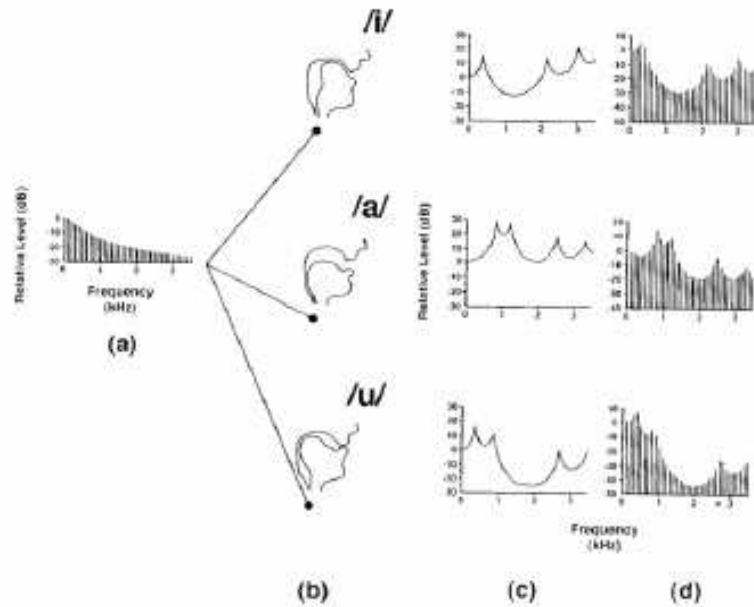


Figure 13. Illustration de la production de trois voyelles /i/, /a/, et /u/. (a) Spectre du son complexe harmonique produit par la mise en vibration des cordes vocales. (b) Représentation schématique de la forme et des constriction du conduit vocal pendant la prononciation de chacune des trois voyelles. (c) Fonctions de transfert des « filtres » déterminés par les trois différentes configurations du conduit vocal. (d) Spectres de puissance des voyelles obtenus en passant le signal résultant de la vibration des cordes vocales et représenté en (a) par les trois filtres dont les fonctions de transfert sont représentées en (c). Reproduit de Rosen (1992).

Les recherches ont également montré que l'antériorité est principalement définie par les deuxième et troisième formants (F2 et F3), l'aperture par le premier formant (F1), et la nasalité par les antiformants, la base spéciale de F1 (le F1 oral est plus élevé que le F1 nasal).

Les consonnes

La production du trait de voisement repose dans la majorité des langues sur la relation temporelle entre le début des vibrations laryngées et le relâchement de l'occlusion (explosion), ou *timing laryngé*, dont le corrélat acoustique le plus direct est le délai d'établissement du voisement (VOT, Voice Onset Time) (Lisker & Abramson, 1964). Si le VOT, indice temporel, joue un rôle majeur de la perception du voisement, une série d'indices acoustiques spectraux contribue également mais de manière secondaire à sa perception (Delattre, 1958 ; 1968 ; Wajskop & Sweerts, 1973 ; Lisker, 1978 ; 1985). Pour prendre l'exemple du français, Wajskop et Sweerts (1973) relèvent un autre indice principal qui contribue à une perception invariante du trait de voisement dans les différents contextes phonétiques : la durée de transition du premier formant de la voyelle dans un contexte [voyelle + consonne].

Le trait de mode d'articulation est principalement caractérisé par deux indices temporels : la durée du segment du bruit qui est plus long pour les fricatives que pour les occlusives ainsi que par la durée des transitions formantiques.

Le trait de lieu d'articulation est principalement caractérisé par deux indices temporels : la répartition de l'énergie dans le spectre du bruit de friction ou d'explosion ainsi que la direction des transitions formantiques (F1 et F2).

Le trait de nasalité est défini par des indices spectraux complexes (formants et antifformants) générés par le passage de l'air dans les fosses nasales.

En résumé

Les signaux de TFS et d'E transmettent des informations acoustiques spécifiques aux traits phonologiques. Le tableau 3 décrit les signaux d'E et de TFS pertinents pour chaque trait phonologique.

	Signaux d'enveloppe temporelle	Signaux de structure temporelle fine
Voisement	X	x
Mode d'articulation	X	
Lieu d'articulation		X
Nasalité		X
Traits articulatoires des voyelles		X

Tableau 3. Illustration schématique de la représentation des différents traits articulatoires par les indices de structure d'enveloppe temporelle et de structure temporelle fine. La taille des croix symbolise la qualité de la représentation du trait articulatoire par la structure considérée.

De même, on peut considérer que les signaux temporels et spectraux transmettent des informations phonétiques essentielles à la perception de la parole. Le tableau 4 décrit les signaux temporels et spectraux nécessaires à la perception de chaque trait articulatoire.

	Indices temporels	Indices spectraux
Voisement	X	X
Mode d'articulation	X	
Lieu d'articulation	x	X
Nasalité	X	
Traits articulatoires des voyelles		X

Tableau 4. Illustration schématique de la représentation des différents traits articulatoires par les indices de structures temporelles et spectrales. La taille des croix symbolise la qualité de la représentation du trait articulatoire par la structure considérée.

Alors que l'Enveloppe fournit principalement des informations sur le mode d'articulation et le voisement des consonnes, la TFS fournit principalement des informations sur le lieu d'articulation des consonnes, la nasalité des consonnes et des voyelles, l'antériorité et l'aperture des voyelles.

En conclusion, les traits sont caractérisés par des indices acoustiques spécifiques, majoritairement temporels ou spectraux selon le trait. L'oreille a la capacité de réaliser des analyses spectro-temporels du signal de parole et les représentations spectrales et temporelles permettent de décrire les traits phonologiques. Néanmoins, dans le cas de la surdité, ces traitements ne sont plus réalisés et cela peut empêcher une perception acoustico-phonétique précise. La partie suivante décrit les différents types de surdité et leur impact sur la perception de la parole. Dans cette perspective, une justification du rôle de l'implant cochléaire comme outil de réhabilitation⁷ de l'audition et une description du fonctionnement de l'implant cochléaire sont proposées.

4. Pathologie de l'audition

4.1. Différents types de surdité

Selon Mondain, Blanchet, Venail, et Vieu (2005), il existe différents types de surdité. Les classifications tiennent principalement compte de trois critères majeurs que sont le caractère uni- ou bilatéral, le degré de la perte auditive, et le mécanisme de l'atteinte. Les surdités unilatérales ont peu d'impact sur le développement du langage oral et sur la communication de l'enfant. A l'inverse, les surdités bilatérales vont, en fonction du degré de perte auditive, perturber plus ou moins fortement le développement du langage oral et la

⁷ Le terme « réhabilitation » est utilisé dans le sens défini par Kamen (1972) : « Restauration d'un malade ou d'un handicapé à un mode de vie et d'activité le plus proche possible de la normale ».

communication de l'enfant. Une surdité de transmission est liée à une atteinte de l'oreille externe ou de l'oreille moyenne. Elle ne dépasse pas 60 dB de perte auditive et ne provoque pas de distorsion acoustique. L'enfant bénéficie alors d'un bon développement langagier oral (Leybaert, Schepers, Renglet, Simon, Serniclaes, Deltenre, Marquet, Mansbach, Périer, Ligny, 2005). Dans d'autres cas, la surdité est qualifiée de perception. Les surdités de perception sont d'origine cochléaire. Elles traduisent une atteinte des cellules ciliées et/ou du nerf auditif. Dans ces cas, la transduction du message acoustique ne se fait plus dans la zone lésée. On parle alors de zone morte. Un stimulus dont la fréquence correspond à la région de la cochlée atteinte ne peut donc être perçu que dans une région voisine. Or plus la fréquence caractéristique de cette région utile est éloignée de la fréquence du stimulus moins les mécanismes actifs agissent. Les recherches ont montré que la cause la plus commune de la surdité est une surdité de perception caractérisée par la perte des cellules ciliées et non la perte de neurones auditifs. Ce résultat est encourageant pour la mise en place de l'implant cochléaire puisqu'il est nécessaire que le nerf auditif soit préservé pour recevoir la stimulation électrique fourni par l'implant.

Pour exprimer le degré de surdité d'un malentendant, le Bureau International d'Audio-Phonologie (BIAP) a établi une classification en fonction du seuil de perception audiométrique. Cette classification est présentée dans le tableau 5. Elle se base sur la moyenne des pertes aux fréquences 500Hz, 1000Hz, 2000Hz et 4000Hz. Si l'oreille ne perçoit pas une certaine fréquence, on note que la perte auditive équivaut à 120 dB. Pour une perte moyenne de 120 dB, on considère donc qu'aucun son n'est perçu.

Seuil moyen	Classification	Effets
0-20 dB HL	Audition normale ou subnormale	Eventuellement atteinte tonale légère sans incidence sociale
21-40 dB HL	Surdité légère	La parole est perçue à intensité normale mais difficilement perçue à voix basse ou lointaine. La plupart des bruits environnementaux sont perçus
41-55 dB HL 56-70 dB HL	Surdité moyenne (1 ^{er} degré) (2 ^{ème} degré)	La parole est perçue si on élève la voix. La lecture labiale est essentielle pour percevoir la parole. Quelques bruits environnementaux sont encore perçus
71-80 dB HL 81-90 dB HL	Surdité sévère (1 ^{er} degré) (2 ^{ème} degré)	La parole est perçue lorsque l'intensité de la voix est forte. Seuls les bruits environnementaux forts sont perçus
> 90 dB HL	Surdité profonde	La parole n'est pas perçue. Seuls les bruits environnementaux d'intensité très élevés sont perçus.

Tableau 5. Tableau de classification audiométrique

Enfin, le déficit auditif peut être catégorisé selon un dernier critère, l'âge d'entrée dans la surdité. La surdité peut-être congénitale, et donc être présente dès la naissance, ou apparaître à un âge plus tardif. Elle est dite *congénitale* si elle survient à la naissance,

prélinguale si elle apparaît avant l'âge de deux ans, *pérlinguale* si elle se manifeste entre deux et six ans, et *postlinguale* si elle débute après l'âge de six ans (Arlinger, 2006).

4.2. Prévalence de la surdité

Concernant la prévalence des différents degrés de surdité, l'étude de Fortnum, Marshall, et Summerfield (2002) au Royaume-Uni est la plus complète. Parmi 17160 enfants sourds de 3 à 18 ans, les degrés de surdité sont répartis ainsi : 53% de surdité moyenne, 21% de surdité sévère et 25% de surdité profonde. En Australie, parmi une cohorte de 134 enfants appareillés entre 0 et 6 ans, la répartition des degrés de surdité est la suivante : 40% de surdité légère, 31% de surdité moyenne, 15% de surdité sévère et 8% de surdité profonde (Russ, Poulakis, Barber, Wake, Rickards, et al., 2003). En France, la prévalence de la surdité est estimée entre 0,49 et 0,8 pour mille naissances (Avan et al., 2006). Les enfants participant à ce travail de thèse présente une surdité congénitale profonde et les études de prévalence aux Etats-Unis réalisées sur ce type de surdité indiquent qu'elle concerne entre 1 et 2,2 enfants sur 1000 naissances (Avan et al., 2006). Au Royaume-Uni, environ 80% des enfants qui reçoivent un implant cochléaire présentent une surdité congénitale (Fortnum et al., 2002). Enfin, en Suède, on considère qu'un peu moins d'un enfant pour 1000 bénéficie d'un implant cochléaire (Socialstyrelsen, 2009).

4.3. Population concernée par l'implantation cochléaire

Toutes les personnes sourdes ne peuvent pas être implantées et celles qui sollicitent l'implantation de ce dispositif doivent nécessairement satisfaire certains critères. Une conférence internationale en 1995 (Haensel, Engelke, Ottenjann, Westhofen, 2005) a défini ces critères : 1) la perte auditive, résultant d'une surdité de perception, doit être bilatérale ainsi que sévère ou profonde. En France, les personnes concernées par l'implant cochléaire présentent une surdité profonde. 2) les bénéficiaires d'une aide auditive conventionnelle doivent être insuffisants (Miyamoto, Osberger, Todd, Robbins, Stroer, Zimmerman-Phillips et Carney, 1994). 3) l'enfant doit être âgé d'au moins 9 mois aux Etats-Unis ou en Allemagne, et d'au moins 12 mois en France (Houston, Pisoni, Kirk, Ting et Miyamoto, 2003, Geers, 2004).

L'enjeu des outils de réhabilitation de la surdité est de permettre aux personnes sourdes d'accéder à un système langagier. L'implant cochléaire est une des techniques qui permet aux personnes sourdes de percevoir la parole.

4.4. Une prothèse particulière, l'implant cochléaire

Le principe de l'implant cochléaire est de générer une perception auditive en stimulant électriquement le nerf cochléaire. L'implant agit comme un transducteur qui transforme le signal acoustique en signal électrique. Dans le cas des surdités de perception caractérisées par une perte des cellules ciliées, le processus de traduction des informations mécaniques en stimulations électriques ne s'opère plus correctement. La question est donc de savoir comment stimuler électriquement les neurones du nerf auditif afin de transmettre au cerveau des informations adéquates sur l'amplitude et la fréquence du signal acoustique.

4.4.1. Constitution d'un implant cochléaire

L'implant cochléaire se compose de deux parties, l'une interne, l'autre externe (les numéros entre parenthèses font référence à la figure 14).

La partie externe comprend :

- un petit microphone qui capte les sons de l'environnement (7),
- un processeur vocal qui réalise le codage des sons en impulsions électriques (6),

La partie interne comprend :

- un récepteur sous cutané (1) qui reçoit le signal électrique mis en forme par le processeur vocal. La transmission transcutanée s'établit par couplage électromagnétique,
- un faisceau de 12 à 24 électrodes (4) inséré dans la rampe tympanique de la cochlée (2). Il exploite les mécanismes de codage place-fréquence, caractéristique de la cochlée. Les électrodes stimulent directement les afférences du nerf cochléaire (3).

L'efficacité de l'implantation dépend donc directement de la persistance de fibres nerveuses auditives fonctionnelles.

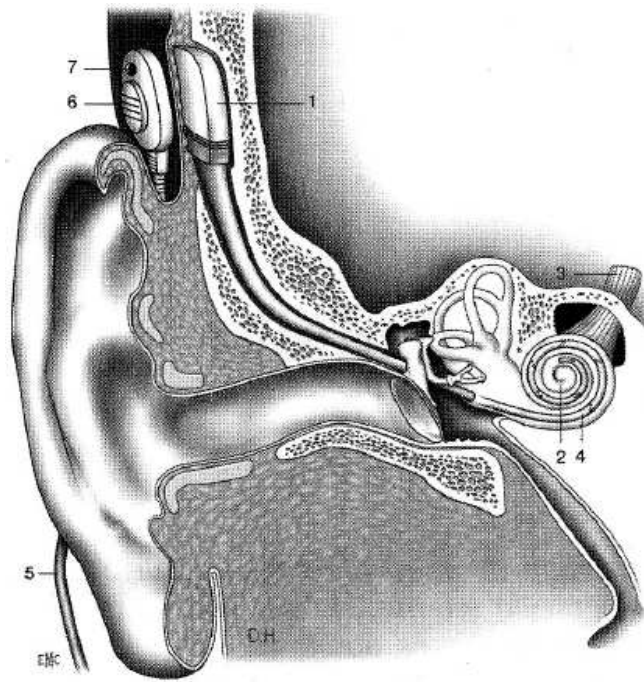


Figure 14. Les composants d'un implant cochléaire.

La mise en place de ce dispositif nécessite un acte chirurgical, une cochléostomie (pour une description voir Parisier, Chute, Lopp et Hanson, 1997), qui permet l'insertion du porte-électrodes.

Afin de réhabiliter le traitement auditif, l'implant cochléaire fonctionne selon une technique bien codifiée (Mondain et al., 2005). Dans un premier temps, le microphone capte les informations sonores et les transmet au boîtier contenant le processeur vocal qui transforme l'énergie acoustique en énergie électrique et remplace ainsi les cellules ciliées défectueuses (Pisoni, 2005). Ensuite, le processeur vocal envoie cette information, via l'antenne émettrice, à la partie interne de l'oreille. Les fibres nerveuses auditives sont alors stimulées et les potentiels d'action qui en résultent sont transmis jusqu'au cerveau qui les interprète comme des sons (Loizou, 2002, Pisoni, 2005). Une étude récente indique que la moitié de la population neuronale survit même en cas de surdité profonde, ce qui permettrait la mise en œuvre de ce dispositif (Niparko, 2004).

4.4.2. *Fonctionnement de l'implant cochléaire et traitement impliqué*

Dans les implants, un faisceau d'électrodes est inséré dans la cochlée, ce qui permet aux fibres du nerf auditif d'être stimulées à différentes localisations, exploitant ainsi le mécanisme de codage place-fréquence de la cochlée. Différentes électrodes sont stimulées en fonction de la fréquence du signal. Les électrodes proches de la base de la cochlée sont

stimulées lorsque le signal est de haute fréquence, alors que les électrodes proches de l'apex sont stimulées avec un signal de basse fréquence. Au préalable, le processeur décompose le signal en différentes bandes de fréquences et délivre ce signal filtré aux électrodes appropriées. Le signal filtré est composé de l'E des signaux présents au sein de différents canaux fréquentiels. La principale fonction du processeur est donc de décomposer le signal en composants fréquentiels, un peu comme une cochlée en bonne santé le fait. Les implants actuels décomposent le signal auditif en 12 à 24 bandes de fréquences puisque les implants comptent de 12 à 24 électrodes. Les designers de l'implant cochléaire ont eu pour objectif de développer une technique de traitement du signal qui imite le fonctionnement de la cochlée en bonne santé. Plus précisément, l'implant cochléaire imite le pattern de stimulation tonotopique de la cochlée en stimulant des électrodes selon un pattern lieu-fréquence. Le traitement du signal par l'implant cochléaire permet donc de transmettre des informations spectrales et des informations temporelles.

L'implant cochléaire est basé sur le principe qu'il y a suffisamment de fibres auditives pour recevoir la stimulation provenant des électrodes. Lorsque les fibres nerveuses sont stimulées, elles propagent l'impulsion nerveuse au cerveau. Le cerveau interprète ces impulsions comme des sons. L'intensité sonore perçue peut dépendre du nombre de fibres nerveuses activées et de leur fréquence de stimulation. Si un grand nombre de fibres nerveuses est activé, alors le son est perçu comme fort. Le nombre de fibres activées est donc dépendant de l'amplitude du courant stimulateur. La fréquence perçue par le cerveau est reliée au lieu de stimulation dans la cochlée. Une sensation de basse fréquence est perçue lorsque ce sont les électrodes proches de l'apex qui sont stimulées, alors qu'une sensation de haute fréquence est perçue lorsque ce sont les électrodes proches de la base qui sont stimulées. Le lieu de stimulation de la cochlée dépend de la localisation des électrodes le long de la membrane basilaire et donc de la profondeur d'insertion du porte-électrode dans la cochlée, celle-ci variant en fonction de facteurs technologiques, liés au type d'implant, et anatomiques, liés au patient. Une insertion plus profonde favorise la réponse neurale aux basses fréquences. Par conséquent, l'implant transmet l'information au cerveau sur l'intensité du son, qui est fonction de l'amplitude de stimulation du courant, et la fréquence du son, qui est fonction du lieu de stimulation de la cochlée.

Le nombre d'électrodes actives et leur espacement le long de la membrane basilaire affecte la résolution en fréquences. Une explication pertinente de la limitation de la perception de la parole avec implant cochléaire est le nombre limité de bandes indépendantes puisqu'il correspond au nombre d'électrodes. Le nombre d'électrodes qui s'activent simultanément est

inférieur à celui des cellules ciliées dans une oreille ordinaire, et est habituellement inférieur à 8 (Lawson, Wilson, Zerbi, et Finley, 1996; Fishman, Shannon, et Slattery, 1997; Wilson, 1997; Kiefer, von Ilberg, Rupprecht, Hubner-Egner, et Knecht, 2000; Friesen, Shannon, Baskent, et Wang, 2001; Garnham, O'Driscoll, Ramsden, et Saeed, 2002). Une autre explication est le manque relatif d'isolation entre les électrodes qui induit par conséquent que les stimulations fournies par les électrodes se chevauchent (e.g., Fu and Nogaki, 2004; Dorman and Spahr, 2006). A nombre d'électrodes égal, la résolution diminuera en fonction de la diffusion de l'excitation électrique autour de chaque électrode. Par conséquent, le codage place-fréquence est limité en raison du petit nombre d'électrodes et de l'isolation limitée entre elles (e.g., Fu and Nogaki, 2004; Dorman and Spahr, 2006).

Des solutions ont été apportées et permettent d'améliorer ces limites. Une stimulation pulsatile est utilisée. Elle consiste à transformer l'onde analogue continue en pulsations discrètes dont l'amplitude ou la durée selon le type d'implant, sont proportionnelles à l'amplitude de l'onde filtrée. L'avantage de ce type de stimulation est de permettre l'excitation non simultanée des électrodes et de minimiser leurs interactions.

Une dernière limite associée à l'implant concerne la transmission des informations temporelles. A l'intérieur d'un implant, la forme temporelle du signal est extraite par le processeur. Plus précisément, le processeur extrait les signaux d'enveloppe de chaque bande de fréquence et les transmet aux électrodes. Néanmoins, le processeur n'est pas capable d'extraire les signaux de structure temporelle fine. D'après les études de Smith, Delgutte, et Oxenham (2002) et de Xu et Pfingst (2003), il est cependant possible qu'une petite quantité de structure fine soit transmise par les stratégies basées sur l'enveloppe. La plupart des études ont indiqué que peu ou pas de structure fine est transmise par les stratégies basées sur l'enveloppe lorsque seulement l'enveloppe est présentée (e.g. Nie, Stickney, et Zeng, 2005 ; Wilson, Schatzer, Lopez-Poveda, Sun, Lawson, et Wolford, 2005 ; Zeng, Nie, Stickney, Kong, Vongphoe, Bhargave, Wei, et Cao, 2005 ; Hochmair, Nopp, Jolly, Schmidt, Schösser, Garnham, et Anderson, 2006 ; Arnoldner, Riss, Brunner, Baumgartner, et Hamzavi, 2007 ; Bonham et Litvak, 2008). Ces recherches ignorent le fait que l'information temporelle est présentée dans les ondes supérieures à 200-400Hz ou plus élevées, et ignorent le fait que les signaux d'électrodes peuvent bien transmettre l'information de structure fine à de plus hautes fréquences, spécialement si les chevauchements de filtres sont conçus de manière appropriée.

4.4.3. Facteurs associés à la réussite de la mise en place de l'implant

Un certain nombre de facteurs introduisent une grande variabilité dans les performances de perception et de compréhension de la parole (Gantz, Woodworth, Abbas, Knutson, Tyler, 1993, Summerfield & Marshall, 1995, Ouellet et Cohen, 1999, Loizou, 2002). Selon Miyamoto, Osberger, Todd, Robbins, Stroer, Zimmerman-Philips, et Carney (1994), ces facteurs et plus précisément l'âge d'entrée dans la surdité, la durée de la surdité, l'âge d'implantation, la durée d'utilisation de l'implant cochléaire, le mode de communication (oral, Langue Parlée Complétée, Langue des Signes, communication totale) et le type d'appareil justifient environ 40% de la variance aux tests de reconnaissance de mots parlés ou de phonèmes. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces facteurs pour comprendre le développement du langage chez les enfants sourds bénéficiant d'un implant cochléaire.

Age d'entrée dans la surdité, âge d'implantation, durée de la surdité et plasticité cérébrale

L'âge de l'entrée dans la surdité semble avoir un impact majeur sur la réussite de la mise en place de l'implant cochléaire. Selon Mondain et al. (2005), l'absence de son durant les premiers mois de vie affecte le développement neurobiologique de la voie auditive périphérique ainsi que des aires corticales. Osberger, Miyamoto, Zimmerman-Phillips, Kemink, Stroer, Firszt, Novak (1991) mettent en évidence que les enfants implantés affectés par la surdité après leur 5^{ème} année présentent de meilleures performances de discrimination des sons de parole que les enfants atteints de surdité congénitale et prélinguale. Néanmoins, Osberger et al. (1991) et Miyamoto et al., (1993) n'indiquent pas de différence dans les performances de perception de la parole (évaluées avec une tâche de répétition de syllabes, de mots et de phrases) entre des enfants sourds congénitaux et des enfants sourds prélinguaux qui sont tous implantés avant 10 ans. Il semble donc qu'une implantation pré ou post-linguale influence la réussite de la perception ou de la production de la parole. Les données fournies par ces études expérimentales sont à relier aux données issues des recherches portant sur la plasticité cérébrale qui mettent en évidence une période de sensibilité maximale à l'input auditif avant l'âge de 3 ans ½ (Leybaert et al., 2005).

La durée de surdité précédant l'implantation semble également posséder un fort impact sur les performances auditives. Les enfants avec une courte période de privation auditive tendent à présenter de meilleures performances aux tests de perception de parole que des enfants qui ont subi une plus longue période de privation auditive (Staller, Beiter, Brimacombe, Mecklenburg, Arndt, 1991 et Staller, Dowell, Beiter, Brimacombe, 1991). Osberger, Maso et Sam (1993) indiquent également que les performances de l'implant sur les

performances de production en langage oral des enfants avec entrée précoce dans la surdité et durée de surdité longue avant implantation sont plus pauvres que celles des enfants avec entrée précoce dans la surdité mais durée de surdité courte avant implantation.

L'âge auquel les patients sont implantés est également une variable critique. De nombreuses études indiquent que plus l'implantation est précoce, plus l'impact positif sur la perception de la parole est important (Tye-Murray, Spencer et Woodworth, 1995, Nikolopoulos et O'Donoghue, 1999, Richter, Eißele, Laszig, Löhle, 2002, Rubinstein, 2002, Waltzman, Cohen, Green et Roland, 2002, Frush Holt, Svirsky, Neuberger, Miyamoto, 2004, Haensel et al., 2005). Plus l'enfant serait implanté jeune, meilleurs seraient les résultats à des épreuves de perception de la parole (Geers, 2004) et plus particulièrement à des tests de reconnaissance orale de mots d'une syllabe (Taitelbaum-Swead, Kishon-Rabin, Kaplan-Neeman, Muchnik, Kronenberg, & Hildesheimer, 2005), de compréhension et de production du langage oral (Nicholas & Geers, 2004) ainsi que d'identification de mots et de phrases parlés lorsqu'ils ne peuvent pas s'aider de la lecture labiale (Chute, 1993 et Dawson, Blamey, Rowland, Dettman, Clarck, Busby, Brown, Dowell, Rickards, 1992 en anglais, Hassanzadeh, Farhadi, Daneshi et Emamdjomeh, 2002 en iranien). Néanmoins, une étude récente portant sur la perception catégorielle des sons de parole d'enfants implantés entre l'âge de 6 et 11 ans indiquent que l'âge d'implantation ne rend pas compte de la perception des sons de parole. Les scores de discrimination et d'identification de continuum de voisement ne varient pas en fonction de l'âge d'implantation des participants (Medina et Serniclaes, 2009).

L'implantation cochléaire intervient durant une période de privation sensorielle qui correspond à l'absence de stimulation sensorielle pendant une période significative de temps. Durant la privation, les mécanismes d'adaptation à l'input sensoriel peuvent ne pas opérer correctement et être alors mal adaptés. L'absence d'expérience auditive peut désactiver les processus et ne pas permettre aux enfants implantés de développer des représentations langagières appropriées. De plus, suite à une longue période de privation de stimulation sensorielle, certaines aires cérébrales peuvent se réorganiser. Après une implantation cochléaire, le système auditif doit apprendre à traiter un nouvel input auditif. La plasticité cérébrale fait référence à la compétence d'un réseau neuronal à changer son fonctionnement par rapport à une précédente activité ou une absence d'activité. Pour que le système se développe normalement, il faut qu'il soit stimulé pendant une certaine fenêtre temporelle, une période sensible. Les articles de Sharma et collaborateurs précisent la période sensible pour un développement normal du système auditif central chez les enfants qui reçoivent un implant cochléaire. Dans le système auditif, la période sensible du développement du système auditif

central est un temps durant lequel les voies auditives centrales sont maximalement plastiques. Par conséquent, il est raisonnable de supposer qu'une implantation cochléaire qui se produit pendant la période sensible pourra produire de bons résultats.

Une façon de mesurer objectivement le statut développemental et les limites de la plasticité des voies auditives centrales est d'examiner les latences des potentiels évoqués du cortex auditif. Plus particulièrement, chez les enfants, la latence du premier pic positif (P1) est considérée comme un marqueur de la maturation des aires auditives corticales (Eggermont & Ponton, 2003; Sharma & Dorman, 2006; Sharma, Gilley, Dorman, & Baldwin, 2007). La P1 est une onde positive qui se produit 100 à 300 ms après la stimulation auditive chez les enfants (Figure 13). La latence de l'onde P1 varie en fonction de l'âge, et est par conséquent considérée comme un indice de la maturité auditive corticale (Ceponiene, Cheour, & Naatanen, 1998; Cunningham, Nicol, Zecker, & Kraus, 2000; Gilley, Sharma, Dorman, & Martin, 2005; Ponton, Eggermont, Khosla, Kwong, & Don, 2002; Sharma, Dorman, & Spahr, 2002a; Sharma, Kraus, McGee, & Nicol, 1997).

La réponse de l'onde P1 a été mesurée chez les enfants sourds qui reçoivent un implant cochléaire à différents âges, afin d'examiner la plasticité du système auditif central (Ponton, Don, Eggermont, Waring, & Masuda, 1996; Ponton & Eggermont, 2001; Sharma, Dorman, & Kral, 2005; Sharma et al., 2002a; Sharma, Dorman, & Spahr, 2002b; Sharma et al., 2007). Sharma et Dorman (2006) ont examiné la latence de l'onde P1 chez 245 enfants sourds congénitaux porteurs d'un implant cochléaire. Ils ont mis en évidence que les enfants qui reçoivent un implant cochléaire précocement (avant l'âge de 3,5 ans) ont des latences de P1 normales, alors que les enfants qui reçoivent un implant plus tardivement (après l'âge de 7 ans) présentent des latences de l'onde P1 anormales (Figure 15). De manière générale, pour la majorité des enfants implantés tard, les latences des réponses de l'onde P1 ne sont pas comprises dans la norme définie par les enfants normo-entendants (Sharma et al., 2005 ; Sharma et al., 2007).

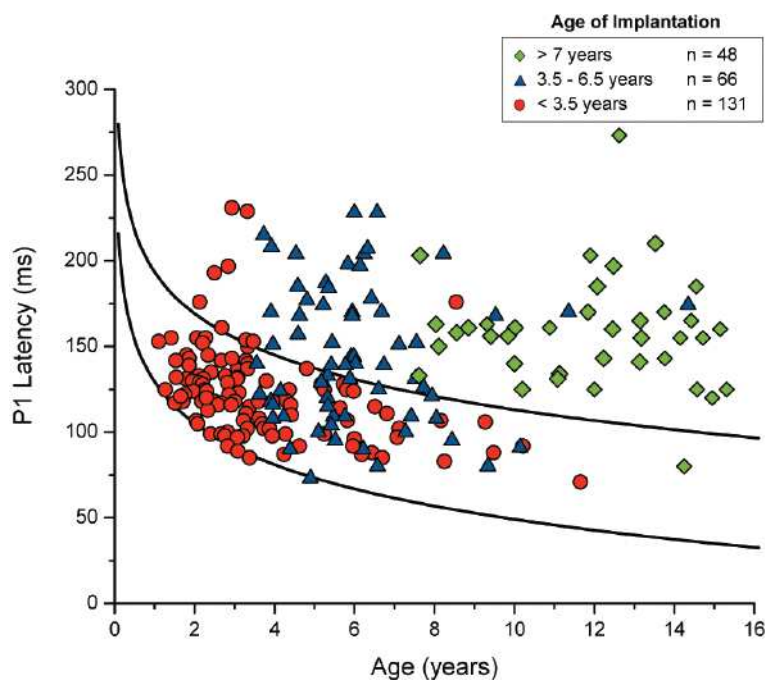


Figure 15. Latence de l'onde P1 chez les enfants implantés dont l'âge d'implantation est soit inférieur à 3,5 ans, soit entre 3,5 et 6,5 ans, soit supérieur à 7 ans. Cette mesure a été réalisée 3 mois après implantation.

De manière générale, l'onde P1 suggère donc la présence d'une période sensible du développement du système auditif central de 0 à 3,5 ans. Étant donné que les résultats sont variables pour les enfants implantés entre l'âge de 3,5 et 7 ans, on peut considérer que la fin de la période sensible se situe à 7 ans. Ceci est confirmé par d'autres études qui montrent la présence d'une période sensible pour le développement du système central auditif (Eggermont & Ponton, 2003; Lee, Lee, Oh, Kim, Kim, Chung et al., 2001; Schorr, Fox, vanWassenhove, & Knudsen, 2005), et qui indiquent que les compétences langagières orales des enfants implantés avant l'âge de 3-4 ans sont meilleures que celles d'enfants implantés après l'âge de 6-7 ans (Geers, 2006 ; Kirk, Miyamoto, Lento, Ying, O'Neill, et Fears, 2002).

Durée d'utilisation de l'implant















Plus la période d'utilisation de l'implant cochléaire est longue, plus l'effet sur le développement des compétences de langage oral est important. Selon une étude longitudinale réalisée par Miyamoto et al. (1994) et la méta-analyse effectuée par Rubinstein (2002), la variance des mesures de reconnaissance de mots parlés ou de phonèmes est en majorité expliquée par la durée d'utilisation de l'implant. Waltzman et al. (2002) confirment ces résultats en réalisant une épreuve de reconnaissance de la parole chez des participants âgés de 4 à 20 ans et indique que la durée d'utilisation de l'implant augmente significativement les performances de perception du langage oral. Quelque soit leur âge d'implantation, les enfants

reconnaissent respectivement 8,9% et 17,7% des mots et phrases présentés oralement après 1 an d'utilisation du dispositif, alors qu'ils reconnaissent 32,2% et 51,1% des mots et phrases présentés oralement après 3 ans d'utilisation du dispositif, et qu'ils reconnaissent 65,4% et 81,3% des mots et phrases présentés oralement à la fin du suivi, après 5 ans ou plus d'utilisation du dispositif. Enfin, Vieu, Mondain, Blanchard, Sillon, Reuillard-Artières, Tobey, Uziel, Piron (1998) indiquent que les compétences syntaxiques sont meilleures chez les enfants après 3 ans d'utilisation de l'implant cochléaire qu'après 2 ou 1 ans d'utilisation de l'implant puisque le nombre d'éléments syntaxiques détectés (déterminants, noms, verbes, adjectifs et pronoms) augmente avec l'expérience de l'implant : il est de 44,7 % après 1 an d'utilisation de l'implant, puis de 65,8 % après 2 ans et enfin de 74 % après 3 ans. Par conséquent, les performances liées aux habiletés de perception de la parole augmenteraient avec la durée d'expérience de l'implant.

Modes de communication

Le mode de communication (auditivo-oral⁸, langue des signes, langue parlée complétée) des enfants implantés aurait également un impact sur les compétences liées au langage. La Langue Parlée Complétée (LPC), version française du Cued Speech (Cornett, 1967), est un outil de communication qui aide à la réception du message oral. Cette méthode permet de transmettre visuellement la totalité du message oral à un rythme naturel de parole. Des clés manuelles viennent compléter le signal de parole et permettent de désambiguïser les signaux labiaux qui sont parfois identiques. Il y a huit configurations des doigts pour les consonnes et quatre positions de la main pour les voyelles (Figure 16). Afin de limiter le nombre de clés, celles-ci ne codent pas les phonèmes mais les syllabes. C'est l'interaction entre la position des doigts, des mains et le signal labial qui permet la perception du signal de parole.

⁸ La communication auditivo-orale repose sur la seule utilisation des compétences auditives et de parole et encourage activement les enfants à produire un langage parlé dans le but d'obtenir des bénéfices optimaux de leur implant.

Clés pour les consonnes				Clés pour les voyelles			
							
N°1	N°2	N°3	N°4	Côté	Bouche	Menton	Cou
d	k	h	n	ɑ: (father)	i: (see)	ɔ: (ought)	æ (that)
p	v	s	b	ʌ (but)	ɜ: (her)	e (get)	ɪ (is)
ʒ	ð (the)	r	hw	əʊ (home)	u: (blue)	ʊ (book)	
	z			ə (the)			
				(**)			
							
N°5	N°6	N°7	N°8	Glide côté-cou	Glide menton-cou		
t	l	g	ŋ	eɪ (pay)	aɪ (my)		
m	ʃ	dʒ	j (you)	ɔɪ (boy)	aʊ (cow)		
f	w	θ (thin)	tʃ				
(*)							

(*) Cette clé est également utilisée pour coder une voyelle non précédée d'une consonne

(**) La position côté est également utilisée pour coder une consonne non suivie d'une voyelle

Figure 16. Clés manuelles de la LPC

Vieu et al. (1998) mettent en évidence que, chez les enfants implantés en moyenne à 7;2 ans utilisant l'implant depuis 3 ans, les compétences en production du langage et en production de phrases syntaxiques sont meilleures lorsqu'ils utilisent la LPC que lorsqu'ils utilisent une communication auditivo-orale ou la langue des signes. La LPC parce qu'elle fournit des indices visuels pour la perception phonémique serait particulièrement adaptée pour développer les représentations phonémiques. Elle permet un traitement fin des contrastes phonémiques, et permet par exemple, la perception du seul trait phonémique qui distingue le son /b/ du son /p/. Ces sons sont caractérisés par le trait de voisement qui ne se différencie pas en lecture labiale. En effet, la langue française contient 36 sons auxquels correspondent seulement 12 images labiales. La LPC est destinée à améliorer la réception du message oral par l'enfant sourd et son principe fondamental consiste à associer à chaque phonème prononcé un geste de complément effectué simultanément par la main près du visage pour éliminer toutes les ambiguïtés dues aux sosies labiaux. Cinq positions de la main par rapport au visage distinguent les voyelles et huit configurations des doigts discriminent les consonnes. En outre, la LPC accompagne l'expression orale et respecte la syntaxe du français oral (ce qui n'est pas le cas de la LSF, Langue des Signes Française). La LPC semble donc plus appropriée à une utilisation conjointe avec l'implant cochléaire que la LSF.

5. Problématique

Cette revue de la littérature amène à considérer l'acquisition de la lecture comme un processus contraint par le développement de certaines compétences langagières orales : des représentations phonémiques précises, des habiletés de conscience phonémique et de mémoire à court terme phonologique bien développées. Le développement de ces habiletés suppose l'acquisition de compétences d'identification et de discrimination d'unités phonémiques et le développement de compétences de manipulation et de mémorisation d'unités phonémiques. Parce que de très nombreuses recherches (pour une revue, Sprenger-Charolles, Colé et Serniclaes, 2006) indiquent que, chez l'enfant normo-entendant, l'apprentissage de la lecture est dépendant de ces habiletés langagières orales, la question qui se pose est celle des relations entre habiletés langagières orales et écrites chez l'enfant sourd muni d'un implant cochléaire. Ces relations sont néanmoins soumises à deux contraintes chez l'enfant implanté :

- La première contrainte fait référence aux définitions de période sensible et de période critique développées par Knudsen (2004). En effet, les enfants participant à ce travail de thèse sont atteints de surdité profonde et congénitale. Ils présentent une période de privation auditive qui s'étend de la naissance à l'âge d'implantation (en moyenne 2;6 ans). Si cette période de privation auditive correspond à une période sensible voire critique du développement langagier, l'acquisition du langage oral pourrait se révéler déficitaire.
- La seconde contrainte est associée à la perception des sons de parole avec implant cochléaire. Le chapitre 3 décrit les difficultés de transmission des informations acoustiques par l'implant cochléaire par rapport à l'oreille ordinaire. Une dégradation de la transmission des indices acoustiques des sons de parole pourrait entraîner une perception moins précise des phonèmes et par voie de conséquence une acquisition du langage oral déficitaire.

L'objectif des études présentées dans cette thèse est donc de préciser les compétences en lecture après avoir déterminé les compétences à percevoir les sons de parole des enfants implantés pour pouvoir établir les relations existants entre ces deux modalités.

Pour cette raison, la question posée dans la seconde partie de la thèse porte sur la qualité des représentations phonémiques des enfants implantés et sur la comparaison des processus mis en œuvre pour percevoir les sons de parole entre enfants implantés et enfants normo-entendants. Le chapitre 4 présente une étude qui évalue la qualité des représentations phonémiques et le mécanisme de catégorisation des sons de parole chez les enfants implantés.

Le chapitre 5 présente une étude qui précise la qualité des représentations phonémiques et l'influence du traitement lexical sur la perception des phonèmes. Notre hypothèse est que les contraintes développementale et technique associées à la mise en place d'un implant cochléaire peuvent influencer l'acquisition de la perception des sons de parole des enfants implantés. La qualité des représentations phonémiques ainsi que les mécanismes impliqués dans la perception des sons de parole devraient donc être dégradés par rapport à une perception auditive ordinaire.

L'objectif de la troisième partie est de préciser le développement des compétences en lecture des enfants implantés et plus précisément certaines habiletés de reconnaissance des mots écrits. Le chapitre 6 présente une étude qui évalue les habiletés associées à la réussite en lecture (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique) ainsi que les compétences de reconnaissance des mots écrits. Le chapitre 7 présente une étude qui précise le développement des procédures sous-lexicale et lexicale de reconnaissance des mots écrits et qui s'attache à déterminer les modalités de l'activation des représentations phonologiques lors du recours à la procédure sous-lexicale. Le chapitre 8 présente une étude qui compare ces mêmes compétences chez des enfants implantés qui ont bénéficié de la LPC et chez des enfants implantés qui n'ont jamais été exposé à la LPC. Notre hypothèse est que si les contraintes développementale et technique associées à la mise en place d'un implant cochléaire dégradent l'acquisition de la perception de la parole des enfants implantés par rapport aux enfants normo-entendants, alors ces difficultés devraient influencer le développement des compétences de reconnaissance des mots écrits et des habiletés associées à la réussite en lecture.

Références

- Ardoint, M. (2009). Rôle des indices d'enveloppe temporelle et de structure temporelle fine dans l'intelligibilité de la parole. [thèse de doctorat]. Paris : Université Paris-Descartes, ENS.
- Arnoldner, C., Riss, D., Brunner, M., Baumgartner, W.D., & Hamzavi, J.S. (2007). Speech and music perception with the new fine structure speech coding strategy: preliminary results. *Acta Otolaryngologica*, 127, 1298-1303.
- Arlinger, S. (2006). A survey of public health policy on bilateral fittings and comparison with market trends: the evidence-base required to frame policy. *International Journal of Audiology*, 45(Suppl 1), S45-48.
- Bonham, B.H., & Litvak, L.M. (2008). Current focusing and steering: modeling, physiology, and psychophysics. *Hearing Research*, 242(1-2), 154-166.
- Calliope. (1989). *La parole et son traitement automatique*. Paris: Masson.
- Ceponiene, R., Cheour, M., & Näätänen, R. (1998). Interstimulus interval and auditory event-related potentials in children: evidence for multiple generators. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 108(4), 345-354.
- Chute, P.M. (1993). Cochlear implants in adolescents. *Advances in Otorhinolaryngology*, 48, 210-215.
- Cornett, R.O. (1967). Cued Speech. *American Annals of the Deaf*, 112, 3-13.
- Cunningham, J., Nicol, T., Zecker, S., & Kraus, N. (2000). Speech-evoked neurophysiologic responses in children with learning problems: development and behavioral correlates of perception. *Ear and Hearing*, 21(6), 554-568.
- Dawson, P., Blamey, P., Rowland, L., Dettman, S., Clark, G., Busby, P., Brown, A., Dowell, R., & Rickards, F. (1992). Cochlear implants in children, adolescents and prelinguistically deafened adults: speech perception. *Journal of Speech and Hearing Research*, 35, 401-417.
- Delattre, P. (1958). Les indices acoustiques de la parole. *Phonetica*, 2, 108-118.
- Delattre, P. (1968). From acoustic cues to distinctive features. *Phonetica*, 18, 198-230.
- Dorman, M.F., & Spahr, A.J. (2006). Speech perception by adults with multichannel implants. In S.B., Waltzman, & J.T., Roland, Jr. (Eds.), *Cochlear Implants* (pp. 193–204), New York: second ed. Theme Medical Publishers.
- Dudley, H. (1940). The nature carrier of speech. *Bell System Technical Journal*, 19, 405-515.
- Eggermont, J., & Ponton, C. (2003). Auditory-evoked potential studies of cortical maturation in normal hearing and implanted children: correlations with changes in structure and speech perception. *Acta oto-laryngologica*, 123(2), 249-252.
- Fant, G.C.M. (1970). *Acoustic Theory of Speech Production*. Mouton: The Hague.

- Fishman, K.E., Shannon, R.V., & Slattery, W.H. (1997). Speech recognition as a function of the number of electrodes used in the SPEAK cochlear implant speech processor. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 40(5), 1201-1215.
- Fortnum, H., Marshall, D., & Summerfield, A. (2002). Epidemiology of the UK population of hearing-impaired children, including characteristics of those with and without cochlear implants--audiology, aetiology, comorbidity and affluence. *International Journal of Audiology*, 41(3), 170-179.
- Friesen, L.M., Shannon, R.V., Baskent, D., & Wang, X. (2001). Speech recognition in noise as a function of the number of spectral channels: Comparison of acoustic hearing and cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110, 1150–1163.
- Frush Holt, R., Svirsky, M., Neuberger, H., & Miyamoto, R. (2004). Age at implantation and communicative outcome in pediatric cochlear implant users: Is younger always better? *International Congress Series*, 1273, 368-371.
- Fu, Q.J., & Nogaki, G. (2004). Noise susceptibility of cochlear implant users: the role of spectral resolution and smearing. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 6, 19-27.
- Gantz, B., Woodworth, G., Knutson, J., Abbas, P., & Tyler, R. (1993). Multivariate predictors of success with cochlear implant. *Advances in Oto-rhino-laryngology*, 48, 153-167.
- Garnham, C., O'Driscoll, M., Ramsden, R., & Saeed, S. (2002). Speech understanding in noise with a Med-El COMBI 40+ cochlear implant using reduced channel sets. *Ear and Hearing*, 23, 540-552.
- Geers, A.E. (2004). Speech, Language, and Reading Skills after early cochlear implantation. *Archive of Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 130, 634-638.
- Geers, A.E. (2006). Factors influencing spoken language outcomes in children following early cochlear implantation. *Advances in Oto-Rhino-Laryngology*, 64, 50-65.
- Gilley, P., Sharma, A., Dorman, M., & Martin, K. (2005). Developmental changes in refractoriness of the cortical auditory evoked potential. *Clinical Neurophysiology*, 116(3), 648-657.
- Haensel, J., Engelke, J.C., Ottenjann, W., & Westhofen, M. (2005). Long-term results of cochlear implantation in children. *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 132, 456-458.
- Hassanzadeh, S., Mohammad, F., Daneshi, A., & Emamdjomeh, H. (2002). The effects of age on auditory speech perception development in cochlear-implanted prelingually deaf children. *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 126, 524-527.
- Helmholtz, H.L.F. Von (1863). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig, Germany: F. Vieweg & Sohn.

- Hochmair, I., Nopp, P., Jolly, C., Schmidt, M., Schösser, H., Garnham, C., & Anderson, I. (2006). MED-EL cochlear implants: state of the art and a glimpse into the future. *Trends in Amplification*, *10*, 201–219.
- Hoonhorst, I. (2009). La perception du voisement en français : investigations comportementales et électrophysiologiques du processus de spécialisation phonologique. [thèse de doctorat]. Bruxelles : Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Psychologiques et de l'Éducation.
- Houston, D., Pisoni, D., Kirk, K.I., Ying, E., & Miyamoto, R. (2003). Speech perception skills of deaf infants following cochlear implantation: a first report. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, *67*, 479-495.
- Johnson, D., & Kiang, N. (1976). Analysis of discharges recorded simultaneously from pairs of auditory nerve fibers. *Biophysical Journal*, *16*(7), 719-734.
- Joris, P.X., Schreiner, C.E., & Rees, A. (2004). Neural processing of amplitude modulated sounds. *Physiological Review*, *84*, 541-577.
- Kiefer, J., von Ilberg, C., Rupprecht, V., Hubner-Egner, J., & Knecht, R. (2000). Optimized speech understanding with the continuous interleaved sampling speech coding strategy in patients with cochlear implants: Effect of variations in stimulation rate and number of channels. *Annals of Otology Rhinology and Laryngology*, *109*(11), 1009-1020.
- Kirk, K.I., Miyamoto, R.T., Lento, C.L., Ying, E., O'Neill, T., & Fears, B. (2002). Effects of age at implantation in young children. *The Annals of otology, Rhinology, and Laryngology Supplement*, *189*, 69–73.
- Knudsen, E.I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*, 1412-1425.
- Kolb, B., & Wishaw, I. (2002). *Cerveau et Comportement*. Bruxelles: De Boeck.
- Lawson, D.T., Wilson, B.S., Zerbi, M. & Finley, C.C. (1996). Speech processors for auditory prostheses, *Third Quarterly Progress Report*. NIH Contract N01-DC-5-2103, Bethesda: Neural Prosthesis Program, National Institutes of Health.
- Lee, D.S., Lee, J.S., Oh, S.H., Kim, S.K., Kim, J.W., Chung, J.K., et al. (2001). Cross-modal plasticity and cochlear implants. *Nature*, *409*(6817), 149–150.
- Leybaert, J., Schepers, F., Renglet, T., Simon, P., Serniclaes, W., Deltenre, P., Marquet, T., Mansbach, A.L., Périer, O., & Ligny, C. (2005). Effet de l'implant cochléaire sur le développement du langage et l'architecture cognitive de l'enfant sourd profond. In Transler, C., Leybaert, J., Gombert, J.E (Eds.), *L'acquisition du langage par l'enfant sourd : les signes, l'oral et l'écrit* (pp 173-194), Solal : Marseille.
- Lieberman, A., Cooper, F., Shankweiler, D., & Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological Review*, *74*(6), 431-461.

- Lisker, L. (1978). Rapid vs Rabid: A catalogue of acoustic features that may cue the distinction. *Status report on speech research*, 54, 127-132.
- Lisker, L. (1985). The pursuit of invariance in speech signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77, 1189-1202.
- Lisker, L. & Abramson, A.S. (1964). A cross-language study of voicing in initial stops: Acoustical measurements. *Word*, 20, 384-422.
- Loizou, P. (2002). Introduction to Cochlear Implants. In W., Serniclaes (Eds.), *Methods for the assessment of cochlear implant performances* (pp 1-30), Etudes et Travaux n°5, Paris.
- Medina, V., & Serniclaes, W. (2009). Consecuencias de la categorización fonológica sobre la lectura silenciosa de niños sordos con implante coclear. *Revista de Logopedia, Foniatría y Audiología*, 29(3), 186-194.
- Mondain, M., Blanchet, C., Venail, F., & Vieu, A. (2005). Classification et traitement des surdités de l'enfant. *Oto-rhino-laryngologie*, 2, 301-319.
- Miyamoto, R.T., Osberger, M.J., Robbins, A.M., Myres W.A., & Kessler, K. (1993). Prelingually deafened children's performance with the nucleus multichannel cochlear implant. *American Journal of Otology*, 14, 437-445.
- Miyamoto, R., Osberger, M.J., Todd, S., Robbins, A., Stroer, B., Zimmerman-Philips, S., & Carney, A. (1994). Variables Affecting Implant Performance in Children. *Laryngoscope*, 104, 1120-1124.
- Nicholas, J., & Geers, A. (2004). Effect of age of cochlear implantation on receptive and expressive spoken language in 3-year-old deaf children. *International Congress Series*, 1273, 340-343.
- Nie, K., Stickney, G., & Zeng, F.G. (2005). Encoding frequency modulation to improve cochlear implant performance in noise. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52, 64-73.
- Nikolopoulos, T., & O'Donoghue, G. (1999). Age at implantation: its importance in pediatric cochlear implantation. *Laryngoscope*, 109(4), 595-599.
- Niparko, J. (2004). Speech, Language, and Reading Skills After Early Cochlear Implantation. *Journal of the American Medical Association*, 291(19), 2378-2380.
- Ohm, G.S. (1843). über die definition des tones, nebst daran geknüpfter theorie der sirene und ähnlicher tonbildender vorrichtungen. *Annalen der Physik*, 59, 513.
- Osberger, M.J., Maso, M., & Sam, L. (1993). Speech intelligibility of children with cochlear implants, tactile aids, or hearing aids. *Journal of speech, language, and hearing research*, 36, 186-203.

- Osberger, M.J., Miyamoto, R.T., Zimmerman-Phillips, S., Kemink, J., Stroer, B., Firszt, B., & Novak, M. (1991). Independent evaluation of the speech perception abilities of children with the Nucleus 22-channel cochlear implant system. *Ear and Hearing, 12*, S66.
- Ouellet, C., & Cohen, H. (1999). Speech and language development following cochlear implantation. *Journal of Neurolinguistics, 12*, 271-288.
- Parisier, S., Chute, P., Popp, A., & Hanson, M. (1997). Surgical techniques for cochlear implantation in the very young children. *Otolaryngology Head and Neck Surgery, 117*, 248-54.
- Pickett, J. (1980). *The sounds of speech communication*. Baltimore: University Park Press.
- Pisoni, D.B. (2005). Speech perception in deaf children with cochlear implants. In D.B., Pisoni, & R., Remez, (Eds.), *Handbook of Speech Perception*. (pp. 494-523). Blackwell Publishers.
- Plomp R. (1964). The ear as a frequency analyzer. *The Journal of the Acoustical Society of America, 36*, 1628-1636.
- Ponton, C., Don, M., Eggermont, J., Waring, M., & Masuda, A. (1996). Maturation of human cortical auditory function: differences between normal-hearing children and children with cochlear implants. *Ear and Hearing, 17*(5), 430-437.
- Ponton, C., & Eggermont, J. (2001). Of kittens and kids: altered cortical maturation following profound deafness and cochlear implant use. *Audiology and neuro-otology, 6*(6), 363-380.
- Ponton, C., Eggermont, J., Khosla, D., Kwong, B., & Don, M. (2002). Maturation of human central auditory system activity: separating auditory evoked potentials by dipole source modeling. *Clinical Neurophysiology, 113*(3), 407-420.
- Richter, B., Eißele, S., Laszig, R., & Löhle, E. (2002). Receptive and expressive language skills of 106 children with a minimum of 2 years' experience in hearing with a cochlear implant. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 64*, 111-125.
- Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, 336*, 367-373.
- Rothenberg, M. (1981). Acoustic interaction between the glottal source and the vocal tract. In K.N. Stevens & M. Hirano (Eds.), *Vocal Fold physiology* (305-328), University of Tokyo Press.
- Rubinstein, J. (2002). Paediatric cochlear Implantation: prosthetic hearing and language development. *Rapid review, 360*, 483-485.
- Ruggero, M., Robles, L., & Rich, N. (1986). Cochlear microphonics and the initiation of spikes in the auditory nerve: correlation of single-unit data with neural and receptor potentials recorded from the round window. *The Journal of the Acoustical Society of America, 79*(5), 1491-1498.

- Russ, S., Poulakis, Z., Barber, M., Wake, M., Rickards, F., et al. (2003) Epidemiology of congenital hearing loss in Victoria, Australia. *International Journal of Audiology*, 42, 385-390.
- Schorr, E., Fox, N., van Wassenhove, V., & Knudsen, E. (2005). Auditory-visual fusion in speech perception in children with cochlear implants. *PNAS*, 102(51), 18748-18750.
- Sharma, A., & Dorman, M. (2006). Central auditory development in children with cochlear implants: clinical implications. *Advances in Oto-rhino-laryngology*, 64, 66-88.
- Sharma, A., Dorman, M., & Kral, A. (2005). The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants. *Hearing Research*, 203(1-2), 134-143.
- Sharma, A., Dorman, M., & Spahr, A.J. (2002a) sensitive period for the development of the central auditory system in children with cochlear implants: implications for age of implantation. *Ear and Hearing*, 23(6), 532-539.
- Sharma, A., Dorman, M., & Spahr, A.J (2002b). Rapid development of cortical auditory evoked potentials after early cochlear implantation. *Neuroreport*, 13(10), 1365-1368.
- Sharma, A., Gilley, P., Dorman, M., & Baldwin, R. (2007). Deprivation-induced cortical reorganization in children with cochlear implants. *International Journal of Audiology*, 46(9), 494-499.
- Sharma, A., Kraus, N., McGee, T., & Nicol, T. (1997). Developmental changes in P1 and N1 central auditory responses elicited by consonant-vowel syllables. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 104(6), 540-545.
- Smith, Z.M., Delgutte, B., & Oxenham, A.J. (2002). Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. *Nature*, 416, 87-90.
- Socialstyrelsen (2009). Behandling av barn med cochleaimplantat som rikssjukvård. Underlag till Rikssjukvårdsnämndens möte den 13 maj 2009.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2006). *Reading acquisition and developmental dyslexia*. London: Psychology Press.
- Staller, S.J., Beiter, A.L., Brimacombe, J.A., Mecklenburg, D.J., & Arndt, P. (1991). Pediatric performance with the Nucleus 22-channel cochlear implant system. *American Journal of Otolaryngology*, 12, S126-S136.
- Staller, S., Dowell, R., Beiter, A., & Brimacombe, J. (1991). Perceptual abilities of children with the Nucleus 22-channel cochlear implant. *Ear and Hearing*, 12, S34-S38.
- Summerfield, A., & Marshall, D. (1995). Preoperative predictors of outcomes from cochlear implantation in adults: performance and quality of life. *The annals of otology, rhinology & laryngology. Supplement*, 166, S105-S108.

- Taitelbaum-Swead, R., Kishon-Rabin, L., Kaplan-Neeman, R., Muchnik, C., Kronenberg, J., & Hildesheimer, M. (2005). *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 69, 1675-1683.
- Tye-Murray, N., Spencer, L., & Woodworth, G. (1995). Acquisition of speech by children who have prolonged cochlear implant experience, *Journal of speech, language, and hearing research*, 38, 327-337.
- Vaissière, J. (2006). *La Phonétique*. Paris : Presses Universitaires de France (P.U.F.), collection 'Que Sais-Je'.
- Vander, A., Sherman, J., & Luciano, D. (2001). *Human Physiology: The Mechanisms of Body Function*. 8th ed. New York: McGraw Hill.
- Vieu, A., Mondain, M., Blanchard, K., Sillon, M., Reuillard-Artieres, F., Tobey, E., Uziel, A., & Piron, J.P. (1998). Influence of communication mode on speech intelligibility and syntactic structure of sentences in profoundly hearing impaired French children implanted between 5 and 9 years of age. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 44, 15-22.
- Von Bekesy, G. (1960). *Experiments in Hearing*. New York: McGraw-Hill Book.
- Wajskop, M., & Sweerts, J. (1973) Voicing cues in oral stop consonants. *Journal of Phonetics*, 1, 121-130.
- Waltzman, S., Cohen, N., Green, J., & Roland, J. (2002). Long term effects of cochlear implants in children. *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 126, 505-511.
- Wilson, B.S., (1997). The future of cochlear implants. *British Journal of Audiology*, 31, 205-225.
- Wilson, B.S., Schatzer, R., Lopez-Poveda, E.A., Sun, X., Lawson, D.T., & Wolford, R.D. (2005). Two new directions in speech processor design for cochlear implants. *Ear and Hearing*, 26, 73S-81S.
- Xu, L., & Pfingst, B.E. (2003). Relative importance of temporal envelope and fine structure in lexical-tone perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114, 3024-3027.
- Zeng, F.-G., Nie, K., Stickney, G.S., Kong, Y.Y., Vongphoe, M., Bhargave, A., Wei, C., & Cao, K. (2005). Speech recognition with amplitude and frequency modulations. *PNAS*, 102, 2293-2298.

PARTIE 2.

ETUDES

EXPÉRIMENTALES

Apprentissage de la lecture et perception
de la parole chez l'enfant muni d'un
implant cochléaire

Categorical perception of speech sounds in French-speaking children with cochlear implant¹

Sophie Bouton¹, Pascale Colé¹, Josiane Bertoncini², and Willy Serniclaes²

¹ Université de Provence, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille

² CNRS & Université Paris-Descartes, Laboratoire Psychologie de la Perception, Paris

Résumé

L'objectif de cette étude est de préciser les performances des enfants munis d'un implant cochléaire à percevoir les traits phonémiques du français en les comparant à celles d'enfants normo-entendants de même âge audio-perceptif. Les enfants ont réalisé des tâches de discrimination et d'identification de paires minimales. On mesure ainsi les compétences à percevoir les traits consonantiques (lieu d'articulation, voisement, mode d'articulation et nasalité) et vocaliques (nasalité, aperture, antériorité). Si la période de privation auditive influence la perception des sons de parole chez les enfants implantés, on peut supposer qu'elle aura des effets plus importants sur la perception catégorielle par rapport à la précision catégorielle, parce que la précision catégorielle se développe plus lentement que la perception catégorielle chez les enfants normo-entendants. Les résultats indiquent que la "perception catégorielle" est similaire entre groupes, puisque la relation entre les scores de discrimination et d'identification des enfants implantés est similaire à celles des enfants contrôles. Cependant, les enfants implantés présentent un niveau plus faible de "précision catégorielle", puisque leur précision à discriminer et identifier les traits phonémiques est plus faible que celle des enfants normo-entendants. Les résultats indiquent également que l'amplitude du déficit varie en fonction des traits phonémiques. Par conséquent, les résultats montrent que la privation auditive précoce n'est pas à l'origine de performances plus faibles de précision catégorielle. Le déficit de précision semble plutôt résulter des limitations de transmission des signaux acoustiques par l'implant ou d'une profondeur non optimale d'insertion des électrodes.

Mots clés : perception catégorielle, traits phonémiques, implant cochléaire, développement de la parole.

¹ Paper under review in **Journal of Speech, Language and Hearing Research**

Abstract

Purpose: The present study investigates the perception of phonological features in French-speaking CI children compared to normal-hearing (NH) children matched for listening age.

Method: Scores for discrimination and identification of minimal pairs for all features defining consonants (e.g. place, voicing, manner, nasality) and vowels (e.g. frontness, nasality, aperture) were measured in each listener. *Results:* The results indicate no differences in "categorical perception," specified as a similar difference between discrimination and identification between CI children and controls. However, CI children demonstrated a lower level of "categorical precision," i.e. lesser accuracy in both feature identification and discrimination, than NH children, with the magnitude of the deficit depending on the feature.

Conclusions: If sensitive periods of language development extend well beyond the moment of implantation, the consequences of hearing deprivation for the acquisition of categorical perception should be fairly important in comparison to categorical precision because categorical precision develops more slowly than categorical perception in NH children. Our results don't support the idea that the sensitive period for development of categorical perception is restricted to the first 1-2 years of life. The sensitive period may be significantly longer. Differences in precision may reflect the acoustic limitations of the cochlear implant, such as coding for temporal fine structure and frequency resolution.

Keywords: Categorical Perception, Phonological Features, Cochlear Implant, Speech Development

1. Introduction

Previous studies suggest that children with cochlear implants (CI) have less accurate perception of speech sounds than normal-hearing (NH) children (Geers, Brenner & Davidson, 2003; Medina & Serniclaes, 2009; Tye-Murray, Spencer & Gilbert-Bedia, 1995). There are two different possible reasons why CI users have more difficulty perceiving speech sounds than NH listeners. First, CI children have experienced a hearing deprivation period, which might correspond to a sensitive period for language development (Knudsen, 2004), especially for the acquisition of categorical perception (Medina, Hoonhorst, Bogliotti & Serniclaes, in press; Hoonhorst, Medina, Collin, Markessis, Radeau, et al., 2011), and this might create problems for the acquisition of "phonological," i.e. language-specific, features. However, if this period was flexible, and extended beyond the moment of implantation, it might only have reduced consequences for speech perception. Second, there are many differences between electrical and auditory stimulation (Shannon, Zeng, Kamath, Wygonski & Ekelid 1995; Dorman, Loizou, Spahr & Maloff, 2002; Xu & Zheng, 2007), and these differences might lead to less accurate feature perception. Thus, CIs and auditory deprivation give a unique opportunity to further elucidate speech and language development and give us a reason to revisit the classical topic of categorical perception.

1.1. Perceptual development of phonological features

The perceptual development of phonological features is a long-lasting process, which starts before one year of age and ends during adolescence. The pre-linguistic child is endowed with capacities to discriminate universal features irrespective of the language environment. These universal features are selected and combined after exposure to the sounds of a specific language between 6 and 12 months of age (Eilers, Gavin & Wilson, 1979; Rivera-Gaxiola, Silva-Peyrera & Kuhl, 2005; Burns, Yoshida, Hill & Werker, 2007; Hoonhorst, Colin,

Markessis, Radeau, Deltenre & Serniclaes, 2009). At the age of one year the child has acquired the features that are necessary for perceiving the contrasts between sounds, which are phonologically relevant in his or her linguistic environment. However, as stated by Hoonhorst et al. (2009), theoretical perspectives have changed considerably over the years, emphasizing on learning in recent work rather than the strong innate assumptions in early studies (Burns et al., 2007; Maye, Weiss, & Aslin, 2008; Maye, Werker, & Gerken, 2002; for a review, see Kuhl, Conboy, Coffey-Corina, Padden, Rivera-Gaxiola, & Nelson, 2008). Currently, there still remains a basic concern about the adaptation of the initial abilities to discriminate all of the phonetic contrasts present in the world languages (Werker & Tees, 1984) to the categories present in the native language. Interestingly, the perceptual development of phonological features is far from complete at the age of one year. Various studies show that the features, which play a role in the linguistic environment are perceived with progressively greater precision up to the end of childhood, and even during adolescence (Zlatin & Koenigsknecht, 1975; Simon & Fourcin, 1978; Krause, 1982; Elliott, Longinotti, Meyer, Raz, & Zucker, 1981 ; Elliott, Busse, Partridge, Rupert, & de Graaf, 1986; Burnham, Earnshaw & Clark, 1991; Hazan & Barrett, 2000; Medina et al., in press; Hoonhorst et al., 2011). This development of perceptual accuracy is not restricted to auditory speech features. Using different stimulus continua, Hoonhorst et al. (2011) found that categorical precision increased with age for both voicing and facial expressions, though not for colors. These results suggest that the development of categorical precision arises from a general cognitive maturation across different perceptual domains. It should be stressed that in all these studies it is specifically categorical *precision*, in both the discrimination and identification of features, which progresses during this period. For another property, namely "categorical perception," previous researches showed a different developmental pattern.

Whereas "categorical precision" is a matter of accuracy –it corresponds to the extent to which stimuli are correctly identified and discriminated-, "*categorical perception*" reflects the coherence between discrimination and identification. According to the original definition, perception is categorical when stimuli can be discriminated only insofar as they are classified into different categories (Liberman, Harris, Hoffman, & Griffith, 1957). Despite the huge number of studies which refer to categorical perception, the concept has proven to be highly resistant to various criticisms and misunderstandings. One frequent misconception is to reduce categorical perception to a sensory discontinuity or "boundary." While there is little doubt that sensory discontinuities play an important role in the acquisition of categorical perception (for a review see Hoonhorst et al., 2009), categorical perception cannot be reduced to such discontinuities. Categorical perception is a much broader property, which can take place "...in the absence of a boundary effect since there need be no local maximum in discriminability" (Macmillan, Kaplan & Creelman, 1977, p. 453) and can then result from top-down effects through which upper-level categories constrain sensory processing (for brain evidence see e.g. Dufour, Serniclaes, Sprenger-Charolles, & Démonet, 2007). Categorical perception arises as a result either of sensory or of higher-level cognitive factors, but what remains essential for its definition is the coherence between sensation and cognition, i.e. the relationship between discrimination and identification responses (the "acid test" of categorical perception, in the words of Damper & Harnad, 2000). The link between sensation and cognition does not necessarily need to be acquired as evidenced by instances of categorical perception induced by psychophysical discontinuities (for data with a rise time continuum: Cutting & Rosner, 1974; for data with monkeys: Kuhl & Miller, 1975; 1978; for data with colors: Hoonhorst et al., 2011). However, when dealing with phonological features, such psychophysical discontinuities are not simply related to the language categories: categorical perception is acquired by combining different basic discontinuities through exposure to the

sounds of the environmental language during the first year of age (e.g. Hoonhorst et al., 2009).

None of the previous studies on this issue, as far as we know, have evidenced a change in categorical perception after two years of age. However, many studies have shown that categorical perception changes before one year of age (starting with Werker & Tees, 1984; for a review see Kuhl et al., 2008). Human infants are born with predispositions for perceiving all the possible universal features, which are then activated or not as a function of the presence or absence of the corresponding features in the linguistic environment. For example, Werker & Tees (1984) observed that infants aged 6 to 8 months discriminated non-native (Thompson and Hindi) and native features (English), whereas infants aged 10 to 12 months discriminated only native features. Different universal features can thus be combined whenever they contribute to the perception of the same phonological feature in the language. It is noteworthy that these studies have assessed categorical perception without collecting identification data instead using differences in discrimination between across- vs. within-category pairs. This is a simplification, which can be useful for assessing categorical perception when identification responses cannot be collected (typically in very young children, since the seminal study of Eimas, Siqueland, Jusczyk, & Vigorito, 1971, or in cross-linguistic studies, as in Strange & Dittmann, 1984). Although the optimal procedure is to collect identification responses, the location of the identification boundary can then be inferred from studies with other subjects (from adults in studies on children; from native-speakers in cross-linguistic studies). However, it should never be forgotten that using the boundary location for separating stimulus pairs into within- and across-category groups is not the optimal procedure; it is only a short-cut when no identification responses are available. No boundary is needed with the optimal procedure, only identification responses.

Categorical perception is perfect when speech sounds cannot be discriminated unless they are identified as members of different categories (Liberman et al., 1957). Although categorical perception is almost never perfect, the acquisition of adult-like categorical perception of language-specific features seems to start very early, before one year of age, but all existing evidence on this point is indirect, as discussed above. There is only evidence to support that the relationship between discrimination and identification does not improve after some six years of age (Medina et al., in press; Hoonhorst, et al., 2011). This does not mean that categorical perception is perfect in six-year-old children, i.e. that discrimination between speech sounds at this age depends entirely on their classification into different categories, but that their degree of categorical perception is not less than that of adults with the same stimuli and more generally under the same conditions.

The abundant evidence on the long-lasting effect of age on categorical precision, up to the beginning of adolescence, is in sharp contrast with the presence of adult-like categorical perception performances at two years of age and perhaps even earlier. There is no doubt that categorical perception develops faster than categorical precision, although the precise age at which adult-like categorical perception is acquired remains unknown. The difference in the rate of development of these two properties of categorical behavior might have implications for language development in CI children. However, this depends on the flexibility of the sensitive periods during which these properties can be acquired. We share the views of several other authors that this is a concern for the development of speech in general (Werker & Tees, 2005; Kuhl et al. 2008, p.993; Gervain & Mehler, 2010) and with a CI in particular (Kral & Eggermont, 2007). For example, richer social environments extend the duration of the sensitive period for learning in owls and songbirds (Baptista & Petrinovich 1986; Brainard & Knudsen 1998). According to Werker and Tees (2005), biological and experiential factors

contribute to variations in both the onset and offset of openness to speech perception experience. While this indicates that sensitive periods are fairly flexible, the sensory deprivation, which precedes cochlear implantation in infants who are congenitally deaf might nevertheless affect the development of speech perception, especially that of categorical perception whose development is relatively rapid. Hearing deprivation should have a lesser effect on the development of categorical precision, which is fairly slow. But all depends on the flexibility of the periods during which these categorical properties can be fully acquired. If these periods extend well beyond the moment of implantation, the consequences of hearing deprivation for the acquisition of categorical perception capacities should be fairly limited.

Although cochlear implantation in deaf infants has become a promising tool for auditory rehabilitation, the specific implications of the auditory deprivation period preceding cochlear implantation on speech perception remain to be elucidated. As explained above, categorical perception tells us about the coherence of speech perception across different processing levels. The interest of seeing whether or not this top-down component is preserved in CI children is evident. More generally, studying the implications of auditory deprivation for the development of two basically different properties of speech sound categorization, categorical perception and categorical precision, is of particular interest. This is the aim of the present study.

1.2. Overview of consonant and vowel recognition in CI children

In general, perception of speech sounds is less precise in CI children than in NH children. Geers et al. (2003) administered a battery of speech perception tests to CI children of eight and nine years old who had received a cochlear implant by age five. They found that the children achieved an average level of about 50% speech perception skills through listening

alone, although their performance depended on the difficulty of the test. Indeed, on an early speech perception test developed by the CID (Central Institute for the Deaf, St Louis, Missouri), in which the child hears a word and responds by pointing to one of 12 pictures on a single plate following each stimulus presentation, CI children obtained about 79% correct responses. This task, which uses words differing in all phonemes or with a similar first consonant, is simpler than the WIPI test (Ross & Lerman, 1971), which is also a word identification task with picture pointing responses. In this test, only one auditory stimulus word is presented for each plate, where there are 6 pictures corresponding to words with the same or similar vowel sound but different consonants (for example, hair, pear, stair). In the WIPI task, CI children correctly recognized about 41% of the words. Thus, tests that require fine auditory distinctions among consonant sounds appear to be more difficult than the early speech perception test where words are more broadly distinguished.

Other results show that the magnitude of the perceptual deficit in CI children depends on the phonological feature. Tye-Murray, Spencer and Gilbert-Bedia (1995) assessed the speech perception skills of CI children using the Children's Audio-visual Feature Test (Tyler, Fryauf-Bertschy & Kelsay, 1991). The test is comprised of items that most 4- and 5-year-old children can recognize: seven letters of the alphabet and three common words. The stimuli are P, T, C, B, D, V, Z, key, knee, and me. When testing perception skills, an audiologist pronounced one word and the subject pointed to an item on the response form that bore an illustration of the test stimulus. They showed that children fitted at 7.3 years, with 34 months of CI experience at the moment of testing, had a score of 25% correct consonants in the auditory-only condition. The children scored highest for the nasality and voicing features (respectively 33% and 30% of correct responses on average) and lowest for the place and friction features (respectively 7% and 13% of correct responses on average).

Medina (2008) and Medina and Serniclaes (2009) showed that CI children aged from 5.9 to 11 years old and fitted at an average age of 3.3 years discriminated different vowels and consonants less successfully than NH children matched for chronological age. For vowels, the deficit was larger for nasality than for labiality, frontness and aperture. For the consonants, the deficit was larger for place than for nasality, manner and voicing, in agreement with the results of Tye-Murray et al. (1995).

The results of a previous study suggested that in some instances CI children do not have a deficit in either categorical perception or categorical precision when compared to NH children of the same listening age (Medina & Serniclaes, 2009). However, this depended on the phonological feature. Similar results between CI and NH children were found only for the voicing feature (Medina & Serniclaes, 2009) and not for place of articulation, for which CI children showed a deficit in categorical precision (Medina & Serniclaes, 2005). The absence of a categorical perception deficit for the voicing feature suggests that early auditory deprivation does not affect the development of phonological features. The fact that a categorical precision deficit is present for the place feature but not for the voicing feature suggests that cochlear implants' poor transmission of certain acoustic cues such as formant transitions, has developmental implications.

The fact that deficits in phonemic discrimination are not equivalent for all the investigated features suggests that the different acoustic cues are not transmitted with the same fidelity by the cochlear implant device. These limitations may be a problem because each phonemic feature depends on specific acoustic cues (Note⁹). Studies on this issue started from the dichotomy between two different dimensions of acoustic signals: temporal envelope

⁹ While it is evident that the perception of a single phonemic feature depends on multiple acoustic cues (for a review see Repp, 1982), it is also true that some of these cues have major perceptual importance. The other cues are secondary: they only act when the main cue is ambiguous (typically voice onset time for voicing: Abramson & Lisker, 1985). This has been shown even with naturally produced spontaneous speech (Saerens, Serniclaes & Beeckmans, 1989). Here we describe each feature which acts as a “major cue”, i.e. those with the largest perceptual weight.

and temporal fine structure. For instance, envelope has decisive importance for the perception of voicing and manner, whereas temporal fine structure is decisive for place and nasality (Rosen, 1992; Stevens, 2000). If envelope was better transmitted by the CI than temporal fine structure, this might explain why CI children perceive manner and voicing better than place and nasality. In general, the capacity to identify speech signals relies on the perception of both temporal cues, the envelope (i.e. E, relatively slow variations in amplitude over time, between 2 and 50 Hz), and the temporal fine structure, (i.e. TFS, the rapid variations at a rate close to the center frequency of the band, higher than 500 Hz). According to Rosen (1992) and Stevens (2000), features including place, nasality, frontness, and aperture are mainly supported by temporal fine structure cues, whereas voicing and manner are supported by temporal envelope cues. Thus, it is theoretically and practically important to understand whether the perceptual resolution of temporal envelope and temporal fine structure are key factors for speech perception in quiet for CI users. To our knowledge, no data is available concerning the acoustic cue perception skills of children with cochlear implants. All the research on this issue discussed below concerns adult listener skills.

Most current cochlear implant prostheses seem to deliver adequate temporal envelope information, but transmit temporal fine structure suboptimally. Existing types of cochlear implants cannot provide temporal fine structure information, as the modulated carrier in each channel is a single train of pulses with fixed delay, and the ability of the cochlear implant to use frequency-place coding cues is limited (Faulkner, Rosen & Moore, 1990). Indeed, large amounts of channel interaction have been observed for stimuli presented on adjacent electrodes, although the overall effect is individually variable and dependent on the stimulus parameters (Chatterjee & Shannon, 1998). The device's discarding of temporal fine structure significantly decreases speech perception performance, especially in tonal languages (Xu & Pfingst, 2008; Stickney, Zeng, Litovsky, & Assman, 2004). Whereas some studies

have shown that CI users' temporal fine structure resolution is relatively poor compared to that of NH listeners, their processing of temporal envelope is less impaired (Fu & Shannon, 2000; Chen & Zeng, 2004; Stickney et al., 2004). Temporal envelope cues may, in fact, be particularly important for CI users precisely because their perception of temporal fine structure cues is significantly worse than that of listeners with normal hearing, and they may be forced to rely more heavily on those acoustic cues that are relatively well perceived with a cochlear implant (Zeng, Nie, Stickney, Kong, Vongphoe, Bhargave et al., 2005; Qin & Oxenham, 2003). Indeed, many studies have shown that temporal envelope information contributes significantly to consonant recognition (Xu, Thompson & Pfingst, 2005). Nie, Barco and Zeng (2006) performed a study with CI adults and showed that percent correct scores for consonant recognition vary with stimulation rate. Consonant recognition in quiet improved as the rate of stimulation increased.

The temporal envelope/temporal fine structure dichotomy does not seem to be as useful for studying the discrimination of vowel structure, which is mainly characterized by formants. Vowel perception relies on spectral resolution to resolve the formant pattern that distinguishes between vowels. Frontness is mainly defined by F2 and F3, aperture by F1 and F2, and nasality¹⁰ by a special low F1 formant, i.e. a second low frequency resonance in the vicinity of F1, and antiformants (Calliope, 1989). The reliance of frontness on relatively high frequencies, in the F2 and F3 regions, and of nasality on lower frequencies, in the F1 region, could explain the differences in reception between these features. This possibility is supported by the suggestion of Harnsberger, Svirsky et al. (2001) that vowel perception by CI users may be limited by the listener's formant frequency discrimination skills. Thus, differences in the reception of the different vowel features seem to be related to insufficient frequency

¹⁰ The French vocalic repertoire includes three to four nasal vowels depending on the dialect (Malmberg, 1971).

resolution rather than to differences in the balance between temporal envelope and temporal fine structure cues.

In summary, cochlear implant devices' superior transmission of temporal envelope cues as opposed to temporal fine structure cues might explain the unequal reception of different consonant features, namely the better reception of manner and voicing as opposed to nasality and place. However, differences between vowel features, namely the better reception of frontness than nasality, seem to be better explained by insufficient frequency resolution.

1.3. The present study

In summary, previous studies provide some evidence that child CI users have a deficit in feature perception when compared to NH children. However, the relevant evidence was collected several years ago; the latest study, by Geers et al. dates to 2003, and technology has since progressed considerably. The processing strategies in the cochlear implants studied by Tye-Murray et al (1995), for example, were not as effective in conveying speech information as those of today. Further, there are no clear indications about the nature of this deficit. While previous studies suggest a deficit in the precision of the processes involved in feature discrimination and identification, little is known about a possible deficit in categorical perception, i.e. a possible deficit in the relationship between discrimination and identification. Although previous results suggest that categorical perception of the voicing feature is not impaired in CI children (Medina & Serniclaes, 2009), the question of whether this finding can be generalized to the other vowel and consonant features remains open. As previous results also suggest a fairly general deficit in categorical precision in CI children, one might wonder whether their categorical perception of the different consonant and vowel features is preserved. The present study addresses these issues for the main phonological features in French (place, voicing, nasality and manner for consonants; nasality, aperture and frontness

for vowels). Finally, the need to investigate and compare the ability to categorize speech sounds in young CI users is reinforced by the repeated demonstration of the role of categorical perception in reading acquisition (Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, & Sprenger-Charolles, 2008; Serniclaes, Van Heghe Mousty, Carré & Sprenger-Charolles, 2004; Godfrey, Syrdal-Lasky, Millay & Knox, 1981).

The aim of the present study is to obtain a comprehensive picture of the perception of different consonant and vowel features by children with cochlear implants. We questioned whether the absence of categorical perception deficits evidenced in a previous study (Medina & Serniclaes, 2009) with a limited set of features might be generalized to the whole set of features present in a language. We also aimed to determine whether the severity of categorical precision deficits varies between features, in order to draw possible links with cochlear implants' transmission of different speech cues. Two different hypotheses were tested:

Hypothesis 1. In accordance with previous results, CI children will *not* exhibit a lesser degree of categorical perception than NH children, in spite of a hearing deprivation period. We used the classical procedure for assessing categorical perception, which consists in converting the identification scores into “expected” discrimination scores-i.e. the amount of discrimination, which would be expected from their classification into different categories-before comparing them with the observed discrimination scores.

Hypothesis 2. CI children will exhibit a lesser degree of categorical precision than NH children, with the degree of categorical precision deficit depending on the phonological feature. The assessment of categorical precision was based on the mean values of the discrimination and identification scores (whereas categorical perception assessment was based on the difference between the discrimination and identification scores).

1.4. A simplified methodology for assessing categorical perception

Assessing the categorical perception of seven different features would be a formidable task with the usual methodology. Instead of using stimulus continua, we used minimal word pairs for assessing categorical perception. This simplified method is quite different from the usual one but, we believe, is entirely appropriate for measuring the degree of categorical perception.

As we have seen, what is essential for the definition of categorical perception is the relationship between identification and discrimination. With the classical definition of categorical perception (Liberman et al., 1957), there is no need to separate within- and across-category *pairs* of stimuli. In fact, within- and across-category pairs are not entirely separable unless there is a stepwise identification function (i.e. there is a jump from 0 to 100% between two successive stimuli) along some stimulus continuum. Without stepwise identification, all the stimuli belong at various degrees to both categories, and there is no clear-cut separation between within- and across-category pairs. Each pair is a compound of across-category and within-category pair. Hopefully, categorical perception assessment does not need to segregate the within-category pairs from across-category ones: the classical method for assessing the degree of categorical perception is to compare the actual discrimination performance (observed discrimination) with the one afforded by differences in identification (expected discrimination) for each pair. The expected discrimination afforded by each single pair depends on the across- vs. within-category balance inside the pair (i.e. when both stimuli in a AX pair collect either 0 or 100 % identification scores there is 0% expected discrimination, and the percentage of expected discrimination increases with the difference between the identification scores of the stimuli inside the pair).

With this classical definition there is also no need for a stimulus continuum to assess categorical perception. A single pair is sufficient to compare discrimination and identification. Although categorical perception experiments have always (as far as we know) used pairs of

stimuli varying along some continuum, this was due to the reduction of categorical perception to sensory discontinuities and is by no means compulsory. Keeping in mind that each pair is a mixture of across-category and within-category pair, a single pair can already give sufficient information for comparing discrimination and identification performance. We do not need a continuum and a boundary. All that is needed is an ambiguous pair to keep performance from being asymptotic (ceiling effects). Therefore, to assess categorical perception with minimal pairs of natural speech stimuli as we did in the present study is entirely coherent with the definition of categorical perception, although as far as we know this is a completely new procedure. By comparison with the usual “continuum” paradigm, this new “minimal pairs” paradigm is much simpler because it makes it possible to considerably reduce the size of the experiment. This is an important advantage for research studies of broad scope like this one, and also for clinical studies.

2. Methods

The present study was designed to investigate CI children’s capacity to discriminate and to identify meaningful minimal pairs. Their performance was compared to that of NH children matched for listening age³. The stimuli were words and minimal pairs, comprising all the vowel and consonant features of French.

2.1. Participants

Twenty-five children with unilateral cochlear implants (11 boys and 14 girls) were recruited from 15 French institutes for the deaf located in different regions of France. All the children were congenitally deaf, had used a cochlear implant device for at least 5 years, and had been fitted with an implant before the age of 3;6 years. The implant was either the

³ The listening age was defined in terms of a child’s “aging” or maturity in listening once he has access to sound via a cochlear implant. A child who is 6 years old and has had an implant for 3;6 years would be expected to demonstrate auditory skills similar to a 3;6-year-old, not a six-year-old.

Clarion⁴ (Advanced Bionics), the Nucleus⁵ (Cochlear Corporation) or the Digisonic⁶ (Neurelec). Children recruited ranged from 7;11 to 11;6 years, and from grades 2 to 4. Age at implantation ranged in age from 1;10 to 3;6 years. Only one child had deaf parents. Table 1 describes the characteristics of each of the participants with cochlear implant. Before implantation, all children used conventional hearing aids and were still using them-even if only occasionally-in their non-implanted ear. During the speech perception tests, the hearing aid was taken off in order to prevent any sound from being perceived by the contralateral ear.

Before and after implantation, 9 out of 25 children used cued speech (early and intensive practice), and 11 children out of the remaining children used only spoken language, i.e. they exclusively used speech and audition to communicate. Five children had used spoken language and cued speech starting in grade 1. In our study, 19 out of 25 children were enrolled in mainstream classes with hearing children. Six children were in a spoken language classroom in a deaf school (special education with spoken language instruction).

Chronological age (years; months)	Age at implantation (years; months)	Length of cochlear implant use (years; months)	Type of device	Communication mode	Educational Placement
Mean and standard deviation in parentheses					
9;1 (1;1)	2;7 (0;9)	6;6 (1;1)	12 Nucleus Freedom	9 early and intensive Cued Speech + oral	6 special education
			4 Nucleus Sprint	11 oral	
			1 Digisonic	5 late Cued Speech + oral	19 mainstream

⁴ Clarion: The implant has 16 intracochlear electrodes. The implant uses CIS or SAS strategy. The CIS strategy covers the frequency band 350-6800 Hz. Each channel has an update rate of 833 pulses/s (pps). The frequency range of SAS strategy is 250-6800 Hz and a maximum of eight channels are available. The update rate is approximately 13000 pps.

⁵ Nucleus 24: The Nucleus 24 electrodes array contains 22 intracochlear electrodes and two extracochlear ground electrodes that permit up to 20 channels of information. The implant uses SPEAK, CIS or ACE strategy. The update rate is approximately 14400 pps. Just as the CIS, the ACE strategy has a higher rate of stimulation as compared to SPEAK, ranging between 500 and 2400Hz

⁶ Digisonic: The implant has 20 electrodes on an array of 25 mm and all 20 electrodes can be activated. The default frequency distribution of the implant is 195-8003Hz. The stimulation rate may be set between 260 and 1000 pps per electrode in the SP. The implant uses main peak interleaved sampling (MPIS) strategy.

Table 1. Characteristics of children with cochlear implant (CI)

Each child with CI was matched with one NH child with the same listening age to compare the performance of the two groups. All the NH children met the following criteria: (a) they were native speakers of French, and (b) they had no history of auditory and language disorders. All families, both those of CI children and those of NH children, were informed about the goals of the study, and provided written consent before the participation of their child.

As indicated in Table 2, the chronological age of CI group was significantly higher than that of the NH group ($t(25)=9.8$; $p<.001$). The listening age of the CI group and NH controls did not differ significantly ($t(25)<1$). Only children whose nonverbal cognitive development was considered to be within normal limits using a nonverbal reasoning test from progressive matrices (PM47, Raven, 1947) participated in the study. As indicated in Table 2, the scores of all children were within the normal range.

	Chronological Age		Listening Age		PM 47		P
	Years;months	p	Years;months	p	Number of correct responses /36	Percentiles	
CI	9;1 (1;1)	***	6;6 (1;1)	>.20	27	75	>.20
NH	6;4 (1;2)		6;4 (1;2)		25	75	

Table 2: mean and standard deviation (in parentheses) of cochlear implant (CI) and normal hearing (NH) participants' chronological age, listening age and non-verbal IQ level.

2.2. Experimental tasks

Two tasks were administered in order to assess subjects' discrimination and identification skills. Possible differences between groups in categorical perception must be dissociated from differences in the precision of phonemic boundaries, the latter being assessed by the magnitude of identification scores (the better the d' score, the higher the precision). In order to assess categorical perception while ruling out effects due to differences in categorical precision, we used the classical criterion of comparing the observed discrimination scores to

those predicted from the identification responses (Liberman et al., 1957). Categorical perception is perfect when the observed discrimination scores coincide exactly with those expected from identification; the degree of categorical perception is assessed by the difference between the observed and expected discrimination data. The smaller the difference between the observed and predicted scores, the better the categorical perception would be.

According to the original definition (Liberman et al., 1957), observed discrimination scores correspond to actual discrimination responses (e.g. the correct discrimination scores of d' transforms of stimulus pairs in an AX discrimination task), whereas expected discrimination scores are derived from identification responses (e.g. the identification scores of the same stimuli presented individually).

For all the tests, the children could potentially use lip-reading to understand instructions, but the items were pre-recorded to ensure that they listened to the stimuli without the help of lip-reading. This precaution is important because lip-reading has been shown to have an effect on speech perception in both deaf children (O'Donoghue, Nikolopoulos & Archobold, 2000; Bergeson, Pisoni & Davis, 2003; Bergeson, Pisoni & Davis, 2005; Lachs, Pisoni & Kirk, 2001; Leybaert & Colin, 2007; Spencer & Tomblin, 2009; Tyler, Fryauf-Bertschy, Kelsay, Gantz, Woodworth & Parkinson, 1997) and normal-hearing children (McGurk & MacDonald, 1976).

Discrimination task. Measures of speech feature discrimination for both consonants and vowels were obtained for both groups of subjects. This test used a two-alternative forced choice procedure. The stimuli were presented in pairs (AX format), comprising either different stimuli (e.g. for the /b/-/m/ contrast, “mouche”-“bouche” or “bouche”-“mouche”) or the same stimuli presented twice (either “bouche” or “mouche” twice in a row). Pairs of stimuli were thus, for example, “mouche”-“bouche”, “mouche”-“mouche”, “bouche”-“bouche”, and “bouche”-“mouche”. The child heard the two words spoken successively, with

a 100-ms interval between them. They had to indicate whether the stimuli within each pair were the same (either “bouche” or “mouche” twice) or different (e.g. “mouche”-“bouche” or “bouche”-“mouche”). There were 140 different pairs (70 stimulus conditions x 2 orders) and 140 same pairs.

We used one list of CVCV or CVC words pairs recorded by a female French speaker. This list assessed all features defining consonants (e.g. place, voicing, manner, nasality) and vowels (e.g. frontness, nasality, aperture). Pairs of stimuli were, for example:

- voicing: “poule”-”boule”;
- consonant nasality: “bouche”-“mouche”;
- manner: “vol”-“bol”;
- place of articulation: “bouche”-“douche”;
- frontness: “pull”-“poule”;
- aperture: “cil”-“salle”; and
- vowel nasality: “baton”-”bateau”.

The words chosen were drawn from Manulex (Lété, Sprenger-Charolles, Colé, 2004) and are very frequent, occurring one and a half times in every 100 words, which corresponds to a standard frequency effect of 85 (MANULEX, Lété et al., 2004). However, it should be kept in mind that the acoustic correlate of a phonological feature varies as a function of the context of the adjacent and simultaneous features. For instance, voicing cues change as a function of the vocalic aperture (an adjacent feature) and the mode of articulation (a simultaneous feature). However, the major cues remain the same across contexts despite changes in their relative perceptual weightings (negative and positive VOT for voicing; noise spectrum and formant transitions for place of articulation). Our word list is, thus, not entirely balanced on acoustic grounds, although the imbalance affects only the relative weightings of these major cues.

Discrimination responses were given by pressing one of two differently colored keys on the computer keyboard. A green button was used to indicate that the two stimuli in a pair were the same, and a red button to indicate that they were different.

Identification task. The items used in this task were the same as in the discrimination task. One word was presented on each trial (example: “mouche” or “bouche”), and children had to indicate whether the picture presented on the computer screen was the same as or different from the spoken word. Word-picture pairs included, for example: the word “mouche” (fly) with a picture of a fly, the word “bouche” (mouth) with a picture of a mouth, the word “mouche” (fly) with a picture of a mouth, and the word “bouche” (mouth) with a picture of a fly. Two of them corresponded to the response “same,” and 2 to the response “different.” There were 140 different pairs (70 stimulus conditions x 2 orders) and 140 same pairs. The colored button responses were the same as in the discrimination task.

This picture-matching task required participants to compare stored representations of two stimuli, a picture and a word. This task cannot be performed by comparing the stimuli (the response would inevitably and always be “different”) but only by comparing the associated labels. Discrimination on this task is thus entirely constrained by labels, which is *exactly* what would be expected in the case of perfect categorical perception. Therefore, discrimination performance is functionally equivalent to identification performance and, when compared with performance on unconstrained discrimination of spoken words, is perfectly suited to assessing categorical perception.

2.3. Procedure

CI and NH listeners were tested individually in a quiet room (at home and at school, respectively). They received all features (place, voicing, manner, and nasality for consonants;

frontness, nasality and aperture for vowels) during six sessions, which lasted around 20 minutes each. For all groups, both identification and discrimination tasks were presented in a random order and all AX pairs were presented only one time each in random order. In both tasks, we assessed the features, which define consonants (e.g. place, voicing, manner, nasality) and vowels (e.g. frontness, nasality, aperture).

Presentation was controlled by E-prime 2.0, running on a Dell PC. Stimuli were presented at an individual adapted comfortable level through headphones (Beyerdynamic DT290). The DT 290 is a double sided headphone headset with soft and large circumaural ear cups which cover ear and microphone. Before the test session, we first ensured that CI children were able to hear the stimuli. Children listened to several list of 10 very frequent words (examples: “chat”-“cat”, “jambe”- “leg”, “petit”-“little”, “maison”-“house”, “enfant”-child”, “rat”-“rat”, “ours”-“bear”, “rouge”- “red”, “vélo”-“bike” and “neige”-“snow”) at a comfortable level through headphones (70 dB). They had to repeat one list and we considered that the hearing level of the CI children was sufficient if they repeated at least 80% of the words correctly. When they repeated less than 80% of the words correctly, another list of words was presented again with the level increased by 5dB. The stimuli were presented at 75 dB for 19 CI children and at 80 dB for 6 others CI children.

2.4. Data Analysis

The discrimination and identification responses collected for each of the seven feature contrasts, four for consonants and three for vowels, were converted into d' scores by taking the difference between the normal deviate (z-value) corresponding to the proportion of correct change detection (i.e., the proportion of "different" responses to the "different" pairs or "hits") and the proportion of false alarms (i.e., the proportion of "different" responses

delivered in no change trials; as in Hary & Massaro, 1982; see equation 1⁷). As 0% and 100% scores correspond to infinite z-values, response scores were adjusted following the classical procedure described by Macmillan & Creelman (2005) before conversion into z-values. Response scores above 50% were reduced by 1.25% (with 40 responses per couple of pairs, 1.25% corresponds to one half of the precision of the response scale, i.e. one half of 1/40), and those below 50% were increased by 1.25%. Finally, d' on discrimination and identification tasks was computed for each participant and each feature.

According to the original definition, there is categorical perception when discrimination of stimuli varying along some continuum depends on identification (Lieberman et al., 1957). Categorical perception is perfect when observed discrimination scores coincide with those expected from identification, and the degree of categorical perception is characterized by the difference between observed and expected discrimination scores. Observed discrimination scores correspond to actual discrimination responses (e.g. the correct discrimination scores, or d' transforms of stimulus pairs in an AX discrimination task) whereas expected discrimination scores are derived from identification responses (e.g. the identification scores of the same stimuli presented individually).

The expected and observed discrimination scores were converted into d' values using the same procedure and the d' scores were entered into a repeated-measures analysis of variance (ANOVA). The design of the ANOVA run on the discrimination and identification scores comprised Task (observed vs. expected) and Phonetic Feature (voicing vs. consonant nasality vs. manner vs. place vs. aperture vs. frontness vs. vowel nasality) as within-subjects factors and Group (cochlear implant vs. normal hearing) as a between-subjects factor.

Differences in categorical perception between groups were tested with the Task x Group and Task x Group x Feature interactions. Differences in categorical precision between

⁷ Equation 1 : $d' = z(\text{hit}) - z(\text{false alarm})$

groups were tested with the Group effect and with the Group x Feature interaction. Differences in categorical perception and categorical precision between features were tested with planned comparisons.

3. Results

Response Accuracy

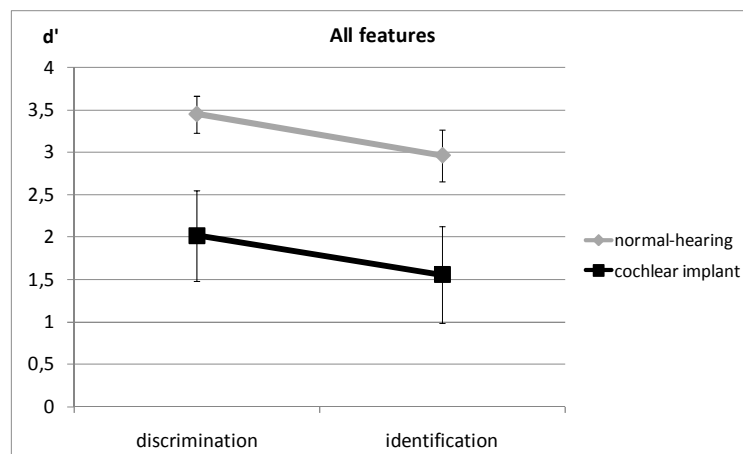


Figure 1. Discrimination and identification scores for cochlear implant and normal-hearing children.

Figure 1 presents mean discrimination scores, both observed and expected from the identification responses (expressed in d' values), for each group and all features taken together. Figure 2 presents the mean d' for each group and each task for each of the seven different phonetic features tested (consonants in the top panel, vowels in the bottom panel). These results were tested with a Task x Feature x Group repeated measures ANOVA. Among the main effects, significant effects were found for Group ($F(1,48) = 47.2$; $p < .001$), Task ($F(1,48) = 35.3$; $p < .001$), and Phonetic Feature ($F(6,288) = 6.64$; $p < .001$). Among the interactions, only the Group x Feature interaction was significant ($F(6,288) = 3.36$; $p < .01$). The group effect was due to the NH children's greater observed and expected scores compared to the CI children. The Task effect indicates that categorical perception was not perfect: this was due to greater observed than expected discrimination scores (see Figure 1). However, the difference between the expected and observed discrimination scores was quite

similar for both groups (as evidenced by the parallel lines in Figure 1, and either parallel or nearly parallel lines in Figure 2). Neither the Group x Task interaction nor the Group x Task x Feature interaction was significant ($F < 1$; $F(6,288) = 1.08$; $p = .20$, respectively) indicating that there was no significant difference in categorical perception between the CI children and NH controls. The Group x Feature interaction was due to larger differences in both the expected and observed discrimination scores for some features, especially consonant and vowel nasality (see Figure 2).

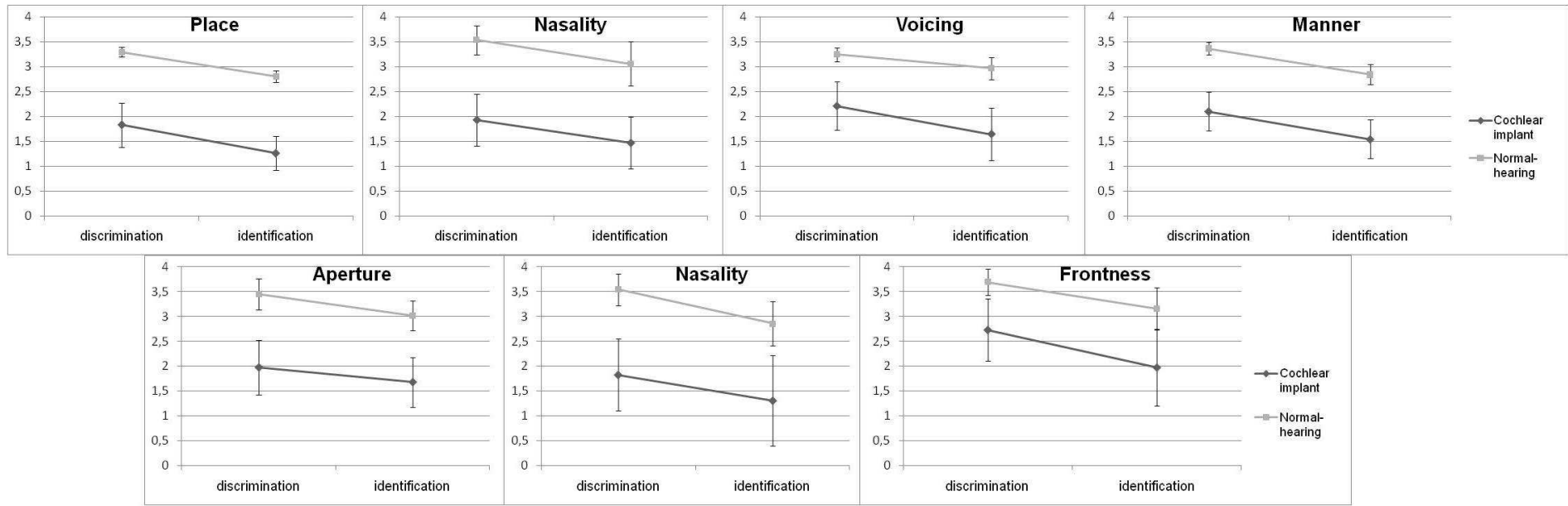


Figure 2. Discrimination and identification scores for cochlear implant and normal-hearing children for each articulatory feature. The first row presents consonant features and the second row presents vowel features.

In Figure 3 we present the differences between the two different groups (CI vs. NH) in mean d' scores for both identification and discrimination tasks, and for the seven different features under study (nasality, place of articulation, manner, and voicing for consonants; nasality, frontness and aperture for vowels).

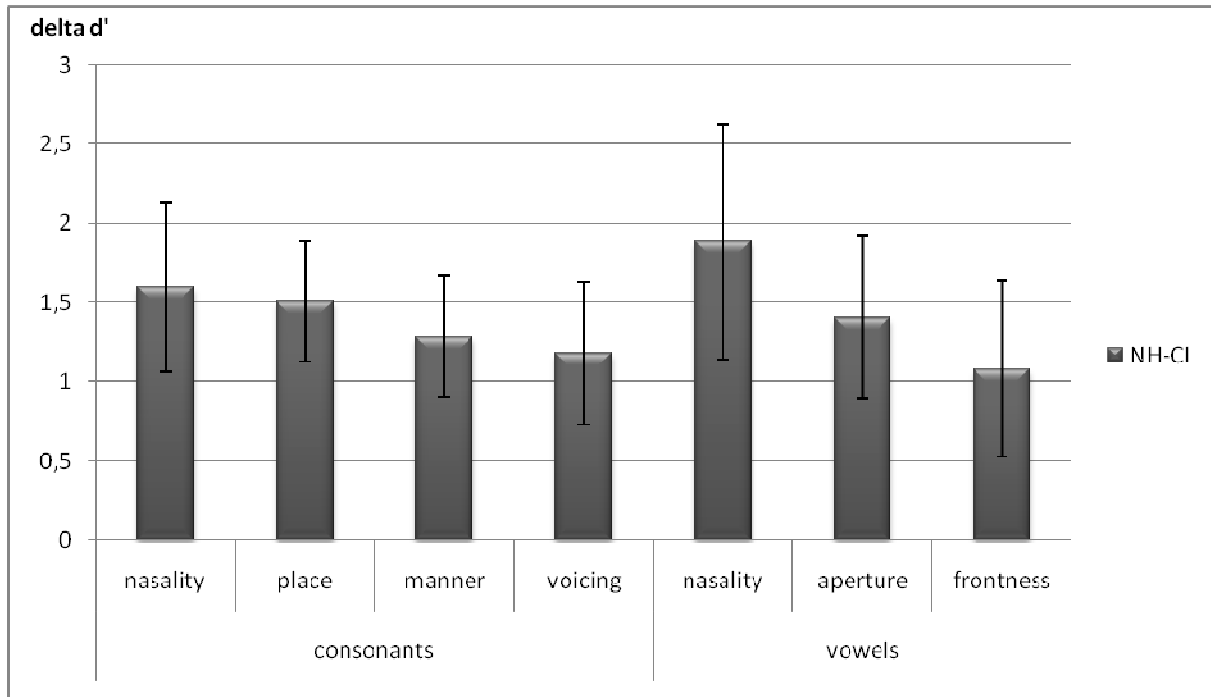


Figure 3. Differences between normal-hearing and cochlear implant children in mean d' scores for identification and discrimination tasks, for articulatory features of vowels and consonants.

We observed that the mean difference between groups for each feature is different from chance (Place: $t(24) = 8.4$; $p < .001$; Consonant Nasality: $t(24) = 6.4$; $p < .001$; Voicing: $t(24) = 1.2$; $p < .001$; Manner: $t(24) = 1.3$; $p < .001$; Aperture: $t(24) = 1.4$; $p < .001$; Vowels Nasality: $t(24) = 1.9$; $p < .001$; Frontness: $t(24) = 1.1$; $p < .001$). For each feature, the accuracy scores of CI children are lower than those of NH children.

Figure 3 shows that, for consonant features, the differences between groups are larger for nasality and place than for voicing and manner. Newman-Keuls comparisons indicated significant differences between nasality and manner ($p < .05$), place and manner ($p = .05$), nasality and voicing ($p < .01$), and place and voicing ($p < .05$), but no significant

difference between nasality and place ($p > .20$) or manner and voicing ($p > .20$). This is compatible with the results of previous study suggesting a larger deficit for nasality and place compared to manner and voicing (Tye-Murray et al., 1995). For vowel features, Newman-Keuls comparisons indicated significant differences between nasality and aperture ($p < .05$) and nasality and frontness ($p < .05$), but not between aperture and frontness ($p > .20$). Thus, there was a larger deficit for nasality compared to aperture and frontness. Previous study suggested that the deficit should also be larger for aperture vs. frontness, a difference which was present as a trend in our results (see Figure 3) but was not significant (Medina & Serniclaes, 2009).

In summary, these results show that for both the CI children and NH controls the observed discrimination scores were larger than those expected from identification. This means that categorical perception was not perfect. The magnitude of the difference between the two tasks did not depend on the group, which means that CI children and NH children matched for listening age show equivalent categorical perception skills. However, d' for both identification and discrimination were lower for CI children than for NH children, indicating a lower level of categorical precision. Differences between features showed that for consonants, CI children have more difficulty perceiving nasality and place than manner and voicing; for vowel features, their difficulties are greater for nasality than aperture and frontness.

4. Discussion

The present study indicates that the categorical perception performance of children with cochlear implants is much the same as that of normal-hearing children for a fairly large set of different phonological features. The differences between observed and expected discrimination scores were fairly similar for CI and NH children, suggesting that discrimination was equally constrained by identification in both groups. However, CI children obtained lower discrimination and identification scores than NH children matched for listening age, indicating a lesser degree of categorical precision. Finally, this categorical

precision deficit was larger for some features than for others. The differences between groups in the precision of consonant perception were the smallest for manner and voicing and the largest for nasality and place. For vowel perception, differences in precision between groups were smallest for frontness and aperture, and largest for nasality.

4.1. Categorical perception vs. precision

Differences in categorical precision between NH and CI children, as well as the fact that the magnitude of the deficit depends on the feature, have already been evidenced in previous studies (Tye-Murray et al., 1995; Medina & Serniclaes, 2009). There have also been some indications as to the absence of differences in categorical perception with synthetic stimuli varying along a VOT continuum (Medina & Serniclaes, 2009). The present results make it possible to generalize these findings to a range of different consonant and vowel features in natural stimuli within a single study.

The present results indicate that the observed discrimination scores of both groups were larger than predicted from identification data. Categorical perception was thus not perfect, presumably due to the fact that discrimination can be based on all the acoustic differences between two sounds, whereas identification must be based on the particular acoustic differences that are relevant for making phonological distinctions. The important point for our purposes here is that the difference between discrimination and identification scores is similar in both groups, indicating that both groups exhibit the same degree of categorical perception. As explained in the Introduction, categorical perception depends on both sensory and cognitive factors, which jointly contribute to the coherence of identification and discrimination responses. In the course of perceptual development, categorical perception arises from the adaptation of universal boundaries (language-independent sensory discontinuities) to the phonological categories present in the environmental language (for review see: Hoonhorst et al., 2009). This is a very complex process through which fairly rigid

sensory discontinuities are integrated with other sensory cues and become much more flexible after exposure to the sounds of a particular language. The end-product is often far from being perfect: the sensory discontinuities can still act independently in various conditions, giving rise to discrepancies between discrimination and identification performance, i.e. to different degrees of non-categorical perception (Medina et al., in press). However, what is most significant to us is that the degree of non-categorical perception was not larger in CI children compared to NH children, indicating that they possess unimpaired phonological integration capacities.

Our data thus suggest that the initial potential for acquiring categorical perception remains fairly intact at the end of the deprivation period. The fact that we did not find any evidence for differences in categorical perception between CI children and controls is even more striking in light of the fact that there were significant differences in precision. Indeed, CI children obtained lower scores than NH children for each feature, indicating that the development of categorical precision in CI children is slower than in NH children. At first sight, the absence of a categorical perception deficit in CI children despite the persistence of a categorical precision deficit is rather surprising in light of results on speech development in NH children. Categorical perception has already been acquired at six years of age, if not earlier, whereas adult-like categorical precision performance is only attained at the beginning of adolescence (see Introduction; Medina et al., in press; Hoonhorst et al., 2011). If the deficit in precision was due to the absence of auditory stimulation before the implantation, the effect of auditory deprivation should be even larger on categorical perception because the latter property develops faster than precision. Therefore, early auditory deprivation does not seem to explain the precision deficit of CI children, nor can it explain the absence of a categorical perception deficit, probably because the sensitive periods for acquiring these properties are fairly flexible. This is in accordance with other studies, which have found that an early deprivation period does not influence the development of the auditory pathway and the central

auditory system if children receive a cochlear implant before 3;6 years of age (Ray, Gibson & Sanli, 2004; Sharma, Dorman & Kral, 2005).

As CI children's lower precision in the perception of phonological features does not seem to be the consequence of auditory deprivation before cochlear implantation, the explanation has to be sought elsewhere. Limitations in the transmission of acoustic cues by the cochlear implant might offer some insight on this issue.

4.2. Differences between features

While the present results suggest that the categorical precision deficit of CI children compared to NH children is not likely explained by the effects of an auditory deprivation period, the peculiarities of signal processing by the cochlear implant seem to be more relevant. Differences in categorical precision between NH and CI children might arise from differences between electrical and auditory stimulation. Indeed, different studies have shown that acoustic cues are transmitted with lesser accuracy by CI devices than by normal auditory stimulation (Dawson, McKay, Busby, Grayden & Clark 2000; Dorman & Loizou, 1997; Loizou, Dorman & Tu, 1999; Loizou, Poroy & Dorman, 2000). Furthermore, previous studies have demonstrated differences in the magnitude of perceptual deficits between phonological features (Tye-Murray et al., 1995; Medina & Serniclaes, 2009). The results of the present study confirm these findings and provide an overall picture of the reception of the different features in relation to the corresponding acoustic cues.

The present results reveal that, for consonant features, manner and voicing are better perceived by children using cochlear implant than nasality and place. These patterns of information reception are globally consistent with previous work on adult acoustic perception skills. The ordering of feature reception (manner = voicing > nasality = place) is reminiscent of the ordering of feature reception in Tye-Murray et al.'s (1995) study. The fact that we obtained much the same ordering some 15 years later, despite considerable changes in

processing strategies and sound processor technology, is worth highlighting. The simplest explanation for this ordering is that voicing and manner information are mainly conveyed by E cues, whereas place and nasality are mainly conveyed by TFS cues, as would be anticipated from acoustic and phonetic considerations (Rosen, 1992; Verschuur & Rafaely, 2001). However, a recent study suggests that for normal-hearing listeners, the degradation between E and TFS speech is lesser for voicing and nasality than for manner and place (Bertoncini, Serniclaes & Lorenzi, 2009). Clearly, the relationship between each feature and the E vs. TFS cues needs further investigation and might be of relevance to the transmission of consonant features by cochlear implants. It would be worthwhile quantifying individual differences in the acoustic limitations of the CI devices through psychoacoustic measures of sensitivity to temporal fine structure and envelope cues (as in: Won, Drennan, Kang & Rubinstein, 2010) and to rely them to differences in categorical precision.

It is difficult to explain differences in the reception of vowel features based on the dichotomy between E and TFS cues. Vowel perception relies on spectral resolution to resolve the formant pattern that distinguishes between vowels, which seems to imply that all vowel features are mainly defined by TFS cues. Rather, differences in perceptual precision between vowel features are better explained by the consequences of insufficient frequency resolution (see Introduction: Harnsberger et al., 2001). These consequences are more important for the neural coding of low-frequency formants, and should therefore more severely affect nasality, which depends on the transmission of low-frequency energy in the F1 region, than frontness which depends on relatively high-frequency energy in the F2 and F3 regions (e.g. Calliope, 1989). We found that not only frontness but also aperture were better perceived than nasality, which corresponds in part to our expectations. However, Tyler, Preece, Lansing and Gantz (1992) and Fitzgerald, Shapiro, McDonald, Neuburger, Ashburn-Reed, Immerman, et al. (2007) suggested that information about the F1 frequency, which is the main acoustic correlate of aperture, was transmitted better than F2 and F3 frequencies, which are the main

acoustic correlates of frontness. The contradictions between these studies suggest that performance in feature perception varies as a function of various factors, such as differences in the electrophysiological profiles of the CI users and perhaps also the kind of CI device. It is also consistent with the fact that there is no simple one to one correspondence between acoustic and phonetic properties.

4.3. Conclusion

The present study suggests that CI children present the same degree of categorical perception as normal-hearing children. However, categorical precision is lower for CI children than for NH children matched for listening age. This finding is important because it cannot be easily explained by auditory deprivation before implantation. If auditory deprivation played an important role in the deficits of the CI children in this study, it should have stronger effects on categorical perception than on categorical precision because categorical precision develops more slowly than categorical perception in NH children (Hoonhorst et al. 2009, 2011). It would thus seem that the sensitive period for development of categorical perception is restricted to the first 1-2 years of life. The sensitive period may be significantly longer. Among all possible factors, the origins of the precision deficit could be originate both in limitations in cochlear implants' transmission of acoustic cues and frequency resolution.

References

- Abramson, A.S. & Lisker, L. (1985). Relative power of cues: F0 shift vs. voice timing. In V. Fromkin (Ed), *Phonetic Linguistics: Essays in Honor of Peter Ladefoged* (pp. 25-33). New York: Academic Press.
- Baptista, L.F., & Petrinovich, L. (1986). Song development in the white crowned sparrow: social factors and sex differences. *Animal Behaviour*, *34*, 1359-1371
- Bergeson, T., Pisoni, D., & Davis, R. (2003). A longitudinal study of audiovisual speech perception by children with hearing loss who have cochlear implants. *Volta Review*, *103*, 347-370.
- Bergeson, T., Pisoni, D., & Davis, R. (2005). Development of audiovisual comprehension skills in prelingually deaf children with cochlear implants. *Ear and Hearing*, *26*(2), 149-164.
- Bertoncini, J., Serniclaes, W., & Lorenzi, C. (2009). Discrimination of speech sounds based upon temporal envelope versus fine structure cues in 5-to-7 year-old children. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, *52*(3), 682-695.
- 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.
- Brainard, M.S., & Knudsen, E.I. (1998). Sensitive periods for visual calibration of the auditory space map in the barn owl optic tectum. *Journal of Neurosciences*, *18*, 3929-3942.
- Burnham, D. K., Earnshaw, L. J., & Clark, J. E. (1991). Development of categorical identification of native and non-native bilabial stops: infants, children and adults. *Journal of Child Language*, *18*(2), 231-260.
- Burns, T., Yoshida, K., Hill, K., & Werker, J. (2007). The Development of Phonetic Representation in Bilingual and Monolingual Infants. *Applied Psycholinguistics*, *28*, 455-474.
- Calliope. (1989). *La parole et son traitement automatique*. Paris: Masson.
- Chatterjee, M., & Shannon, R.V. (1998). Forward masked excitation patterns in multi-electrode electrical stimulation. *Journal of the Acoustical Society of America*, *103*(5), 2565-2572.
- Chen, H., & Zeng, F.G. (2004). Frequency modulation detection in cochlear implant subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *116*(4), 2269-2277.
- Damper, R. I. and Harnad, S. R. (2000) Neural network modeling of categorical perception. *Perception and Psychophysics*, *62*(4). pp. 843-867.
- Dawson, P., McKay, C., Busby, P., Grayden, D., & Clark, G. (2000). Electrode discrimination and speech perception in young children using cochlear implants. *Ear and Hearing*, *21*(6), 597-607.
- Dorman, M., & Loizou, P. (1997). Speech intelligibility as a function of the number of channels of stimulation for normal-hearing listeners and patients with cochlear implants. *The American Journal of Otology*, *18*(6 Suppl), S113-114.
- Dorman, M., Loizou, P., Spahr, A., & Maloff, E. (2002). Factors that allow a high level of speech understanding by patients fit with cochlear implants. *American journal of audiology*, *11*(2), 119-123.
- 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*(4), 1692-1707.
- Eilers, R.E., Gavin, W., & Wilson, W.R. (1979). Linguistic experience and phonemic perception in infancy: a crosslinguistic study. *Child Development*, *50*(1), 14-18.

- Elliott, L.L., Longinotti, C., Meyer, D., Raz, I., & Zucker, K. (1981). Developmental differences in identifying and discriminating CV syllables. *Journal of the Acoustical Society of America*, *70*, 669-677.
- Elliott, L.L., Busse, L.A., Partridge, R., Rupert, J., & de Graaf, R. (1986). Adult and child discrimination of CV syllables differing in Voice Onset time. *Child Development*, *57*, 628-635.
- Eimas, P.D., Siqueland, E.R., Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science*, *171*, 303-306.
- Faulkner, A., Rosen, S., Moore, B.C.J. (1990). Residual frequency selectivity in the profoundly hearing-impaired listener. *British Journal of Audiology*, *24*, 381-392.
- Fitzgerald, M.B., Shapiro, W.H., McDonald, P.D., Neuburger, H.S., Ashburn-Reed, S., Immerman, S., et al. (2007). The effect of perimodiolar placement on speech perception and frequency discrimination by cochlear implant users. *Acta Oto-Laryngologica*, *127*(4), 378-383.
- Fu, Q., & Shannon, R. (2000). Effect of stimulation rate on phoneme recognition by nucleus-22 cochlear implant listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *107*(1), 589-597.
- Geers, A., Brenner, C., & Davidson, L. (2003). Factors associated with development of speech perception skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing*, *24*(1 Suppl), 24S-35S.
- Gervain, J. & Mehler, J. (2010). Speech Perception and Language Acquisition in the First Year of Life. *Annual Review of Psychology*, *61*, 191-218.
- Godfrey, J., Syrdal-Lasky, A., Millay, K., & Knox, C. (1981). Performance of dyslexic children on speech perception tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, *32*(4), 401-424.
- Harnsberger, J.D., Svirsky, M.A., Kaiser, A.R., Pisoni, D.B., Wright, R., Meyer, T.A. (2001). Perceptual "vowel spaces" of cochlear implant users: implications for the study of auditory adaptation to spectral shift. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *109*(5), 2135-2145.
- Hary, J.M., & Massaro, D.M. (1982). Categorical results do not imply categorical perception. *Perception and Psychophysics*, *32*, 409-418.
- Hazan, V., & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6-12. *Journal of Phonetics*, *28*, 377-396.
- Hoonhorst, I., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., Deltenre, P., & Serniclaes, W. (2009). French native speakers in the making: from language-general to language-specific voicing boundaries. *Journal of Experimental Child Psychology*, *104*, 353-366.
- Hoonhorst, I., Medina, V., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., Deltenre, P., & Serniclaes, W. (accepted). The development of categorical perception: comparisons between voicing, colors and facial expressions, *Speech Communication*.
- Knudsen, E.I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior, *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(8), 1412-1425.
- Kral, A., & Eggermont, J.J. (2007). What's to lose and what's to learn: Development under auditory deprivation, cochlear implants and limits of cortical plasticity. *Brain Research Review*, *56*(1), 259-269.
- Krause, S.F. (1982). Vowel duration as a perceptual cue to post-vocalic consonant voicing in young children and adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, *71*, 990-995.
- 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., & Miller, J.D. (1978). Speech perception by the chinchilla: Identification functions for synthetic VOT stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63, 905-917.
- Kuhl, P.K., Conboy, B.T., Coffey-Corina, S., Padden, D., Rivera-Gaxiola, M., & Nelson, T. (2008). Phonetic learning as a pathway to language: New data and native language magnet theory expanded (NLM-e). *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363, 979-1000.
- Lachs, L., Pisoni, D., & Kirk, K. (2001). Use of audiovisual information in speech perception by prelingually deaf children with cochlear implants: a first report. *Ear and Hearing*, 22(3), 236-251.
- Leybaert, J., & Colin, C. (2007). Le rôle des informations visuelles dans le développement du langage de l'enfant sourd muni d'un implant cochléaire. *Enfance*, 59(3), 245-253.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L. & Colé, P. (2004). MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 36(1), 156-166.
- Liberman, A., Harris, K., Hoffman, H., & Griffith, B. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of experimental psychology*, 54(5), 358-368.
- Loizou, P., Dorman, M., & Tu, Z. (1999). On the number of channels needed to understand speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4), 22097-2103.
- Loizou, P., Poroy, O., & Dorman, M. (2000). The effect of parametric variations of cochlear implant processors on speech understanding. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(2), 790-802.
- Macmillan, N.A., Kaplan, H.L., & Creelman, C.D. (1977). The psychophysics of categorical perception. *Psychological Review*, 84, 452-471.
- Macmillan, N., & Creelman, C. (2005). *Detection Theory: A User's Guide* (Lawrence Erlbaum.). London.
- Maye, J., Weiss, D.J., & Aslin, R.N. (2008). Statistical phonetic learning in infants: Facilitation and feature generalization. *Developmental Science*, 11, 122-134.
- Maye, J., Werker, J.F., & Gerken, L. (2002). Infant sensitivity to distributional information can affect phonetic discrimination. *Cognition*, 82(3), B101-B111.
- McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746-748.
- Medina, V., Hoonhorst, I., Bogliotti, C., & Serniclaes, W. (in press). Development of voicing perception in French: Comparing adults, adolescents and children. *Journal of Phonetics*.
- Medina, V., & Serniclaes, W. (2009). Consecuencias de la categorización fonológica sobre la lectura silenciosa de niños sordos con implante coclear. *Revista de Logopedia, Foniatría y Audiología*, 29(3), 186-194.
- Nie, K., Barco, A., & Zeng, F. (2006). Spectral and temporal cues in cochlear implant speech perception. *Ear and Hearing*, 27(2), 208-217.
- O'Donoghue, G., Nikolopoulos, T., & Archbold, S. (2000). Determinants of speech perception in children after cochlear implantation. *Lancet*, 356(9228), 466-468.
- Qin, M.K., & Oxenham, A.J. (2003). Effects of simulated cochlear-implant processing on speech reception in fluctuating maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(1), 446-454.
- Raven, J. (1947). *Coloured Progressive Matrices* (Lewis.). London.
- Ray, J., Gibson, W.P., Sanli, H. (2004). Role of auditory stimulation in maturation of the auditory pathway. *Acta Otolaryngology*, 124(6), 695-9.

- Rivera-Gaxiola, M., Silva-Pereyra, J., & Kuhl, P.K. (2005). Brain potentials to native and non-native speech contrasts in 7- and 11-month-old American infants. *Developmental Science*, 8(2), 162-172.
- Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 336, 367-373.
- Ross, M., & Lerman, J. (1971). *Word intelligibility by picture identification*. Pittsburgh: Stanwix House.
- Saerens, M., Serniclaes, W., and Beeckmans, R. (1989). Acoustic versus contextual factors in stop voicing perception in spontaneous French. *Language and Speech*, 32, 291-314.
- 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(4), 336-361.
- Shannon, R., Zeng, F., Kamath, V., Wygonski, J., & Ekelid, M. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270(5234), 303-304.
- Sharma, A., Dorman, M.F., Kral, A. (2005). The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants. *Hearing Research*, 203, 134-43.
- Simon, C., & Fourcin, A. (1978). Cross-Language study of speech-pattern learning. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63, 925-935.
- Spencer, L.J., & Tomblin, J.B. (2009). Evaluating phonological processing skills in children with prelingual deafness who use cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14(1), 1-21.
- Stevens, K.N. (2000). Diverse Acoustic Cues at Consonantal Landmarks. *Phonetica*, 57, 139–151.
- Stickney, G.S., Zeng, F.G., Litovsky, R., & Assmann, P. (2004). Cochlear implant speech recognition with speech maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2), 1081-1091.
- Strange, W., & Dittmann, S. (1984). Effects of discrimination training on the perception of /r-/l/ by Japanese adults learning English, *Perception and Psychophysics*, 36, 131-145.
- Tye-Murray, N., Spencer, L., & Gilbert-Bedia, E. (1995). Relationships between speech production and speech perception skills in young cochlear-implant users. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2454-2460.
- Tyler, R.S., Fryauf-Bertschy, H., Kelsay, D.M., Gantz, B. J., Woodworth, G.P., & Parkinson, A. (1997). Speech perception by prelingually deaf children using cochlear implants. *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 117(3), 180-187.
- Tyler, R.S., Preece, J.P., Lansing, C.R., & Gantz, B.J. (1992). Natural vowel perception by patients with the ineraid cochlear implant. *Audiology: Official Organ of the International Society of Audiology*, 31(4), 228-239.
- Tyler, R., Fryauf-Bertschy, H., & Kelsay, D. (1991). *Audiovisual Feature Test for Young Children* (The University of Iowa.). Iowa City.
- Verschuur, C., & Rafaely, V. (2001). An exploratory study into perception of acoustic speech cues by hearing-impaired adults. *British journal of audiology*, 35(3), 209-217.
- 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. (2005). Speech perception as a window for understanding plasticity and commitment in language systems of the brain. *Developmental Psychobiology*, 46, 233–251.

- Won, J.H., Drennan, W.R., Kang, R.S., & Rubinstein, J.T. (2010). Psychoacoustic abilities associated with music perception in cochlear implant users. *Ear and Hearing*, 31, 796-805.
- Xu, L., & Pfingst, B. (2008). Spectral and temporal cues for speech recognition: implications for auditory prostheses. *Hearing Research*, 242(1-2), 132-140.
- Xu, L., Thompson, C., & Pfingst, B. (2005). Relative contributions of spectral and temporal cues for phoneme recognition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(5), 3255-3267.
- Xu, L., & Zheng, Y. (2007). Spectral and temporal cues for phoneme recognition in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(3), 1758-1764.
- Zeng, F.G., Nie, K., Stickney, G.S., Kong, Y.Y., Vongphoe, M., Bhargave, A., Wei, C., Cao, K. (2005). Speech recognition with amplitude and frequency modulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(7), 2293-2298.
- Zlatin, M.A., & Koenigsnecht, R.A. (1975). Development of the voicing contrast: perception of stop consonants. *Journal of Speech and Hearing Research*, 18(3), 541-553.

The influence of lexical knowledge on phoneme discrimination in deaf children with cochlear implant¹

Sophie Bouton¹, Pascale Colé¹, and Willy Serniclaes²

¹ Université de Provence, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille

² CNRS & Université Paris-Descartes, Laboratoire Psychologie de la Perception, Paris

Résumé

L'objectif de cette étude est de déterminer si les informations lexicales influencent la discrimination de phonèmes chez les enfants munis d'un implant cochléaire, et si cette influence est similaire à celle mise en évidence chez les enfants normo-entendants. De précédentes études ont montré que les enfants implantés discriminent et identifient les phonèmes moins précisément que les enfants normo-entendants. Ces difficultés pourraient avoir une incidence sur l'utilisation de l'information lexicale dans la discrimination phonémique. Dans notre étude, les enfants implantés et normo-entendants appariés sur l'âge audio-perceptif ont réalisé une tâche de discrimination de paires minimales de mots (exemple : mouche/bouche) et de pseudo-mots (moute/boute). Les paires minimales différaient en fonction des traits vocaliques et consonantiques (exemple : nasalité, aperture, lieu d'articulation), afin de mettre en évidence de possibles interactions entre traitement acoustique/phonologique et traitement lexical. Les résultats montrent que les enfants implantés discriminent les mots et les pseudo-mots moins précisément que les enfants normo-entendants, et que l'amplitude de ce déficit varie en fonction des traits phonémiques. Cependant, la discrimination de mots est meilleure que la discrimination de pseudo-mots, et cet effet de lexicalité est équivalent entre enfants normo-entendants et enfants implantés. Les résultats indiquent également que l'effet de lexicalité de chaque groupe ne dépend pas des traits phonémiques.

Mots clés : perception de la parole, traits phonémiques, implant cochléaire, développement de la parole, effet de lexicalité.

¹ Paper submitted for publication in **Speech Communication**

Abstract

This paper addresses the questions of whether lexical information influences phoneme discrimination in children with cochlear implants (CI) and whether this influence is similar to what occurs in normal-hearing (NH) children. Previous research with CI children evidenced poor accuracy in phonemic perception, which might have an incidence on the use of lexical information in phoneme discrimination. A discrimination task with French vowels and consonants in minimal pairs of words (e.g., mouche/bouche) or pseudowords (e.g., moute/boute) was used to search for possible differences in the use of lexical knowledge between CI children and NH children matched for listening age. Minimal pairs differed in a single consonant or vowel feature (e.g., nasality, vocalic aperture, voicing) to unveil possible interactions between phonological/acoustic and lexical processing. The results showed that both the word and pseudoword discrimination of CI children are inferior to those of NH children, with the magnitude of the deficit depending on the feature. However, word discrimination was better than pseudoword discrimination, and this lexicality effect was equivalent for both CI and NH children. Further, this lexicality effect did not depend on the feature in either group. Our results support the idea that hearing deprivation period may not have consequence on lexical processes implied on speech perception.

Keywords: Speech Perception, Phonological Features, Cochlear Implant, Speech Development, Lexicality effect.

1. Introduction

An important question in the study of speech perception is how listeners rapidly decode highly variable acoustic signals into discrete and invariant phoneme categories. This question is important not only for our understanding of speech perception in normal conditions, but also in difficult conditions such as those facing users of cochlear implants (CI). Different studies show that CI children's phoneme perception is impaired (Geers, Brenner, and Davidson, 2003; Medina and Serniclaes, 2009; Tye-Murray, Spencer, and Gilbert-Bedia, 1995). In a previous study we showed that CI children's phoneme identification and discrimination are less precise than those of controls with the same amount of auditory experience (Bouton, Colé, Bertoncini, and Serniclaes, submitted). However, the degree of "categorical perception", i.e. the strength of the relationship between phoneme identification and discrimination, was similar in both groups. Although CI children's perceptual performance is weaker, which may be due to degraded incoming information, they seem to process this information in much the same way as normal-hearing (NH) children. If this contention is true, the various factors which normally contribute to speech perception should make the same contribution to speech perception with a CI. One of these factors is lexical knowledge: phonemic differences between words are better perceived than those between pseudowords (Fort, Spinelli, Savariaux, Kandel, 2010). The purpose of the present paper is to compare the effects of lexical knowledge in CI children and NH controls.

1.1. Lexical influences on speech perception

The ability to recognize speech relies on a number of underlying perceptual abilities. One of these is the ability to determine which of a particular language's inventory of phonemes has been uttered. The listener must make a decision based on the available acoustic evidence by decoding the phonological features which distinguish one phoneme from another

(Repp, 1984). Various studies have shown that lexical knowledge affects phoneme recognition in various different ways. There is ample evidence that perception of ambiguous speech sounds is influenced by lexical information. For stimuli varying along some acoustic continuum between a word and a nonword, the identification boundary is biased towards the word end of the continuum: for instance for stimuli varying along a VOT continuum, the boundary is shifted towards /t/ on a *task-dask* continuum and towards /d/ on a *tash-dash* continuum. Ganong (1980) was the first to use this paradigm, and a number of studies have subsequently used it (e.g., Van Linden, Stekelenburg, Tuomainen, and Vroomen, 2007; Norris, McQueen, and Cutler, 2003; Chiappe, Chiappe, and Siegel, 2001; Misiurski, Blumstein, Rissman, and Berman, 2005). Of particular importance for our purpose here, lexical information does not only *bias* but also seems to affect the *precision* of phoneme identification. A recent study shows that phonemes presented audiovisually are better recognized when they are contained in words rather than in pseudowords (Fort **, 2010). In our knowledge this is however the only study showing lexical influences on the precision of auditory phoneme identification (Note¹).

This body of work suggests that speech perception is generated by phonemic and lexical processes working in concert. Phonemic processes represent the full detail of the speech input, activating possible interpretations at multiple levels of representation. Recognition involves a multiple-constraint satisfaction process that selects the most appropriate interpretation of the current input from the activated set. Hence, categorical perception of speech, far from being achieved by phonemic processes at an early stage of the perceptual system, is an emergent property that arises from complex interactions between

¹ McMurray, Tanenhaus, Aslin, and Spivey (2003) demonstrated that the slope of the identification function on a VOT word continuum (bear/pear) was considerably *shallower* than on a pseudoword continuum (ba/pa), suggesting that phoneme identification is *less* precise in a lexical context. However, rather than reflecting an effect of lexical processing the shallower slope of phoneme identification function in words vs. pseudowords might be due to the fact the word items used in this study contained a larger number of phonemes than the pseudowords.

higher-level interpretative and lower-level acoustic processes. This combination of phonemic and lexical information flow is reminiscent of that which is proposed in the TRACE model of speech perception (McClelland and Elman, 1986). Similar processes are also suggested for distributed connectionist models such as the Distributed Cohort Model (DCM, Gaskell and Marslen-Wilson, 1997), which incorporate backpropagation or other error-driven learning algorithms. In both cases, lower-level perceptual computations are altered on the basis of influence from lexical knowledge.

1.2. Speech perception in CI children

Previous studies suggest that perception of speech sounds in CI children is less accurate than in normal-hearing (NH) children (Geers et al., 2003; Medina & Serniclaes, 2009; Tye-Murray et al., 1995). More precisely, one previous study showed that speech perception in CI children is characterized by severe impairment of categorical precision (precision in phoneme discrimination and identification) but normal acquisition of categorical perception (the interdependency between discrimination and identification abilities) (Bouton et al., submitted). Further, the impairment of categorical precision varies depending on phonemic features. For consonant features, manner and voicing are perceived more accurately than place and nasality, and for vowel features, aperture and frontness are perceived more accurately than nasality. There are basically two different possible explanations for this set of results.

Difficulties in perceiving speech with CI may be related to a hearing deprivation period which lasts from birth to cochlear implantation for children with profound congenital deafness. Phonemic categories result in the acquisition of phonemic features during the first year of life. The pre-linguistic child is endowed with the capacity to discriminate universal features irrespective of the language environment. These universal features are selected and

combined after exposure to the sounds of a specific language between 6 and 12 months of age (Eilers, Gavin & Wilson, 1979; Rivera-Gaxiola, Silva-Peyrera & Kuhl, 2005; Burns, Yoshida, Hill & Werker, 2007; Hoonhorst, Serniclaes, Collet, Colin, Markessis, Radeau & Deltenre, 2009a; Hoonhorst, Colin, Markessis, Radeau, Deltenre, & Serniclaes, 2009b). After this period, the phonological features which are present in the linguistic environment are better perceived than those present in other languages (Rivera-Gaxiola, Silva-Pereyra, & Kuhl, 2005; Burns, Yoshida, Hill, & Werker, 2007). For example, before 6 months old, French infants discriminate stimuli on the /də/-/tə/ continuum according to universal phonemic boundaries, whereas after 8 months, infants are sensitive to adult phonemic boundary which is specific to mother language. There is thus a rapid development of language-specific features before one year of age, by which time infants have developed adult-like feature discrimination. If this period corresponds to a critical or a sensitive period in the development of phonemic features perception in NH children (Knudsen, 2004) and to hearing deprivation period in CI children, it could explain CI children's difficulties perceive phonemes.

Difficulties in perceiving speech with CI may also be related to the degraded auditory input provided by CI devices (Shannon, Zeng, Kamath, Wygonski & Ekelid 1995; Dorman, Loizou, Spahr & Maloff, 2002; Xu & Zheng, 2006). Electrical stimulation of the auditory nerve by CI is currently the only established way to overcome the degradation of hair cells, but this stimulation can only deliver part of the information present in the acoustic speech signal. The CI device mainly delivers the spectro-temporal envelope (E) of the signal, following a tonotopic principle, and only limited amounts of temporal fine structure (TFS) (Shannon et al., 1995; Schatzer, Krenmayr, Au, Kals, & Zierhofer, 2010; Smith, Delgutte, & Oxenham, 2002). In French, four articulatory features define consonants (manner, voicing, nasality, and place) and three articulatory features characterize vowels (frontness, aperture, and nasality). Each phonemic feature depends on specific acoustic cues, which may be

supplied by CI devices to varying degrees. According to Bouton et al.'s (submitted) results, the simplest explanation for difficulties in phonemic feature perception is that voicing and manner information are mainly conveyed by E cues, whereas place and nasality are mainly conveyed by TFS cues, as would be anticipated from acoustic and phonetic considerations (Rosen, 1992; Verschuur & Rafaely, 2001).

The important implication of this view for previous results (Bouton et al., submitted) is that the innate potential for acquiring categorical perception may remain fairly intact at the end of the deprivation period. It is compatible with our data, which suggest that difficulties in categorical precision could be due to limitations in the transmission of acoustic cues by the CI device. Although perceptual deprivation does not seem to affect categorical perception, one might ask whether other perceptual processes, such as those involved in lexical effects, are also unaffected in CI children. To our knowledge, two published studies have investigated the influence of lexical information on speech perception in CI users. One study was performed with 28 CI children (implanted at a mean age of 7.2 years; standard deviation: 2.7) who had to repeat easy or hard words (Kirk, Pisoni, and Osberger, 1995). Easy words correspond to high-frequency words from sparse neighborhoods and hard words correspond to low-frequency words from dense neighborhoods. They found poorer repetition scores with both monosyllabic and multisyllabic hard words than easy words. A subsequent study has reported similar findings for CI adults using the same conditions (easy or hard words) and task (word repetition) (Kaiser, Kirk, Lachs and Pisoni, 2003). These studies showed that CI and NH adults perceived and/or produced easy words more accurately than hard words. Thus, lexical knowledge influences speech perception and production in both CI and NH listeners. In addition, although performance for both groups on lexically easy words was equivalent, CI users performed worse on lexically hard words than NH listeners. Thus, CI users seem poorer at making phonemic distinctions among words with difficult-to-access lexical representations

and this might indicate that they make a greater use of lexical information in word recognition.

1.3. The present study

In summary, previous studies provide some evidence that CI children have a deficit in phoneme perception when compared to NH children. Despite a relative consensus on the influence of lexical information on word perception, to our knowledge there is no clear evidence about differences between CI and NH children in the use of lexical information on speech perception. The main hypothesis of this study was that CI children use a compensatory strategy characterized by a greater use of lexical information in feature discrimination because they perceive phonetic features with lesser precision than NH controls. Alternatively, their lesser precision in the perception of phonetic features might affect the precision of their lexical representation. If this were the case, the precision deficit of CI children should be equivalent to, or even larger, for words compared to pseudowords. Thus, it is important to determine the influence of phonemic and lexical information on the feature perception of CI children. The present study addresses these issues with the main phonological features in French (place, voicing, nasality, and manner for consonants; nasality, aperture, and frontness for vowels) in comparing feature perception with words and pseudowords.

In the present study, focusing on the French feature perception of CI children, we address the issue of the use of lexical representations in speech perception. While previous studies have shown that CI children have difficulty perceiving phonemic units in word identification and discrimination tasks, the present study explores whether they use lexical information for phonological feature perception in the same way as NH children. It is both theoretically and practically important to identify the quality of the phonemic and lexical

processes involved in CI children's speech perception in order to determine the origin of the deficit in phonemic perception.

2. Method

The present study was designed to investigate CI children's capacity to discriminate both meaningful and meaningless minimal pairs. Their performance was compared to that of NH children matched for listening age¹. The stimuli were either words or pseudowords, and minimal pairs were composed for all the vowel and consonant features of French.

2.1. Participants

Twenty five children with cochlear implant (11 boys and 14 girls) were recruited from 15 French institutes of the deaf located in different regions of France. All the children were congenitally deaf, had been using a cochlear implant device for at least 5 years, and had been fitted with an implant between the ages of 1;10 and 3;6 years (mean: 2;7 years; standard deviation: 9 months). The implant was either the Clarion (Advanced Bionics), the Nucleus 24 device (Cochlear Corporation), or the Digisonic (Neurelec). Children recruited ranged from 7;11 to 11;6 years, and from grades 2 to 4. Only one child had deaf parents. Table 1 describes the characteristics of each of the participants with cochlear implant. Before and after implantation, 9 out of 25 children used cued speech (early and intensive practice), and 11 out of the remaining children used only spoken language, i.e. they used only speech and audition to communicate. Five children had used both spoken language and cued speech beginning in grade 1. Nineteen out of the 25 children in our study were enrolled in mainstream classes with hearing children. The remaining six were integrated into a spoken language classroom in a school for the deaf (special education with spoken language-like instructional mode).

¹ The listening age was defined as a child "ages" or matures in listening once he has access to sound via a cochlear implant. A child who is 6 years old and has had an implant for 3;6 years would be expected to demonstrate auditory skills similar to a 3;6 year old, not a six year old. 3;6 years of auditory experience can compare to a normal-hearing child who has had 3;6 years of auditory experience that is to say 3;6 year old

Chronological age (years; months)	Age at implantation (years; months)	Length of cochlear implant use (years; months)	Type of device	Communication mode	Educational Placement
Mean and standard deviation in parentheses					
9;1 (1;1)	2;7 (0;9)	6;6 (1;1)	16 Nucleus Freedom	9 early and intensive Cued Speech + oral	6 special education
			7 Nucleus Sprint	11 oral	
			1 Digisonic	5 late Cued Speech + oral	19 mainstream
			1 Clarion		

Table 1. Characteristics of children with cochlear implant (CI)

Each child with CI was matched with one NH child with the same reading level and with one NH child with the same chronological age to compare the performance of CI group to both groups. All the NH children met the following criteria: (a) they were native speakers of French, (b) they had no history of auditory, language and reading disorders, and (c) their reading score was within the normal range. Reading scores were obtained using the Alouette test (Lefavrais, 1967), a standardized French reading test employed in computerized batteries of tests (EVALEC, Sprenger-Charolles, Colé, Béchenec, and Kipffer-Piquard, 2005; BELEC, Mousty and Leybaert, 1999). This test requires subjects to read a meaningless text aloud: their performance is converted into a reading age. The Alouette test was standardized for the reading performance of children ages 5 to 14, and a composite score (called “reading score”) that took both accuracy and speed into account was calculated. Finally, all families, both those of CI children and those of NH children, were informed about the goals of the study, and provided written consent before the participation of their child.

As indicated in Table 2, the chronological age of the CI group was the same as that of the NH-CA group ($t < 1$) but significantly higher than that of the NH-RL group ($t(24) = 4.01, p < .001$). The reading score of the CI group is similar to that of the NH-RL group ($t < 1$) but significantly lower than that of the NH-CA group ($t(24) = 3.81, p < .001$). Additionally, the nonverbal reasoning scores of all groups, tested using progressive matrices (PM47, Raven,

1947), were within the normal range (a mean of 33 and 25 correct responses out of 36 for CI and NH children, respectively). The PM47 scores of CI children did not differ significantly from those of the NH-RL group ($t(24) = 1.24, p > .20$) whereas the scores of CI children were significantly lower than those of NH-CA children ($t(24) = 2.82, p < .01$).

	Chronological Age		Listening Age		PM 47		
	Years;months	p	Years;months	p	Number of correct responses /36	Percentiles	P
CI	9;1 (1;1)	***	6;6 (1;1)	>.20	27	75	
NH	6;4 (1;2)		6;4 (1;2)		25	75	>.20

Table 2: mean and standard deviation (in parentheses) of cochlear implant (CI) and normal hearing (NH) participants' chronological age, listening age and non-verbal IQ level.

1.1. *Experimental tasks*

Two tasks were administered in order to assess participants' discrimination skills and potentially uncover differences between groups in the use of lexical information to perceive phonemic features. In order to assess the processes involved in phonemic perception, we used both words and pseudowords. In all tests, children could potentially use lip-reading to understand instructions, but they listened to the stimuli without the aid of lip-reading because the items had been previously recorded. This precaution is important because lip-reading has been shown to have an effect on speech perception in both deaf children (O'Donoghue, Nikolopoulos & Archobold, 2000; Bergeson, Pisoni & Davis, 2003; Bergeson, Pisoni & Davis, 2005; Lachs, Pisoni & Kirk, 2001; Leybaert & Colin, 2007; Spencer & Tomblin, 2009; Tyler, Fryauf-Bertschy, Kelsay, Gantz, Woodworth, and Parkinson, 1997) and NH children (McGurk & MacDonald, 1976).

Word discrimination task. Measures of speech feature discrimination for both consonants and vowels were obtained for both groups of subjects. This test used a two-alternative forced-choice procedure. The stimuli were presented in pairs (AX format), comprising either different stimuli (e.g. for /b/-/m/ contrast, "mouche"- "bouche" or "bouche"- "mouche") or the same stimuli presented twice (e.g. "bouche"- "bouche" or "mouche"-

“mouche”). Through headphones, the child heard two words spoken successively, with a 100-ms interval between words, and had to indicate whether the stimuli in the pair were the same (e.g. “bouche”- “bouche”) or different (e.g. “mouche”-“bouche”). There were 140 different pairs (70 stimulus conditions x 2 orders) and 140 same pairs.

We used one list of word pairs recorded by a French woman speaker. The words had been selected for high lexical frequency (calculated using MANULEX, Lété, Sprenger-Charolles and Colé, 2004), for their CVC or CVCV structure, and for the possibility of forming a minimal pair with an appropriately similar word. This list assessed all features defining consonants (e.g. place, voicing, manner, nasality) and vowels (e.g. frontness, nasality, aperture). Pairs of stimuli were for example: voicing: /poule/-/boule/; consonant nasality: /bouche/-/mouche/; manner: /vol/-/bol/; place of articulation: /bouche/-/douche/; frontness: /pull/-/poule/; aperture: /cil/-/salle/; vowel nasality: /baton/-/bateau/). The discrimination responses were given by pressing one of two differently colored keys on the computer keyboard: the green button when the stimuli were the same, or the red button when the stimuli were different.

Pseudoword discrimination task. The same task was performed using pseudowords. Pairs of pseudowords included, for example: voicing: /ponte/-/bonte/; consonant nasality: /bonpe/-/monpe/; manner: /vape/-/bape/; place of articulation: /bonpe/-/donpe/; frontness: /mune/-/moune/; aperture: /pide/-/pade/; vowel nasality: /fiton/-/fiteau/).

Words and pseudowords were matched for length (number of letters, phonemes and syllables), syllabic structure (CVC or CVCV), as well as for orthographic frequency (bigram frequency, Content and Radeau, 1988). The pseudowords were derived from the words by replacing two phonemes with phonemes that differed from the original ones by one distinctive feature.

Although the words used for the discrimination task have a high lexical frequency (words occurred one and a half times for every 100 words, which corresponds to a standard frequency effect of 85: MANULEX, Lété et al., 2004), the children's knowledge of them was verified with a picture naming task that children have performed after the discrimination task. Answers in the discrimination task were only taken into account if the corresponding picture in the naming task was correctly identified. For the picture naming task, mispronunciations were not classified as mistakes. Only the absence of a response and identification errors led to the elimination of the item in the discrimination task: these never represented more than 2% of the data for any subject.

1.2. Procedure

CI and NH listeners were tested individually in a quiet room (at home and at school, respectively). They received all features (place, voicing, manner, and nasality for consonants; frontness, nasality and aperture for vowels) during six sessions, which lasted around 20 minutes each. For all groups, both word and pseudoword discrimination tasks were presented in a random order and all AX pairs were presented only one time each in random order. In both tasks, we assessed the features, which define consonants (e.g. place, voicing, manner, nasality) and vowels (e.g. frontness, nasality, aperture).

Presentation was controlled by E-prime 2.0, running on a Dell PC. Stimuli were presented at an individual adapted comfortable level through headphones (Beyerdynamic DT290). The DT 290 is a double sided headphone headset with soft and large circumaural ear cups which cover ear and microphone. Before the test session, we first ensured that CI children were able to hear the stimuli. Children listened to several list of 10 very frequent words (examples: “chat”-“cat”, “jambe”- “leg”, “petit”-“little”, “maison”-“house”, “enfant”-child”, “rat”-“rat”, “ours”-“bear”, “rouge”- “red”, “vélo”-“bike” and “neige”-“snow”) at a

comfortable level through headphones (70 dB). They had to repeat one list and we considered that the hearing level of the CI children was sufficient if they repeated at least 80% of the words correctly. When they repeated less than 80% of the words correctly, another list of words was presented again with the level increased by 5dB. The stimuli were presented at 75 dB for 19 CI children and at 80 dB for 6 others CI children.

2. Results

The word and pseudoword discrimination responses collected for each of the feature contrasts were converted into d' scores by taking the difference between the normal deviate (z -score) corresponding to the proportion of correct difference detections (i.e., the proportion of 'different' responses to different pairs) and the proportion of false alarms (i.e., the proportion of 'different' responses to same pairs). Since 0% and 100% scores correspond to infinite z -scores, response scores were adjusted following the classical procedure described by Macmillan and Creelman (2005) before conversion into z values. Response scores above 50% were reduced by 2.5% (with 40 responses per couple of pairs—2 different pairs or 2 same pairs—2.5% corresponds to one half of the precision of the response scale, i.e. one half of 1/40), and those below 50% were increased by 2.5%. Finally, d' obtained for word and pseudoword discrimination tasks were computed for each participant and each feature, providing a measure of the consequences of the participants' auditory status.

The d' scores were entered into a repeated-measures analysis of variance (ANOVA) in which Lexical Status (word vs. pseudoword) and Phonemic Features (voicing vs. consonant nasality vs. manner vs. place vs. aperture vs. frontness vs. vowel nasality) were within-subject factors while Groups (cochlear implant vs. normal-hearing groups) was a between-subjects factor.

Differences in the precision of phoneme perception between groups were tested with the Group effect and with the Group x Feature interaction. The Lexicality effect was tested

with the Lexical Status effect. Differences in lexical processing between groups were tested with the Lexical Status x Group and Lexical Status x Group x Phonemic Features interactions. Differences in categorical perception and categorical precision between features were tested with planned comparisons.

Response Accuracy

When we observed the mean of word and pseudoword discrimination data expressed in terms of d' scores for each group and for all phonemic features taken together, results showed that NH children appear to be more accurate than CI children in word and pseudoword discrimination. Overall, the best scores are obtained for the word discrimination task. Indeed, the ANOVA revealed a Group effect ($F(1,46) = 84.6, p < .001$) reflecting the fact that CI children's discrimination skills were less accurate than those of NH children. The results also showed a Lexical status effect ($F(1,46) = 6.82, p < .05$), indicating that minimal pairs of pseudowords were discriminated with lower accuracy than minimal pairs of words.

Figure 1 presents the mean d' for each group and each task according to the seven different phonemic features tested (consonants in top panel, vowels in bottom panel). The repeated-measures ANOVA indicated that, contrary to the hypothesis, there was no Lexical status x Group interaction ($F < 1$), which indicates that the lexical status effect is similar in both groups (as also evidenced by the parallel lines in Figures 1 and either parallel or nearly parallel lines in Figure 1). A significant Feature x Group interaction was found ($F(1,46) = 6.75, p < .001$) showing that the pattern of perception of features is different in CI and NH children. This interaction was due to larger differences between the groups in both the word and pseudoword discrimination scores for some features, especially consonant and vowel nasality (see Figure 1). Finally, we did not observe a significant Lexical status x Feature interaction ($F(1,46) = 1.75 ; p > .10$) or Feature x Lexical status x Group interaction ($F < 1$),

altogether indicating that the discrimination of the different features is biased by the lexical status of the items in a similar way in both CI and NH groups.

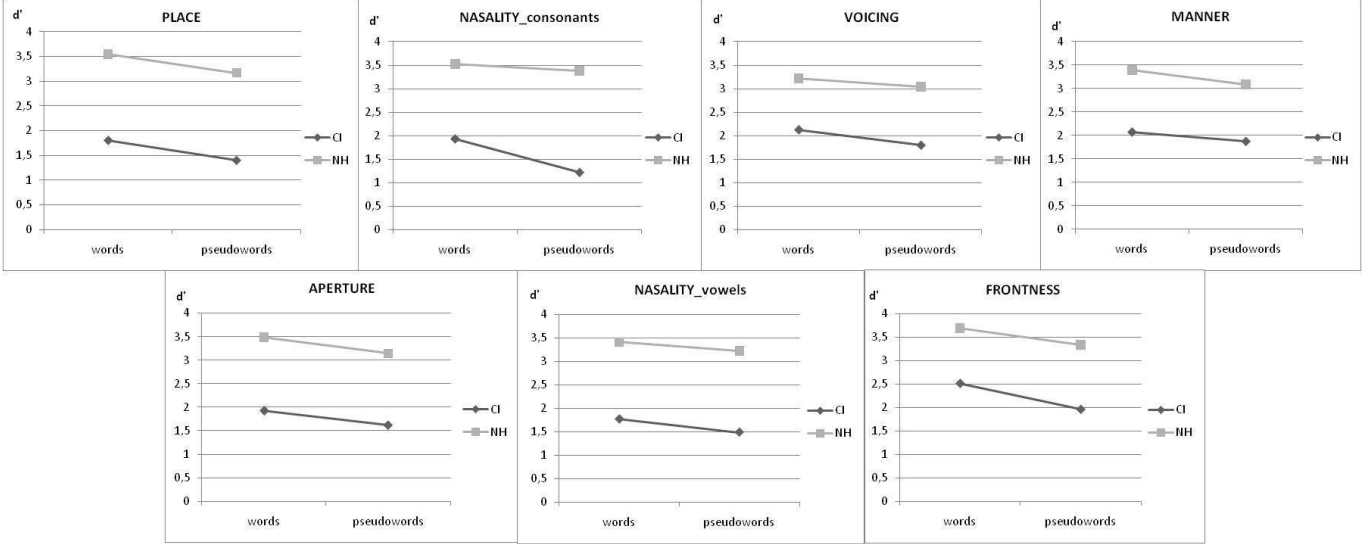


Figure 1. Words and Pseudowords discrimination scores for cochlear implant and normal-hearing children for each articulatory features

The differences between the two different groups (CI vs. NH) and the seven different features under study (nasality, place of articulation, manner, and voicing for consonants; nasality, frontness and aperture for vowels) in mean d' scores for the discrimination task are presented in Figure 2. Differences between d' scores obtained by CI and NH children were computed using the mean scores obtained in word and pseudoword discrimination tasks.

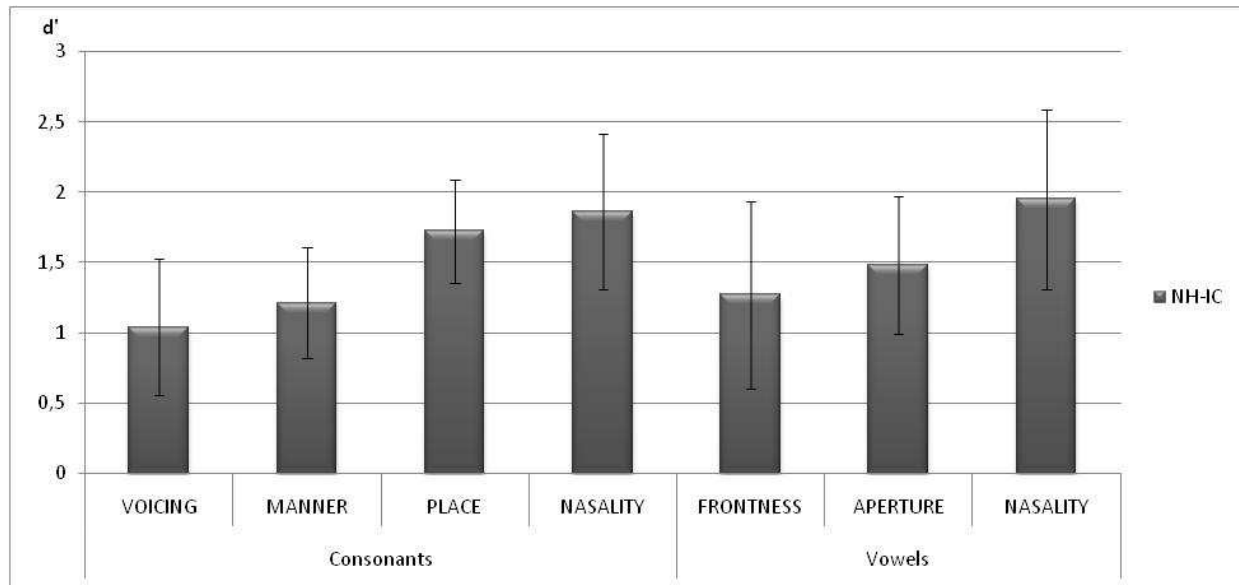


Figure 2. Differences between normal-hearing and cochlear implant children in means d' scores for word and pseudoword discrimination tasks, for articulatory features of vowels and consonants.

The NH-CI difference mean is significantly different from chance for each feature (Place: $t(24) = 11.4$, $p < .001$; Consonant Nasality: $t(24) = 8.22$, $p < .001$; Voicing: $t(24) = 5.24$, $p < .001$; Manner: $t(24) = 7.55$, $p < .001$; Aperture: $t(24) = 7.51$, $p < .001$; Vowels Nasality: $t(24) = 7.51$, $p < .001$; Frontness: $t(24) = 4.73$, $p < .001$), indicating CI children's accuracy scores are generally lower than those of NH children.

Figure 2 shows that, among consonant features, the differences between groups are larger for nasality and place than for voicing and manner. Newman-Keuls tests indicated significant differences between nasality and manner ($p < .001$), place and manner ($p < .001$), nasality and voicing ($p < .001$), and place and voicing ($p < .001$), but no significant difference

between nasality and place ($p > .20$) or manner and voicing ($p > .20$). For vowel features, we observed the following pattern: nasality > aperture = frontness. Newman-Keuls comparisons indicated significant differences between nasality and aperture ($p = .05$) and nasality and frontness ($p < .05$), but not between aperture and frontness ($p > .20$). Thus, in consonant perception, CI children have more difficulty perceiving nasality and place than manner and voicing, and in vowel perception, they have more difficulty perceiving nasality than aperture and frontness.

In summary, the magnitude of d' for both word and pseudoword discrimination was lower for CI children than for NH children, indicating a lower level of feature discrimination. In addition, the lexicality effect (related to the difference between the word and the pseudoword discrimination scores) is similar in CI and in NH children. This result suggests that CI and NH children matched for listening age rely to the same extent on lexical information. In spite of differences between CI and NH children in consonant and vowel feature perception, the lexical effect is similar for CI and NH children for each feature.

3. Discussion

The present study indicates that CI children exhibit lower discrimination performance than NH children for a fairly large set of phonological features. Discrimination was better for some features than for others, and the difference between groups depended on the feature. However, both groups showed a lexical effect characterized by more precise discrimination of words than pseudowords. This lexical effect was fairly similar for CI and NH children, and did not depend on the particular vowel or consonant feature.

3.1. Deficit in phonemic discrimination

Our study indicates that the phonemic discrimination scores of children with cochlear implants are lower than those of NH children matched for listening age, indicating less precise speech perception. This finding of a lower speech discrimination score in CI children than in NH children confirms previous studies showing weak accuracy scores in word identification (Geers et al., 2003) and in pseudoword discrimination tasks (Medina and Serniclaes, 2009). The differences between groups in the precision of consonant perception were the smallest for manner and voicing and the largest for nasality and place. For vowel perception, differences in precision between groups were the smallest for frontness and aperture, and the largest for nasality. The patterns of responses are globally consistent with previous work on adult acoustic/phonemic perception skills (Tye-Murray et al., 1995) and with previous work on children's acoustic/phonemic perception skills (Bouton et al., under review). The ordering of feature reception (manner = voicing > nasality = place) is reminiscent of the ordering of feature reception in these studies. Thus, lower discrimination scores for CI children compared to NH children might be explained by the acoustic limitations of CI devices' signal processing. There is no simple explanation to this ordering, however. It might be postulated, for example, that voicing and manner information are mainly conveyed by envelope cues, whereas place and nasality are mostly conveyed by temporal fine structure cues, as would be anticipated from acoustic and phonetic considerations (Rosen, 1992; Verschuur & Rafaely, 2001). However, a recent study shows that the difference between envelope and temporal fine structure was lesser for voicing and nasality than for manner and place, the latter depending more on envelope cues (Bertoncini, Serniclaes, & Lorenzi 2009). Clearly, the relationship between each feature and the E vs. TFS cues needs further investigation and might be of relevance to the transmission of consonant features by cochlear implants. It would be worthwhile quantifying individual differences in the acoustic

limitations of the CI devices through psychoacoustic measures of sensitivity to temporal fine structure and envelope cues (as in: Won, Drennan, Kang & Rubinstein, 2010) and to rely them to differences in categorical precision.

Differences in the reception of vowel features can also not be explained by the dichotomy between E and TFS cues. Indeed, all vowel features are mainly defined by TFS cues, but their perception is still different. Vowel discrimination depends on spectral resolution to resolve the formant pattern that distinguishes between vowels. In this study, the ordering of vowel feature reception (frontness and aperture better perceived than nasality) is congruent with Bouton et al.'s (under review) findings, and also globally congruent with those of Medina and Serniclaes (2009), who also found that frontness and aperture is better perceived by CI children than nasality. These results suggest that formants are the main cue for the processes involved in perceiving vowels, and confirm findings suggesting that vowel perception by cochlear implant users may be limited by their formant frequency discrimination skills, themselves constrained by the frequency-to-electrode map of their implant speech processors (Harnsberg, Svirsky, Kaiser, Pisoni, Wright, & Meyer, 2001).

As far as we know, few comparisons between the acoustic cues provided by cochlear implant and the perception of phonemic features by CI children are available in the literature. Nevertheless, these results are congruent and seem to show the relevance of envelope and temporal fine structure cues, like those of formants. Other results must be collected in order to clarify differences in the discrimination of formant frequencies and of envelope and temporal fine structure cues, and their relation to phonemic feature perception.

3.2. Lexical effects in speech perception

Although CI users perceived phonemic features with lesser accuracy than NH children, lexical information, defined as knowledge present in the mental lexicon, seems to

influence feature perception in both groups in a similar way. Indeed, the magnitudes of the differences between d' for word and pseudoword discrimination are similar for CI and NH children, indicating a similar influence of lexical knowledge on speech perception.

The lexical effect evidenced here consisted in a difference in the precision of phonemic feature discrimination between word and pseudoword pairs. Although lexical effects have been reported in previous investigations, these effects were generally different from the ones obtained here as they consisted in differences in response *bias*. Results obtained with adults have repeatedly shown that the perceptual boundary on a word/nonword continuum (e.g. beef/peef) is shifted towards the nonword endpoint of the continuum (e.g. peef; Ganong, 1980; Fox, 1984; Connine and Clifton, 1987; McQueen, 1991; Whalen, 1991; Serniclaes, Beeckmans and Radeau, 2010), and similar results are observed in NH children by Chiappe et al. (2001). However, the lexical effect found in the present study resided in a difference in *precision* in the discrimination of word/word vs. pseudoword/pseudoword contrasts and, somewhat surprisingly, this difference was similar for CI and NH children. McMurray et al. (2003) indicated that categorical perception was less accurate for word/word contrasts than for pseudoword/pseudoword contrasts. These results are congruent with those reported by Andruski, Blumstein, and Burton (1994) who showed that lexical neighbors hinder the activation of a cue word. They observed a reduced semantic facilitation effect when prime and cue were semantically related. This tendency toward longer latencies suggests that words which are phonologically similar to the intended candidate word are also activated to some extent during lexical access, whether the input provides a good phonemic representation of the intended word, as with the unaltered primes, or a poorer one, as with the altered primes. Presumably, the presence or absence of a real-word counterpart contributed to the density or size of the set of activated lexical candidates. The results suggest that phonetic variants at word onset play a role in defining the set of competing lexical items.

The main hypothesis of this study was that since CI children perceive phonemic features with lesser precision than NH controls, they might use a compensatory strategy characterized by a greater use of lexical information in feature identification. Alternatively, their lesser precision in the perception of phonemic features might affect the precision of their lexical representations. If this were the case, the precision deficit of CI children for words and pseudowords should be equivalent. The results of the present study support this last possibility. This pattern of results indicates that the degraded acoustic cues provided by cochlear implant devices prevent CI children from accurately recognizing both words and pseudowords. These results showing improved phoneme perception in a lexical context are coherent with previous studies indicating a similar lexical advantage for phoneme perception in words over pseudowords in NH children (Fort et al., 2010). This lexical effect might arise from the better pronunciation of words compared to pseudowords, i.e. to the enhancement of coarticulatory information in words (Kirk, Pisoni, Osberger, 1995; Kaiser, Kirk, Lachs and Pisoni, 2003). However, it also seems that a specific perceptual factor contributes to the lexical effect. Different results (Andruski et al., 1994; McMurray et al., 2002) showed that acoustic-phonemic details do influence access to lexical form, and that degradation of the acoustic-phonemic pattern of a word prevents the activation of its lexical representation. Coarticulatory information would thus have a twofold effect on word perception, a direct “bottom-up” effect (as in nonwords) and an indirect “top-down” effect via lexical activation. The present results suggest that CI children also benefit from this twofold effect in word perception: they also benefit more from acoustic-phonemic details in order to access the lexical information defining words. Despite of difference in the quality of the input, resulting in weaker absolute performances in CI vs. NH children for both words and nonwords, the improvement of the performances with words vs. nonwords is the same for both groups. This

suggests that the lexical processing of acoustic-phonemic information is quite similar in both CI and NH children.

3.3. Conclusion

The present study suggests that CI children present a feature discrimination deficit in comparison to NH children matched for listening age. Both an auditory deprivation period and important differences between the electrical stimulation provided by cochlear implant and the auditory stimulation provided by normal-hearing could seemingly explain these difficulties. Considering the limitations in the transmission of acoustic cues by the cochlear implant, the deficit in CI children's feature discrimination is larger for the phonological features conveyed by temporal fine structure rather than envelope cues. Among the features that depend on temporal fine structure cues, those relying on very low-frequency information are the most affected. These results are congruent with previous findings (Bouton et al., under review; Medina & Serniclaes, 2009; Tye-Murray et al., 1995). Thus, performance in feature perception varies as a function of various factors, such as differences in the electrophysiological profiles of the CI users and perhaps also the kind of CI device. It is also consistent with the fact that there is no simple one to one correspondence between acoustic and phonemic properties.

Despite these difficulties in the precision of feature perception, the processes implied in speech perception seem to be similar in CI and NH children. Our results indicate that CI children use the same amount of lexical information—defined as the difference between word and pseudoword discrimination skills—as NH children, despite an auditory deprivation period and the degraded acoustic cues provided by cochlear implants. These results accord with a previous study indicating that CI children acquire categorical perception in the same way as NH children but with lower categorical precision (Bouton et al., under review). They are

important because they seem to indicate that the acoustic information provided by CI devices is sufficient to use phonological and lexical processes in speech perception. Further experiments will be needed to determine whether difficulties in precision feature discrimination are due to the late development of speech perception, to the peculiarities of acoustic cues provided by cochlear implants, or both.

References

- Andruski, J., Blumstein, S., & Burton, M. (1994). The effect of subphonetic differences on lexical access. *Cognition*, 52(3), 163-187.
- Assmann, P., & Nearey, T. (2008). Identification of frequency-shifted vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 3203-3212.
- Aydelott Utman, J.A., Blumstein, S.E., & Burton, M.W. (2000). Effects of subphonetic and syllable structure variation on word recognition. *Perception and Psychophysics*, 62, 1297-1311.
- Bergeson, T., Pisoni, D.B., & Davis, R.A.O. (2003). A longitudinal study of audiovisual speech perception by children with hearing loss who have cochlear implants. *Volta Review*, 103, 347-370.
- Bergeson, T.R., Pisoni, D.B., & Davis, R.A.O. (2005). Development of audiovisual comprehension skills in prelingually deaf children with cochlear implants. *Ear and Hearing*, 26(2), 149-164.
- Bertoncini, J., Serniclaes, W., & Lorenzi, C. (2009). Discrimination of speech sounds based upon temporal envelope versus fine structure cues in 5-to-7 year-old children. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 52(3), 682-695.
- Blumstein, S.E. (2004). *Phonetic category structure and its influence on lexical processing*. Proceedings of the Texas Linguistic Society, Cascadilla Press.
- Bouton, S., Serniclaes, W., Bertoncini J., & Colé, P. (under review). Perception of speech features by French-speaking children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*.
- Burns, T., Yoshida, K., Hill, K., & Werker, J. (2007). The Development of Phonetic Representation in Bilingual and Monolingual Infants. *Applied Psycholinguistics*, 28, 455-474.
- Carden, G., Levitt, A., Jusczyk, P., & Walley, A. (1981). Evidence for phonetic processing of cues to place of articulation: perceived manner affects perceived place. *Perception and psychophysics*, 29(1), 26-36.
- Chiappe, P., Chiappe, D., & Siegel, L. (2001). Speech Perception, Lexicality, and Reading Skill. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 58-74.
- Connine, C.M., & Clifton, C. (1987). Interactive use of lexical information in speech perception. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 13(2), 291-299.
- Content, A., & Radeau, J. (1988). Données statistiques sur la structure orthographique du Français. *Cahier de Psychologie Cognitive*, 4, 399-404.
- Dahan, D., Magnuson, J.S., & Tanenhaus, M.K. (2001). Time course of frequency effects in spoken-word recognition: evidence from eye movements. *Cognitive Psychology*, 42, 317-367.
- Dorman, M., Loizou, P., Spahr, A., & Maloff, E. (2002). Factors that allow a high level of speech understanding by patients fit with cochlear implants. *American Journal of Audiology*, 11(2), 119-123.
- Eilers, R.E., Gavin, W., & Wilson, W.R. (1979). Linguistic experience and phonemic perception in infancy: a crosslinguistic study. *Child Development*, 50(1), 14-18.
- Fort, M., Spinelli, E., Savariaux, C., Kandel, S. (2010). The word superiority effect in audiovisual speech perception. *Speech Communication*, 52, 525-532.
- Fox, R.A. (1984). Effect of lexical status on phonetic categorization. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 10(4), 526-540.
- Ganong, W.F. (1980). Phonetic categorization in auditory word perception. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 6(1), 110-125.

- Gaskell, M.G., & Marslen-Wilson, W.D. (1997). Integrating form and meaning: a distributed model of speech perception. *Language and Cognitive Processes*, *12*, 613-656
- Geers, A., Brenner, C., & Davidson, L. (2003). Factors associated with development of speech perception skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing*, *24*(1 Suppl), 24S-35S.
- Harnsberger, J.D., Svirsky, M.A., Kaiser, A.R., Pisoni, D.B., Wright, R., & Meyer, T.A. (2001). Perceptual "vowel spaces" of cochlear implant users: implications for the study of auditory adaptation to spectral shift. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *109*(5), 2135-2145.
- Kaiser, A., Kirk, K., Lachs, L., & Pisoni, D. (2003). Talker and lexical effects on audiovisual word recognition by adults with cochlear implants. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, *46*(2), 390-404.
- Kirk, K., Pisoni, D., & Osberger, M. (1995). Lexical effects on spoken word recognition by pediatric cochlear implant users. *Ear and Hearing*, *16*(5), 470-481.
- Knudsen, E.I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*(8), 1412-1425.
- Koroleva, I., Kashina, I., Sakhnovskaya, O., & Shurgaya, G. (1991). Perceptual restoration of a missing phoneme: New data on speech perception in children. *Sensory Systems*, *5*, 191-199.
- Lachs, L., Pisoni, D.B., & Kirk, K.I. (2001). Use of audiovisual information in speech perception by prelingually deaf children with cochlear implants: a first report. *Ear and Hearing*, *22*(3), 236-251.
- Lefavrais, P. (1967). *Test de l'Alouette: Manuel* [Alouette: A standardized reading test]. Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L. & Colé, P. (2004). MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, *36*(1), 156-166.
- Leybaert, J., & Colin, C. (2007). Le rôle des informations visuelles dans le développement du langage de l'enfant sourd muni d'un implant cochléaire. *Enfance*, *59*(3), 245-253.
- van Linden, S., Stekelenburg, J.J., Tuomainen, J., & Vroomen, J. (2007). Lexical effects on auditory speech perception: an electrophysiological study. *Neuroscience Letters*, *420*(1), 49-52.
- Macmillan, N., & Creelman, C. (2005). *Detection Theory: A User's Guide*. London: Lawrence Erlbaum.
- Marslen-Wilson, W., & Warren, P. (1994). Levels of perceptual representation and process in lexical access: words, phonemes, and features. *Psychological Review*, *101*(4), 653-675.
- McClelland, J.L., & Elman, J.L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, *18*(1), 1-86.
- McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, *264*(5588), 746-748.
- McMurray, B., Tanenhaus, M., Aslin, R., & Spivey, M. (2003). Probabilistic constraint satisfaction at the lexical/phonetic interface: evidence for gradient effects of within-category VOT on lexical access. *Journal of psycholinguistic research*, *32*(1), 77-97.
- McQueen, J.M. (1991). The influence of the lexicon on phonetic categorization: stimulus quality in word-final ambiguity. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *17*(2), 433-443.
- McQueen, J., Norris, D., & Cutler, A. (1999). Lexical influence in phonetic decision making: evidence from subcategorical mismatches. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(5), 1363-1389.

- Medina, V., & Serniclaes, W. (2009). Consecuencias de la categorización fonológica sobre la lectura silenciosa de niños sordos con implante coclear. *Revista de Logopedia, Foniatría y Audiología*, 29(3), 186-194.
- Misiurski, C., Blumstein, S., Rissman, J., & Berman, D. (2005). The role of lexical competition and acoustic-phonetic structure in lexical processing: evidence from normal subjects and aphasic patients. *Brain and Language*, 93(1), 64-78.
- Mousty, P., & Leybaert, J. (1999) Evaluation des habilités de lecture et d'orthographe au moyen de BELEC: données longitudinales auprès d'enfants francophones testés en 2ème et 4ème années. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 4, 325-342.
- Newman, R. (2004). Perceptual restoration in children versus adults. *Applied Psycholinguistics*, 25, 481-493.
- Norris, D., McQueen, J., & Cutler, A. (2003). Perceptual learning in speech. *Cognitive Psychology*, 47(2), 204-238.
- O'Donoghue, G., Nikolopoulos, T., & Archbold, S. (2000). Determinants of speech perception in children after cochlear implantation. *Lancet*, 356(9228), 466-468.
- Repp, B.H. (1984). Categorical perception: issues, methods, finding. *Speech and Language: Advances in Basic Research and Practise*, 10, 234-335.
- Rivera-Gaxiola, M., Silva-Pereyra, J., & Kuhl, P.K. (2005). Brain potentials to native and non-native speech contrasts in 7- and 11-month-old American infants. *Developmental Science*, 8(2), 162-172.
- Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 336, 367-373.
- Rubin, P., Turvey, M., & van Gelder, P. (1976). Initial phonemes are detected faster in spoken words than in spoken nonwords. *Perception & Psychophysics*, 19, 394-398.
- Schatzer, R., Krenmayr, A., Au, D. K. K., Kals, M., Zierhofer, C. (2010). Temporal fine structure in cochlear implants: Preliminary speech perception results in Cantonese-speaking implant users. *Acta Otolaryngology*, 130:1031-1039
- Serniclaes, W., Beeckmans, R. and Radeau, M. (2010). Lexical influences on the perceptual categorization of French stops, 9(2),
- Serniclaes, W., & Wajskop, M. (1992). Phonetic versus acoustic account of feature interaction in speech perception. In J., Alegria, D., Holender, J. Junca de Moraes, M., Radeau, (Eds.), *Analytic approaches to human cognition* (pp. 77-91). Oxford, England: North-Holland.
- Shannon, R., Zeng, F., Kamath, V., Wygonski, J., & Ekelid, M. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270(5234), 303-304.
- Smith, ZM., Delgutte, B., Oxenham, AJ. (2010). Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. *Nature*, 416, 87-90.
- Spencer, L.J., & Tomblin, J.B. (2009). Evaluating phonological processing skills in children with prelingual deafness who use cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14(1), 1-21.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchenec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). Lecture et compétences reliées: Données normatives pour la fin de la 1ère, 2nde, 3ème et 4ème année du primaire issues d'une nouvelle batterie de tests, EVALEC. *European Review of Applied Psychology/Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 55(3), 157-186.
- Streeter, L., & Nigro, G. (1979). The role of medial consonant transitions in word perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(6), 1533-1541.
- Tye-Murray, N., Spencer, L., & Gilbert-Bedia, E. (1995). Relationships between speech production and speech perception skills in young cochlear-implant users. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2454-2460.

- Tyler, R.S., Fryauf-Bertschy, H., Kelsay, D.M., Gantz, B.J., Woodworth, G.P., & Parkinson, A. (1997). Speech perception by prelingually deaf children using cochlear implants. *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, *117*(3), 180-187.
- Verschuur, C., & Rafaely, V. (2001). An exploratory study into perception of acoustic speech cues by hearing-impaired adults. *British journal of audiology*, *35*(3), 209-217.
- Xu, L., & Zheng, Y. (2006). Spectral and temporal cues for phoneme recognition in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *122*(3), 1758–1764.
- Warren, R.M. (1970). Perceptual restoration of missing speech sounds. *Science*, *167*(917), 392-393.
- Whalen, D.H. (1991). Subcategorical phonetic mismatches and lexical access. *Perception & Psychophysics*, *50*(4), 351-360.
- Won, J.H., Drennan, W.R., Kang, R.S., & Rubinstein, J.T. (2010). Psychoacoustic abilities associated with music perception in cochlear implant users. *Ear and Hearing*, *31*, 796-805.

Reading acquisition and reading-related skills in French children with cochlear implant¹

Sophie Bouton¹, Christel Leuwers², Willy Serniclaes³, and Pascale Colé¹

¹ Université de Provence, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille

² Université de Savoie, Laboratoire Langages, Littératures et Sociétés, Chambéry

³ CNRS & Université Paris-Descartes, Laboratoire Psychologie de la Perception, Paris

Résumé

Dans cette étude, nous avons évalué les compétences en lecture et associées à la réussite en lecture de 5 enfants munis d'un implant cochléaire. Nous avons réalisé 5 études de cas dans lesquelles les performances de chaque enfant implanté sont comparées à celles de 10 enfants contrôles de même niveau de lecture. Les compétences classiques associées à l'acquisition de la lecture (conscience phonémique, mémoire à court terme phonologique et lexicale) ont été évaluées. Nous avons également testé les compétences de mise en œuvre des procédures lexicale et sous-lexicale avec une tâche de lecture à haute voix de pseudo-mots, de mots réguliers et irréguliers. Les résultats montrent que les enfants implantés présentent de plus faibles compétences phonologiques (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique) que les enfants normo-entendants ainsi qu'un déficit d'utilisation de la procédure lexicale pour lire les mots irréguliers. Nous avons également mis en évidence que les enfants implantés ont des compétences similaires de mémoire à court terme lexicale et de reconnaissance de pseudo-mots et de mots réguliers que les enfants normo-entendants. Par conséquent, ces résultats suggèrent que les enfants implantés présentent un déficit de traitement phonologique des stimuli présentés oralement (compétences associées à la réussite en lecture), mais sont néanmoins capables d'utiliser les procédures lexicale et sous-lexicale de lecture. Nous discutons la relation entre ces résultats et ceux obtenus dans le domaine de l'acquisition normale de la lecture.

Mots clés : implant cochléaire, acquisition de la lecture, procédures de lecture, habiletés associées à la réussite en lecture.

This research was supported by a research grant from the Rhône-Alpes Region to Pascale Colé (Cluster 11-Action 114 “**Surdité et apprentissage de la lecture**”)

¹ Paper in preparation for submission

Abstract

Purpose: In this study we investigated the reading and reading-related skills of 5 French-speaking children fitted with cochlear implant (CI). *Method:* Using a case-study design where the performance of each CI child was compared to that of 10 normal-hearing (NH) control subjects matched for reading level. We investigated the classical skills involved in reading acquisition (phonemic awareness, phonological and lexical short-term memory). We also assessed lexical and sublexical reading procedures through a reading-aloud task with pseudowords, regular words, and irregular words. *Results:* CI children exhibited lower phonological skills (phonemic awareness and phonological short-term memory) than controls and also a reading deficit, but only in the lexical procedure used for reading irregular words. We also found that CI children had the same lexical short-term memory skills and processed regular words and pseudowords with the same accuracy and speed as NH controls. *Conclusions:* This set of results suggests that whereas CI children present a phonological processing deficit in the assessed reading-related skills, they are nonetheless able to use the sublexical and lexical procedures. We discuss the relation of these results to those obtained in the domain of normal reading acquisition.

Keywords: cochlear implantation, reading development, reading procedures, reading-related skills.

1. Introduction

When normal-hearing (NH) children learn to read, they have already mastered oral language. Research on reading acquisition in NH children has emphasized the importance of the quality of phonological (and more precisely phonemic) representations in the success of this acquisition (Bradley & Bryant, 1983; Bryant, MacLean, Bradley, & Crossland, 1990; Lundberg, Olofson & Wall, 1980; Mann & Liberman, 1984). For deaf children using cochlear implant (CI), the quality of the signal provided through electrical stimulation by cochlear implant is limited and provides less fine acoustic-phonetic detail than normal hearing (Bouton, Colé, Bertoncini & Serniclaes, submitted; Geers, Brenner & Davidson, 2003; Medina & Serniclaes, 2009; Tye-Murray, Spencer & Gilbert-Bedia, 1995). This may have an impact on the quality of the phonological representations that CI children develop (Bouton et al., submitted; Medina & Serniclaes, 2009).

Considering that the development of age-appropriate reading competence is a goal of most, if not all, educational programs for deaf CI children, it is crucial to enable them to function alongside their hearing peers at school and later in the professional community (Ruben, 2000). However, because studies are rare and their results sometimes incongruent, we know little about the reading skills of CI children (in English: Fagan, Pisoni, Horn & Dillon, 2007; Geers, 2003; Spencer and Tomblin, 2009; in Dutch: Vermeulen, Van Bon, Schreuder, Knoors, Snik, 2007; in French: Medina & Serniclaes, 2009). The present study was aimed at assessing the reading skills and reading-related skills (such as phonemic awareness, phonological and lexical short-term memory) of French CI children. More precisely, we sought to determine if these skills develop normally or in an impaired way by comparing the performance of CI children to that of NH children matched for reading level.

1.1. Reading-related skills in children with cochlear implant

Numerous studies have provided evidence for the role of phonological awareness in learning to read. The ability to identify and explicitly manipulate segments of speech is considered to be fundamental because in alphabetic systems, letters or groups of letters more or less represent phonemes. Longitudinal studies have proved phonological awareness, and more precisely phonemic awareness, to be a predictor of future achievement in reading (Fluss, Ziegler, Warszawski, Ducot, Richard, & Billard, 2009; Frost, Madsbjerg, Niedersoe, Olofsson, & Sorensen, 2005; Hulme, Goetz, Gooch, Adams, & Snowling, 2007; Lundberg et al., 1980; Savage & Carless, 2005; Stanovich, Cunningham & Cramer, 1984). Moreover, experimental training studies have established a causal connection between phonological awareness and reading (Bradley & Bryant, 1983) and between phonemic awareness and reading (Hulme, Hatcher, Nation, Brown, Adams & Stuart, 2002; Muter, Hulme, Snowling, & Taylor, 1998). In addition, there is also some evidence that the ability to retain and manipulate phonological forms in short-term memory (phonological and lexical short-term memory) contributes to reading success (Baddeley, 1986; Lecocq, 1991; Baddeley & Wilson, 1993).

Normal-hearing children with a phonemic discrimination deficit show difficulties in learning to read. These children, called dyslexics, have very poor phonemic awareness (for a review, see Snowling, 2001) and phonological short-term memory skills (McDougall, Hulme, Ellis, & Monk, 1994; Sprenger-Charolles, Colé, Lacert, & Serniclaes, 2000). As discussed above, this suggests that a phonemic perception deficit in CI children is likely to have a negative impact on the development of the reading-related skills needed to develop efficient reading procedures. The aim of establishing a comparison between CI children and dyslexic children is that it makes possible compare the influence of phonemic perception deficits on reading in both populations. Data from dyslexic people might help to establish a theoretical

framework within which the relationship between spoken language acquisition and reading development of CI children can be better understood.

Research studying reading-related skills systematically assesses phonological awareness, which is measured using tasks requiring the manipulation of phonological units (syllables, rhymes, and phonemes) of spoken words; phonological short-term memory skills, which are tested with pseudoword repetition task measuring the ability to encode and retain phonological code; and lexical short-term memory, which is tested with number or word memory span tests measuring the ability to temporarily store lexical information.

Phonological awareness. When compared to NH children, CI children present an inconsistent pattern of responses (James, Rajput, Brinton, & Goswami, 2008; Spencer & Tomblin, 2009). To assess syllable awareness, James et al. (2008) used a similarity judgement task where children had to match a drawing to another on a common syllable unit from a set of 3 drawings. James et al. (2008) observed that CI children fitted early (i.e. on average at 2;10 years) and late (i.e. on average at 6 years) performed just as well as the NH children matched for reading level and chronological age on the similarity judgement task. However, Spencer and Tomblin (2009) used a blending task with syllable units (*example: What words do these sounds make? “can” and “dee”*) and showed that CI children presented a deficit on these skills when compared to NH children matched for reading comprehension level.

In an assessment of phoneme awareness, CI children fitted late obtained scores significantly lower than NH children matched for reading level or chronological age in a similarity judgement task, whereas CI children fitted early performed worse than NH children matched for reading level but, surprisingly, as well as NH children matched for chronological age (James et al., 2008). These results might be explained by the lower score on phoneme tests for NH controls matched for chronological age compared with NH controls matched for reading level (respectively, 79% and 86% of correct responses). Finally, Spencer and Tomblin

(2009) reported that CI children performed with the same accuracy as NH children matched for reading comprehension level on a first-phoneme deletion task.

Phonological short-term memory. Phonological short-term memory skills are needed to retain the assembled phonological code to decode newly encountered words or pseudowords. To our knowledge, 2 studies have assessed phonological short-term memory in CI children in using a pseudoword repetition task. Dillon, Burkholder, Cleary, & Pisoni's (2004) sample of 76 children fitted with cochlear implant at ages ranging from 1.9 to 5.4 years (average chronological age at the time of testing: 8.9 years) correctly repeated 42% of presented pseudowords. This performance was also strongly correlated to measures of speech perception and speech production (where they showed very low performance levels), with each of these factors contributing 29% of the variance in phonological short-term memory skills. The suggestion in these results that deficits in speech perception and production could be related to deficits in phonological short-term memory skills was confirmed by Spencer and Tomblin's (2009) study. They found that CI children ranging in age from 7;2 to 17;8 years and whose average age of implantation was 3;7 years obtained significantly lower scores on a pseudoword repetition task than NH children matched for reading comprehension and ranging in age from 6;2 to 17;9 years.

Lexical short-term memory. Most studies assessing lexical short-term memory skills with the digit span task have reported that CI children were outperformed by NH children matched for chronological age, regardless of age of implantation and the chronological age of the CI children (Burkholder & Pisoni, 2003; Fagan et al., 2007; Geers, 2003; Pisoni, 2005). Only the study of Spencer and Tomblin (2009) showed that CI children had digit span scores similar to those of NH children matched for reading level.

As reviewed above, data on the development of phonemic awareness skills are not clear-cut since CI children performed worse than NH children matched for reading level and

reading comprehension level, but at a similar level to NH children matched for chronological age. These results are surprising and suggest that control groups may sometimes not provide an age-appropriate level of phonemic awareness. Moreover, except for Spencer and Tomblin (2009), the studies cited above reported a general impairment in both phonological and lexical short-term memory. In light of these different results, it is currently difficult to establish a clear relationship between phonemic awareness, phonological memory, and lexical short-term memory skills, and to predict their impact on reading skills.

1.2. Reading skills in children using cochlear implant

Most studies on reading acquisition and skilled reading are based on the dual-route model, which holds that written words can be read either by a lexical or a sublexical procedure (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001). The lexical procedure gives direct access to the subject's internal lexicon from the orthographic word form. Reliance on the sublexical procedure in alphabetic scripts consists of translating sublexical written units (graphemes) into sublexical units of the spoken language (phonemes), which are then "assembled". In reading, phonological processing refers to a set of processes that involve the phonological structure of words. As such, it refers to the efficiency of both grapho-phonemic decoding and of phonological and lexical short-term memory. Phonemic awareness, which requires manipulating the phonemic units of spoken words, makes it possible to decompose written words into graphemes and to establish correspondences between graphemes and phonemes. Phonological short-term memory is needed to assemble the phonological code and retain them in order to decode newly encountered words and pseudowords. Lexical short-term memory facilitates the association between the phonological code and the lexical representation of stored words. Phonemic awareness and phonological short-term memory are crucial for reading acquisition because they underpin the learning of the principle of the

alphabet and allow children to understand the grapheme-phoneme correspondences used to decode written words phonologically (i.e., to access a phonological representation of text). In addition, the sublexical reading procedure acts as a bootstrapping mechanism upon which the lexical procedure can develop. These two procedures are assumed to be used in parallel to process printed material, with processing tradeoffs that depend on the overall level of word identification attained (e.g. for English-speaking children: Backman, Bruck, Hebert, & Seidenberg, 1984; Waters, Seidenberg, & Bruck, 1984; for French-speaking children: Sprenger-Charolles, Siegel, & Bonnet, 1998; Sprenger-Charolles, Siegel, Béchennec, & Serniclaes, 2003).

In the dual-route model, the efficiency of the sublexical procedure is usually assessed through performance on the task of reading aloud pseudowords. The efficiency of the lexical procedure is usually assessed using performance on the task of reading aloud irregular words or very frequent regular words. The lexicality effect (superiority of regular or irregular words over pseudowords) is also taken as an indicator of subjects' use of the lexical procedure to read these words.

To determine whether or not reading skills have developed differently in CI children – i.e. whether there is a deviant developmental trajectory rather than a developmental lag or delay– their reading performance must be compared to that of NH children matched for reading level. The categorization of impairments as either deficits or delays was described by Bryant and Impey (1986) for dyslexic reading skills. They suggested that in order to establish the presence of processing impairments, it is essential to establish a comparison of the dyslexic performance to that of normal readers matched for reading level. When dyslexic readers perform less well than their reading level controls, the skill being assessed is considered deficient and is assumed to be causally related to reading impairment. In contrast, when dyslexic readers perform similarly to reading level controls, the assessed skill is

considered to be developmentally delayed and the observed impairment of that skill is regarded as a consequence of the reading disability. Both deficiency and developmental delay indicate impaired processing: the distinction simply characterizes the extent to which each of these impairments is causally involved in dyslexics' reduced reading ability. Because our aim is to highlight the presence of processing impairments in CI children, separating deficiency from developmental delay is highly relevant.

To our knowledge, there are only a few studies assessing the efficiency of the sublexical and lexical procedures in CI children. Studies on the sublexical procedure indicate that CI children use it with the same accuracy as NH children. More precisely, the sublexical procedure has been assessed through the Word Attack subtest of the Woodcock Reading Mastery Tests (WRMT) or with a lexical decision task. Geers (2003) observed that CI children fitted at 5;6 years on average and ranging from 8 to 9;11 years old obtained an average mid-to-high 2nd- grade reading level on the word attack task. According to this result, 10 (5.5%) CI children were non-readers (below first grade), 54 (30%) had attained a first grade reading level, 63 (35%) second grade, 25 (14%) third grade, and 29 (16%) fourth grade or higher. Since most of the CI children had just completed the first, second or third grade, Geers (2003) concluded that scores on the Word Attack task corresponded to actual grade placement. Using the Word Attack test, Spencer and Tomblin (2009) observed that CI children obtained similar scores to NH children matched for reading comprehension level, but also found that the scores of CI children were significantly lower than those of normal hearers matched for chronological age. Vermeulen et al. (2007) complemented these results with a lexical decision task, observing that CI children fitted at an average age of 6 years and tested at the age of 13 had scores within norms established by NH children matched for grade level. Fagan et al. (2007) observed better performance for CI children (fitted at an average age of

2.5 years and tested at 9.1 years of age) because on the same task most CI children obtained scores within the normal range for NH children matched for chronological age.

Other studies have indicated that CI children use the lexical procedure with the same accuracy as NH children. The lexical procedure was assessed either through the Reading Recognition subtest of the PIAT (Peabody Individual Achievement Test), where CI children had to read simple words (Geers, 2003; Fagan et al., 2007), or through the lexical decision task, where CI children read very frequent words (Vermeulen et al., 2007). Using the PIAT, Geers (2003) found that CI children performed as well as NH children matched for grade level. Furthermore, Fagan et al. (2007) showed that CI children had good skills with the lexical procedure obtaining the same scores on this test as NH children matched for chronological age. Vermeulen et al. (2007) complemented these results with a lexical decision task, finding that all CI children had scores within norms established by NH children matched for grade level. Thus, the phonological processing skills of CI children seem to be sufficient to allow them to acquire orthographic knowledge and to develop the lexical procedure.

The existing literature suggests that CI children use the lexical and sublexical procedures with the same accuracy as NH children matched for grade level and are able to use reading-related skills to develop reading skills. Nevertheless, these studies were carried out using diverse control groups (comparisons with grade level, chronological age, and reading comprehension level peers) preventing them from giving a clear image of the developmental trajectory of CI children's reading skills. As mentioned above, comparison with reading level controls is essential to show deficit or delayed performance. Moreover, the studies cited above used only accuracy scores to assess the efficiency of the sublexical and lexical procedures. It has recently been suggested that it would be more appropriate (particularly with transparent orthographies) to measure both accuracy and processing time due to speed-accuracy tradeoffs. Processing time offers a fine-grained measure of reading skills (see for

example Sprenger-Charolles et al., 2003; Sprenger-Charolles, Colé, Béchennec, & Kipffer-Piquard, 2005).

1.3. The present study

Despite a relative consensus, the number of studies which examine how written words are processed in CI children is too small to allow any clear conclusions about the nature of the relation between reading-related skills and reading skills in CI children. Indeed, although CI children exhibit some difficulties in developing phonological awareness and phonological short-term memory skills, they seem to develop sublexical and lexical procedures with the same accuracy as grade-mates with NH. Thus, additional studies are necessary to ascertain whether the development of the processing of written words and reading-related skills in CI children should be considered to be impaired, delayed, or similar to NH children. This is the purpose of the present study.

The aim of the study was to assess the skills linked to learning to read, i.e. phonemic awareness, phonological and lexical short-term memory, by collecting accuracy scores. We also assessed the efficiency of the sublexical and lexical procedures, measuring both accuracy and latency in reading pseudowords, regular words and irregular words; these different types of items are related to the use of either sublexical (pseudowords) or lexical (regular and irregular words) reading procedures.

The experiment was conducted with children reading in French, whose orthographic system is more transparent than the English one, with which most of the above-cited studies were conducted. Seymour, Aro & Erskine (2003) demonstrated the impact of the transparency of orthographic systems on reading acquisition. In English, a given letter is more often pronounced differently in different words (e.g., a in cat, was, saw, made, car) than in French. The French writing system is thus referred to as more consistent or transparent than that of

English writing system, which is referred to as inconsistent or opaque. The orthographic consistency of a writing system has been shown to influence reading, and more particularly the ability to phonologically process written words (Frost, Katz, & Bentin, 1987; Ziegler, Perry, Jacobs, & Braun, 2001; Ziegler, Bertrand, Tóth, Csépe, Reis, Faísca, Saine, Lyytinen, Vaessen, & Blomert, 2010). It is thus important to determine whether French-speaking CI children perform similarly to English-speaking children when learning to read.

2. Method

We assessed the reading and reading-related skills of 5 French CI children. They were compared to NH children with the same reading level, using a case-study design where the performance of each CI child was compared to that of 10 control subjects.

2.1. Participants

2.1.1. Participants with cochlear implant

Five CI children were recruited from French services for the deaf. The children ranged from 9;6 to 12;3 years and from grades 3 to 5. Their age at the time they received their multichannel cochlear implant ranged from 2;3 to 8;2 years. All had hearing parents. Three children were congenitally deaf and two children presented a progressive hearing loss since birth. Children who had a progressive hearing loss had been fitted with an implant as soon as they became profoundly deaf. Table 1 describes the characteristics of each CI participant. The communication method reported in this Table reflects the method used at home. Before implantation, all but one of the children used conventional hearing aids and “LSF” (“Langue des Signes Française”, a French version of the ASL). After implantation, all of the children used spoken language, and children using LSF before implantation continued to use it.

However, all of the children used only spoken language at school, since all were enrolled in mainstream classes with NH children.

Children with cochlear implants	Gender	Chronological Age (years; months)	Age at Diagnosis (years; months)	Aetiology	Degree of hearing loss at birth	Age of CI fitting (years; months)	Length of CI use (years; months)	Communication mode	Education Placement
CI.1	F	9;6	0;6	Connexine 26	Profound	2;3	7;3	Spoken Language and LSF	Mainstream
CI.2	M	10	1;5	Unknown	Profound	2;6	7;6	Spoken Language and LSF	Mainstream
CI.3	M	10;1	1;8	Unknown	Severe	5;5	4;8	Spoken Language	Mainstream
CI.4	M	10;8	2	Unknown	Severe	8;2	2;6	Spoken Language and LSF	Mainstream
CI.5	M	12;3	1;5	Unknown	Severe	6;3	6	Spoken Language and LSF	Mainstream

Table 1. Characteristics of children with cochlear implant (CI) (Experiments 1 and 2)

2.1.2. Hearing Comparison Group

Because our aim was to examine whether CI children present a developmental delay or non-typical development in reading-related skills and in the use of reading procedures, each CI child was matched with 10 NH children with the same reading level. We used this single-case study design because of the heterogeneous character of the population of CI children (differences in age of implantation, chronological age, degree of hearing loss at birth, and length of CI use). Reading level was assessed with the “L’Alouette” test (Lefavrais, 1967), which determines reading age expressed in months and defined by reading speed and accuracy (see Sprenger-Charolles et al., 2005, for explanation). Thus, each CI child was matched with 10 NH children on reading age within a three-month range. In all, fifty NH children ranging in age from 8.8 to 10.9 years constituted five control groups. All the normal-hearing children met the following criteria: (a) they had reading age within the normal range, standard scores were not more than 1 SD above or below the mean on the “l’Alouette” test,

(b) they were native speakers of French, and (c) they had no known history of hearing impairment or reading impairment.

As indicated in Table 2, children took part in the study if their nonverbal cognitive development was considered to be within normal limits using a nonverbal reasoning test from the progressive matrices (PM47, Raven, 1947). The scores of all CI children and their control groups were within the normal range. Additionally, the chronological age of 3 NH groups out of 5 was significantly higher than the chronological age of the CI participants (CI.NH.2: $t(9) = 7.39$, $p < .001$, CI.NH.4: $t(9) = 2.94$, $p < .05$, CI.NH.5: $t(9) = 24.1$, $p < .001$) whereas the chronological age of CI.1 was lower than those of the children in NH.1 (CI.NH.1: $t(9) = 3.54$, $p < .001$) and the chronological age of child CI.4 and his NH group did not significantly differ (CI.NH.3: $t(9) = 1.03$, $p > .20$). The reading scores of the CI children and NH controls did not significantly differ (CI.NH.1 and CI.NH.4: $t(9) < 1$, CI.NH.2: $t(9) = 1.38$, $p = .20$, CI.NH.3: $t(9) = 1.27$, $p > .20$, CI.NH.5: $t(9) = 1.24$, $p > .20$).

Finally, we also assessed receptive and productive vocabulary skills with picture pointing and naming tasks, respectively. These tasks were adapted from the EVIP (échelle de vocabulaire en images: Peabody, Dunn, Theriault-Whalen, and Dunn, 1993), a French version of the BPVS (British picture vocabulary scale: Dunn & Dunn, 1997). The test of receptive vocabulary asks the child to select a word-target from four pictures and requires no verbal output by the child. In the test of productive vocabulary, children have to name the picture that is presented. We had assessed vocabulary skills following the results of Bryant and Impey (1986) and Stanovich (1986) indicating that vocabulary size is correlated with reading level. As indicated in Table 2, 4 CI children out of 5 had less accurate receptive vocabulary scores than their NH groups (CI.NH.1: $t(9) = 11.8$, $p < .001$, CI.NH.2: $t(9) = 6.92$, $p < .001$, CG4: $t(9) = 20.5$, $p < .001$; CI.NH.5: $t(9) = 6.93$, $p < .001$) whereas the picture pointing scores of child CI.3 and his control group did not differ significantly (CI.NH.3: $t(9) < 1$). Three CI

children out of 5 had less accurate productive vocabulary scores than NH children (CI.NH.1: $t(9) = 13.1, p < .001$, CG2, CI.NH.2: $t(9) = 5.77, p < .001$, CI.NH.4: $t(9) = 19.6, p < .001$) whereas the naming scores of children CI.3 and CI.5 did not differ significantly from those of their NH controls (CI.NH.3: $t(9) = 1.19, p > .20$, CI.NH.5: $t(9) < 1$).

		Chronological Age		Reading Age		PM47		EVIP Picture-pointing		EVIP Picture-naming	
		years ; months	p	years ; months	p	Number of correct responses /36	percentiles	Percentage of correct responses	p	Percentage of correct responses	p
1	CI	9;6	$p < .001$	10;1	$p = .40$	34	75	64,9	$p < .001$	37,8	$p < .001$
	NH	10;4 (0;5)		10;3 (0;2)		33.2 (2.5)	75	90.5 (2.5)		70.5 (2.9)	
2	CI	10	$p < .001$	8;6	$p = .70$	32	50	73	$p < .001$	40.5	$p < .001$
	NH	9 (0;4)		8;6 (0;2)		32.9 (2.3)	75	87.2 (2.5)		61.9 (4.5)	
3	CI	10;1	$p = .20$	9;7	$p = .80$	34	75	86.5	$p = .90$	65	$p = .26$
	NH	9;7 (0;6)		9;7 (0;3)		31.3 (2.3)	50	86.2 (2.4)		68.9 (4)	
4	CI	10;8	$p < .05$	10;1	$p = .55$	33	50	46	$p < .001$	21.6	$p < .001$
	NH	10;4 (0;5)		10;3 (0;2)		33.2 (2.5)	75	90.5 (2.5)		70.5 (2.9)	
5	CI	12;3	$p < .001$	8;6	$p = .70$	32	50	73	$p < .001$	64.5	$p = .20$
	NH	9 (0;4)		8;6 (0;2)		32.9 (2.3)	75	87.2 (2.5)		61.9 (4.5)	

Table 2: Cochlear implant (CI) and normal hearing (NH) participants' chronological age, reading age, vocabulary size and non-verbal IQ level. For normal-hearing children, mean and standard deviation in parentheses are presented.

2.2. Experimental tasks

2.2.1. Reading-related skills

Because most research has found weak speech sound perception skills in the majority of the CI child population (Chin, 2003; Medina and Serniclaes, 2009), and because some reports suggest that poor phonemic representations may have an impact on the development of phonological skills (for a review with dyslexic people, see Snowling, 2001), we expected CI children to have impaired phonological skills and thus to perform less well than NH children. We also expected these children to be impaired on phonemic awareness and phonological short-term memory tasks, where they could not use lexical feedback or

information. Indeed, difficulties in organizing the categorization of speech sounds are more likely to prevent children from identifying, manipulating and memorizing speech units like syllables and phonemes. Phonological awareness and phonological short-term memory rely heavily on the speech sound perception needed to develop these abilities.

Two tasks were administered in order to assess subjects' phonological short-term memory and phonological awareness skills. Both were taken from EVALEC, a computerized battery of tests on reading and reading-related skills for French elementary school children (Sprenger-Charolles et al., 2005). Because some data have indicated that CI children display a reliable influence of lip-reading skills on spoken language development (Bergeson, Pisoni & Davis, 2003; Bergeson, Pisoni & Davis, 2005; Lachs, Pisoni & Kirk, 2001; Leybaert & Colin, 2007; Spencer & Tomblin, 2009; Tyler, Fryauf-Bertschy, Kelsay, Gantz, Woodworth, & Parkinson, 1997), the stimuli used in the tasks were pre-recorded and were presented at a comfortable level through headphones (Beyerdynamic DT290). However, in both tests children could potentially use lip-reading to understand instructions. We also avoided a potential lexical influence in the phonological awareness and phonological short-term memory tasks by exclusively using pseudowords.

In order to assess lexical short-term memory, we used the digit span subtests from the WISC-IV (Wechsler, 2005). This task was administered following the instructions in the manual, so that children could potentially use lip-reading to understand instructions and to listen to the stimuli. Furthermore, because lexical knowledge influences speech perception (Frauenfelder, Segui & Dijkstra, 1990; Samuel, 1996), it could facilitate memorization and manipulation of digits compared with tasks using pseudowords, for which no such knowledge is available. Performance on the digit span task is usually interpreted in terms of lexical skills, since this task requires retaining and manipulating both phonological and semantic forms in short-term memory.

Phonemic awareness. The test used to assess phonemic awareness involved the deletion of the first phoneme of a pseudoword composed of three phonemes. The test consisted of 12 three-phoneme pseudowords with a consonant-consonant-vowel structure (CCV) (e.g. *klo*). Accuracy on each task was measured.

Phonological short-term memory. This task consisted of repeating pseudowords aloud (e.g. *moukola*). Twenty-four pseudowords from three to six syllables long (six per length, three with CV syllables only and three with CVC syllables) were presented in increasing order of syllable length. The subjects heard the items one by one through headphones, and had to repeat each item as accurately as possible with no time limit. Accuracy was measured.

Lexical short-term memory. On the digit span test, both the forward digit span subtest (the subject repeats the digits in the order they were read to him/her) and backward digit span subtest (the subject repeats the digits in the opposite order) were administered, following the standard procedure. In both the subtests, lists were spoken live-voice by the experimenter with lip reading cues available, and produced at a rate of approximately one digit per second.

2.2.2. *Reading skills*

The second aim of this experiment was to examine the development of both lexical and sublexical reading procedures in French CI children. The fact that beginning readers rely primarily on the sublexical procedure to read words seems to be well established (Bosman & de Groot, 1996; Doctor & Coltheart, 1980; Sprenger-Charolles & Casalis, 1995; Sprenger-Charolles et al., 2003). A number of studies also indicate that this procedure may gradually be replaced by an orthographic or a lexical procedure (in English, Johnston, Thompson, Fletcher-Flinn, & Holligan, 1995; in French, Sprenger-Charolles et al., 2005).

In this framework, we used pseudowords, assumed to be the best “signature” of the sublexical procedure in grades 1 to 4, whereas we used regular and irregular words as an indicator of the use of the lexical procedure by CI children in grades 1 to 5. Sprenger-Charolles et al. (2005) observed that regular words were read through the lexical procedure by French children as early as grade 1, whereas irregular words were read by the lexical procedure starting only in grade 2 (first-grade children could not read irregular words with sufficient accuracy). The use of both types of words was thus a precaution with regard to the use of the lexical procedure by CI children on irregular words, which may in some cases still be too difficult for them to read.

Moreover, because in the studies reported above only percent correct responses were used, leading to a potential ceiling effect, we measured both accuracy and response time, which allows us take into account speed-accuracy tradeoffs, and exploits the fact that processing time offers a fine-grained measure of performance (see for example Sprenger-Charolles et al., 2003).

Studies comparing the performance of CI children to the normative data for NH children have indicated that they are able to develop the sublexical procedure within the average range for their grade level (Fagan et al., 2007; Geers, 2003; Spencer & Tomblin, 2009; Vermeulen et al., 2007). According to these studies, as well as study which indicates that some CI children develop phonemic skills to the same level as NH children (Spencer & Tomblin, 2009), these children might also be expected to present a reading skills development trajectory which parallels that of NH children. In comparison with NH children of the same reading level, improvement in their performance would be delayed. Alternatively, James et al.'s (2008) finding of deficits in phonemic skills in an English-speaking population, for example, might also lead to an expectation of impaired development of the sublexical

procedure, as well as deficiencies in both the accuracy and latency of pseudoword reading in CI children compared to NH children.

The very few studies conducted on the development of the lexical procedure have suggested that this reading procedure develops normally in CI children. Using simple or very frequent words, Geers (2003), Vermeulen (2007) and Fagan et al. (2007) found similar performance in CI children when compared to NH children with the same grade level and the same chronological age. These studies used only accuracy scores. More importantly, in heterogeneous populations such as CI children whose chronological age, length of CI use and age of CI fitting can vary widely, it is difficult to determine a precise written frequency for words corresponding to their reading level. Thus, it is difficult to draw any firm conclusions about the nature of the reading procedure used with these words.

Because the sublexical procedure seems to be a bootstrapping mechanism in reading acquisition (Share, 1999), two plausible hypotheses with regard to the reading skills development of CI children can be suggested. We postulated that good skills with the sublexical procedure would allow the lexical procedure to develop normally, and we expected to observe similar performance in the reading of regular and irregular words in CI and NH children. Alternatively, weak skills in the use of the sublexical procedure could have a negative impact on the development of the lexical procedure and lead to deficits in the reading of regular and irregular words.

Reading tasks

The items used to assess the development of the lexical and sublexical procedures are drawn from tasks called “LEXORT” and “LEXLENGTH” (EVALEC, Sprenger-Charolles et al., 2005). LEXLENGTH uses 20 irregular words and 20 pseudowords matched for length (number of letters, phonemes, and syllables), orthographic frequency (bigram frequency,

Content & Radeau, 1988) and for their initial grapheme. 20 regular words were chosen from LEXORT and matched to pseudowords from LEXLENGTH for length (number of letters, phonemes, and syllables), orthographic frequency (bigram frequency, Content and Radeau, 1988), and initial grapheme.

The children were instructed to read aloud the item displayed in the center of the screen as quickly and accurately as possible. Practice items were used to make sure that the child understood the instructions. The procedure on each trial was as follows. A fixation cross remained in the center of the screen for 500 ms and was immediately followed by the test item in lower-case letters. The item remained on the screen until the subject had finished reading aloud, at which point the experimenter triggered the presentation of the next item.

Response latency and accuracy were recorded. A sound card was used to record the children's vocal responses in individual files. The software calculated latency by detecting the onset of the response in the speech signal, allowing for manual readjustment if necessary and the elimination of latencies on incorrect responses. This enabled the experimenter to calculate the percentage of errors and ensure that no invalid latencies were included.

The order in which the 3 lists were administered was random across children.

2.2.3. Procedure

Before the test session, we first ensured that CI children were able to hear the stimuli. Children listened to several list of 10 very frequent words (examples: “chat”-“cat”, “jambe”-“leg”, “petit”-“little”, “maison”-“house”, “enfant”-child”, “rat”-“rat”, “ours”-“bear”, “rouge”-“red”, “vélo”-“bike” and “neige”-“snow”) at a comfortable level through headphones (70 dB). They had to repeat one list and we considered that the hearing level of the CI children was sufficient if they repeated at least 80% of the words correctly. When they repeated less than 80% of the words correctly, another list of words was presented again with the level increased

by 5dB. The stimuli were presented at 75 dB for 4 CI children (CI.1, CI.2, CI.3 and CI.4) and at 80 dB for CI.5 children.

For all children, testing took place in a quiet room at the participants' school. Every child completed two testing sessions which lasted between 35 and 45 min. During the first session, tests of reading level, vocabulary knowledge, nonverbal reasoning, phonemic awareness, and phonological and lexical short-term memory were administered. The tasks were administered in random order for all the children. During the second session, the reading tasks were performed.

2.2.4. Data processing

In this experiment, we set out to evaluate the impact of cochlear implantation on reading-related skills using a single-case study in which we compared the performance of CI and NH children matched for reading level.

The comparison of one CI child to a control group composed of 10 NH children allows us to describe each CI child's scores relative to a comparable NH group, and to explore individual differences between CI users. The NH group data act as a benchmark against which the CI children's performance is compared. This case-study design was chosen because of the heterogeneity of the CI population (differences in chronological age, age of diagnosis, age of implantation, and the severity of hearing loss at the time of diagnosis). The analysis of performance uses IQR (interquartile range)-score combination comparisons, comparing the IQR-scores of each cochlear implant child to normative data from the corresponding NH group. IQR is a measure of statistical dispersion, equal to the difference between the third and first quartiles, which is used when the data are from a non-normal distribution. If CI children had an IQR-score more than $0.75 \times \text{interquartile}$ below the first quartile or above the third quartile, this was categorized as falling outside of the distribution

of the standard population. When the IQR score refers to percentiles, the score corresponding to $(Q1-0.75*IQR)$ is commonly associated with the fifth percentile, and the score corresponding to $(Q3+0.75*IQR)$ with the 95th percentile. Thus, these scores indicate limits within which scores fall inside the distribution of the standard population. The IQR comparison was performed for all tasks (CCV-deletion, pseudowords repetition, digit span, word and pseudoword reading). The aim of this analysis was to get an indicator of the level of reading performance of French CI children, no such data being available.

In a second analysis, for reading tasks, we used the presence of lexicality effects to assess reliance on the lexical and sublexical procedures. In particular, is the lexicality effect observed for both regular words vs. pseudowords and irregular words vs. pseudowords? For CI children, we conducted these comparisons (lexicality effect between regular words and pseudowords, and lexicality effect between irregular words and pseudowords) as within-item factors and not as within-subject factors, because we were studying the performance of each CI child. Comparisons as within-item factors allow us to highlight lexicality effects whatever the items used. Because EVALEC is a computerized battery of tests, the items taken collectively represent measures of effects. Effects analyzed as within-items factors through comparisons reflect characteristics of the CI population. For groups of NH children, we supplemented comparisons as within-item factors with comparisons as within-subject factors. Because the application conditions for comparisons were not met, we used nonparametric analyses. Wilcoxon's signed-rank test (W_s) was used for within-item analyses and the Mann-Whitney signed-rank test (T) was used for within-subject analyses to test the effects of lexicality.

3. Results

3.1. Reading-related skills in French children with cochlear implant

IQR-scores of CI children relative to their reading level-matched peers for the phonemic awareness task, the pseudoword repetition task, and the digit span task are reported in Table 3.

All CI children had lower scores than their control group for the phonemic deletion task with CCV pseudowords, and pseudoword repetition task. No score was found to be within the normal range compared to the reading level-matched group.

In contrast, most of the CI children recalled digits on both the backward and forward tasks with the same accuracy as their control group. Four CI children out of 5 obtained the same span as their control group for the forward digit span task, and all CI children had the same span as their control group for the backward digit span task. In summary, most of the digit memory scores were found to be within the normal range compared to the reading-matched group.

3.2. Reading skills in French children with cochlear implant

Table 3 shows the IQR scores of CI children on the reading aloud of pseudowords, as well as regular and irregular words, relative to their reading-level-matched peers, for both response latency and accuracy.

Pseudowords. All of the CI children were within the NH range for pseudowords, both for accuracy and latency.

Regular words. Similarly, for the regular words, all of the CI children were within the NH range for accuracy scores, and only one child had longer latencies than controls.

	Reading related skills				Reading skills					
	CCV	Pseudowords repetition	Forward digit span	Backward digit span	Pseudowords		Regular words		Irregular words	
	%Correct Response	%Correct Response	Span	Span	%Correct Response	Response Latency	%Correct Response	Response Latency	%Correct Response	Response Latency
CI.1 – score	75*	8*	3*	3	90	758	94	601	65*	741
NH.1 - Inferior limit	100	45	3.7	2.3	80	709	92	518	95	634
NH.1 - Superior limit	100	76	8	4.8	100	1059	100	625	95	749
CI.2 – score	75*	0*	5	3	90	880	100	606	50*	793
NH.2 - Inferior limit	85	48	4	2.3	82	804	100	588	78	626
NH.2 - Superior limit	106	74	7.7	4.8	100	1520	100	804	103	1220
CI.3 – score	92*	33*	5	5	90	1051	100	626	95	721
NH.3 - Inferior limit	100	43	4.3	2.3	77	669	100	509	79	578
NH.3 - Superior limit	100	75	6.8	5	100	1275	100	723	107	963
CI.4 – score	67*	8*	5	3	95	918	92	628*	55*	695
NH.4 - Inferior limit	100	45	3.8	2.3	80	709	92	518	77	574
NH.4 - Superior limit	100	76	8	4.8	100	1059	100	625	108	1061
CI.5 – score	75*	13*	5	3	90	987	100	731	55*	788
NH.5 - Inferior limit	85	49	4	2.3	82	802	100	606	78	626
NH.5 - Superior limit	107	74	7.7	4.8	100	1520	100	804	103	1220

Table 3: Cochlear implant (CI) participants' scores at reading related skills and reading tasks. For normal-hearing (NH) children, norms defined by inferior and superior limit, are presented. Scores reflecting poorer performances relative to the NH norms indicated in bold and flagged with a star.

Irregular words. In striking contrast, for the irregular words, all of the CI children except one (CI.3) were outside the NH range for reading accuracy. However, when correctly reading irregular words, all of the CI children were inside the NH norms for reading latency.

3.2.1. Lexicality effect between regular words and pseudowords

We observed a lexicality effect between regular words and pseudowords for both CI children (CI.1: Wilcoxon test: $z=1.58$, $p<.05$, $N=17$; CI.2: Wilcoxon test: $z= 4.41$, $p<.001$, $N=16$; CI.3: Wilcoxon test: $z=4.02$, $p<.001$, $N=17$; CI.4: Wilcoxon test: $z=4.16$, $p<.001$, $N=17$; CI.5: Wilcoxon test: $z=4.66$, $p<.001$, $N=16$) and NH children (NH.1: $T(10) = 4.78$, $p<.001$, Wilcoxon test: $z=5.23$, $p<.001$, $N=17$; NH.2: $T(10) = 5.02$, $p<.001$, Wilcoxon test: $z=5.23$, $p<.001$, $N=18$; NH.3: $T(10) = 4.78$, $p<.001$, Wilcoxon test: $z=5.23$, $p<.001$, $N=18$; NH.4: $T(10) = 4.78$, $p<.001$, Wilcoxon test: $z=5.23$, $p<.001$, $N=17$; NH.5: $T(10) = 5.02$,

$p < .001$, Wilcoxon test: $z = 5.23$, $p < .001$, $N = 18$). Regular words were always processed faster than pseudowords (difference between the mean response latencies for words and pseudowords for CI.1 and NH.1, respectively, -73 and -240 ms; for CI.2 and NH.2, respectively, -96 and -339 ms; for CI.3 and NH.3, respectively, -179 and -239 ms; for CI.4 and NH.4, respectively, -340 and -240 ms; for CI.5 and NH.5, respectively, -212 and -339 ms).

3.2.2. *Lexicality effect between irregular words and pseudowords*

While only 2 CI children presented a lexicality effect (CI.3: Wilcoxon test: $z = 1.96$, $p = .05$, $N = 17$; CI.5: Wilcoxon test: $z = 2.52$, $p < .05$, $N = 14$), this effect was found for all control groups (NH.1: $T(10) = 3.73$, $p < .001$, Wilcoxon test: $z = 4.27$, $p < .001$, $N = 20$; NH.2: $T(10) = 2.94$, $p < .01$, Wilcoxon test: $z = 3.22$, $p < .01$, $N = 20$; NH.3: $T(10) = 3.70$, $p < .001$, Wilcoxon test: $z = 4.33$, $p < .001$, $N = 20$; NH.4: $T(10) = 3.73$, $p < .001$, Wilcoxon test: $z = 4.27$, $p < .001$, $N = 20$; NH.5: $T(10) = 2.94$, $p < .01$, Wilcoxon test: $z = 3.22$, $p < .01$, $N = 20$). This effect favored irregular words (difference between the mean response latencies for words minus pseudowords for NH.1, -197 ms; for NH.2, -250ms; for CI.3 and NH.3 children, respectively, -329 and -218 ms; for NH.4 -197 ms, for CI.5 and NH.5 children, respectively, -199 and -250 ms). Results also indicated that 3 CI children read irregular words and pseudowords with the same speed (CI.1: Wilcoxon test: $z = 0.52$, $p > .20$, $N = 15$; CI.2: Wilcoxon test: $z = 0.35$, $p > .20$, $N = 16$; CI.4: Wilcoxon test: $z = 0.98$, $p > .20$, $N = 9$).

4. Discussion

The present study investigated both the reading and reading-related skills of French CI children and sought to compare their degree of development to that of NH control children matched for reading level. CI children gain auditory access to language after a period of absence of reliable auditory experience, and it is thus important to study their spoken

language abilities, such as phonemic awareness and phonological and lexical short-term memory skills, in order to explore their links with reading skills development.

We found that all CI children had lower scores than their control group for phonemic awareness and phonological short-term memory tasks. In contrast, 4 CI children out of 5 presented the same skills as controls in lexical short-term memory.

For reading skills, all CI children read pseudowords with the same accuracy and rapidity as NH children. Analyses of lexicality effects showed that CI children used the sublexical procedure to read pseudowords, and that all CI children read regular words with the same efficiency as NH children, whereas all but one of the CI children had difficulty reading irregular words. Lexicality effect analyses showed that all CI children read regular words using the lexical procedure, whereas only two of the CI children were able to use the lexical procedure to read irregular words.

4.1. Reading-related skills in French children with cochlear implant

The comparison of the CI children with their reading level-matched group was aimed at determining whether the phonological skills that contribute to reading success develop normally in CI children, and if not, whether the observed phonological impairments constitute a deficit. As expected, all CI children were outperformed by NH controls on the phonemic awareness task. Impairment was observed on accuracy scores for the CCV phoneme deletion task, indicating a deficit of phonemic awareness. These results differ somewhat from the findings of Spencer and Tomblin (2009), but are coherent with those of James et al. (2008). The CI children in our study were impaired on the phonemic awareness task, whereas Spencer and Tomblin (2009) reported that CI and NH children obtained similar scores on the same task. This difference might be explained by the fact that Spencer and Tomblin (2009) used words whereas we used pseudowords. Lexical information could therefore have helped CI

children to perform the task, leading to performance similar to the control group. Results on short-term memory support this explanation, since CI children were also outperformed by NH children on the pseudoword repetition task, but not on the digit repetition task. The present results on pseudoword repetition task replicate those previously observed with the same task (Dillon et al., 2004; Spencer & Tomblin, 2009) and show that CI children present a deficit in phonological short-term memory.

However, most of the CI children performed similarly to NH children on both backward and forward span tasks. This result differs from the observations of studies in English-speaking populations (Burkholder & Pisoni, 2003; Fagan et al., 2007; Geers, 2003; Pisoni, 2000; Pisoni, 2005), wherein CI children have been outperformed by NH children matched for chronological age on digit span tasks. The fact that we compared CI children with reading level controls (whose chronological ages were inferior or equal to those of the CI children) and not with chronological age controls could explain this difference. Our results suggest not a deficit, but a delay in CI children's lexical short-term memory development.

Whereas previous studies cited above reported a general impairment in both phonological and lexical short-term memory, our results with French CI children show a deficit in the pseudoword repetition task but not in the digit span tasks. This suggests that CI children do not have a general short-term memory impairment, and that the lexical/semantic information provided by the stimuli of the digit-span tasks may have helped them to perform these tasks. As suggested above, speech perception in some CI children might be driven in some way by lexical knowledge. Thus, when tasks use words (as in the digit span task or the deletion task used by Spencer & Tomblin, 2009), children may perform them with the help of stored lexical knowledge, leading to better performance than on tasks involving pseudowords, where no lexical help is available (e.g. pseudoword repetition task). Lexical information could

have provided some additional feedback, influencing the CI children's performance and leading to better results when lexical representations were available.

As a whole, these results suggest impairments of spoken word phonological processing in CI children. According to the hypothesis initially set forth, weak speech sound perception skills (Chin, 2003; Medina & Serniclaes, 2009; Pisoni, 2000) may have an impact on the development of phonological processing skills in CI children. It has been reported that normal speech perception development allows accurate phonemic representations (Serniclaes, Van Heghe, Mouty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004) which in turn have an impact on the efficiency of the phonological processing involved in reading acquisition (that is, phonological mediation but also phonemic awareness and phonological short-term memory).

4.2. Reading skills in French children with cochlear implant

The present study was the first to test the development of the sublexical and lexical procedures in French CI children in comparison with NH children matched for reading level, and to compare their reading and reading-related skills.

Despite the apparent difficulty in reading-related skills in CI children, our findings show that they have developed reading ability that corresponds to their reading age.

The use of the sublexical procedure. As expected from previous research, all the CI children in the present study read aloud pseudowords with the same accuracy and speed as NH children matched for reading level. These results indicate that CI children use the sublexical procedure corresponding to their reading level. This confirms the results of Geers (2003) and Vermeulen et al. (2007). Sixty-five percent of CI participants in Geers's study and all groups of CI participants in Vermeulen's study were able to read words and pseudowords as accurately as NH children with the same grade level. Thus, although we found deficits in

reading-related skills, the CI children in our experiment seem to have developed phonological mediation as efficient as that of reading-level controls.

The use of the lexical procedure. The success of CI children in using the lexical procedure to read regular words was reported by Geers (2003) and Fagan et al. (2007), who showed that the majority of CI children obtained scores similar to those of NH children at the same grade level and with the same chronological age, respectively. Our findings revealed that all the CI children were within the NH range for regular word reading in accuracy and that the majority of CI children were within the NH norms for latency. We also found that all the CI children use the same procedure (the lexical procedure) as NH children to read regular words, as demonstrated by the lexicality effect. The regular words we used came from the EVALEC battery, and have been found to be read by the lexical procedure as early as the end of first grade (Sprengr-Charolles et al., 2005). Thus, we observed that all the CI children were able to use the lexical procedure to read regular words, whereas they obtained lower scores than NH children in phonemic awareness and phonological short-term memory.

However, only one CI child used the lexical procedure as efficiently as NH children to read irregular words: only this child's performance fell within the normal range for accuracy and speed, and presented a lexicality effect for irregular word reading. Another CI child was able to use lexical procedure to read irregular words, as indicated by a lexicality effect, but this child was outside the normal range for accuracy. These results indicate that this child used the lexical procedure but with lower accuracy than NH children matched for reading level. The 3 remaining children did not manifest a lexicality effect and performed outside the normal range for accuracy, although they performed similarly to NH children when response latencies for correct responses were taken into account. These results show that the CI children were unable to use the lexical procedure for reading irregular words.

One reason for the difference in accuracy when reading regular words and irregular words in CI children may lie in the difference in frequency between these two kinds of words. Because in French, regular words are more frequent than irregular words (for example, in our study, frequency is respectively of 27.7 and 14.5 as indicated by Manulex; Lété, Sprenger-Charolles, & Colé, 2004), regular words could be stored in the orthographic lexicon, whereas irregular words have not been read frequently enough to be stored in the orthographic lexicon. Thus, it may be more difficult for them to learn and to retain irregular words than regular words, and for this reason there may be fewer irregular than regular words stored in the orthographic lexicon.

Vocabulary level could in fact explain the CI children's very poor performance in reading irregular words. Indeed, our CI population shows a very low level of vocabulary: the *z*-scores of 4 CI children out of 5 fell outside the normal distribution for productive vocabulary, and 3 CI children out of 5 presented a deficit in receptive vocabulary. Many studies have observed deficits in vocabulary knowledge in CI children (Fagan et al., 2007; Hayes, Geers, Treiman, & Moog, 2009; James et al., 2008; Osberger, Miyamoto, Zimmerman-Phillips, Kemink, Stroer, Firszt, & Novak, 1991; Pisoni, 2000; Spencer, 2004). An underdeveloped auditory lexicon could hinder the development of an orthographic lexicon, possibly leading to an inefficient use of the lexical procedure. Finally, CI children's vocabulary level is correlated with their reading level (Fagan et al., 2007). These vocabulary deficits could thus explain the low percentage of correct responses on irregular word identification.

Thus, our results show that all but one of the CI children in the study present a deficit in using the lexical procedure for irregular word reading whereas all the CI children used the sublexical procedure. It should be remembered that the reading skills of CI children documented in this study were assessed in comparison to NH children matched for reading

level, and not for written comprehension or chronological age. The comparison with reading level controls is fundamental in order to establish the presence of processing impairments (a deficit or a delay, Bryant & Impey, 1986). Moreover, by assessing reading level using 3 types of items, i.e., regular words, irregular words, and pseudowords, it was possible to gain insight into the skills of CI children in the use of different reading procedures, the different types of items being related to the use of either sublexical or lexical reading procedures.

Finally, one of the main results of this study was that whereas CI children present a phonological processing deficit in the assessed reading-related skills, they are nonetheless able to use the sublexical and lexical procedures. Numerous studies with NH children have indicated a connection between phonemic awareness and phonological short-term memory, on one hand, and written word identification, on the other (McDougall et al., 1994; Snowling, 2001; Sprenger-Charolles et al., 2000). To our knowledge, only two studies have explored this relationship between reading-related skills and reading skills in CI children. Spencer and Tomblin (2009) reported that score on the Word Attack test is correlated with performance on tasks that assess phonological awareness using words (deletion task with phoneme unit: .65) and with tasks assessing phonological short-term memory (pseudoword repetition: .44 and digit span: .53). According to Spencer and Tomblin (2009), developing a good level of phonemic awareness and phonological short-term memory allows CI children to develop a good level of word reading ability as well. In a study using a word reading test from the British Ability Scales, Unthank, Rajput and Goswami (2001) found that CI children fitted early (on average at 2;10 years) recognized printed words more precisely than CI children fitted late (on average at 6 years) (93% versus 81% of correct responses). They also found that, for all CI children, the correlation between Rhyme (with words) and reading tasks was significant (Pearson's correlation .490; $p < .05$). These findings provide evidence that, like NH

children, CI children use reading-related skills in written word identification. However, apart from one task (the pseudoword repetition task of Spencer and Tomblin, 2009, and Pisoni, 2004), all the tasks mentioned above used words to assess the reading-related skills of CI children.

Our results thus suggest that regular word reading processes in CI children are comparable to those of NH controls despite deficits in phonemic awareness and phonological short-term memory for all CI children. This seems incongruent with the fact that phonological skills play a determining role in reading acquisition (for a review: Sprenger-Charolles, Colé & Serniclaes, 2006). Further, apart from a few words that could have been learned by heart, beginning readers depend mainly on the sublexical procedure (for English, see Backman et al., 1984; Waters et al., 1984; for German, Wimmer and Hummer, 1990; and for French, Leybaert and Content, 1995; Sprenger-Charolles and Bonnet, 1996; Sprenger-Charolles et al., 2003; Sprenger-Charolles et al., 1998).

A deficit in phonological processing remains the most consistent finding in all studies of dyslexia, since beyond phonemic awareness, dyslexics have at least two other major phonological problems: rapid naming (of pictures, colors, digits, letters) and phonological short-term memory (Snowling, 2001; Sprenger-Charolles et al., 2000; Wimmer, 1993, 1996; Ziegler & Goswami, 2005). Dyslexics experience great difficulty when they need to rely on grapheme-phoneme correspondences to read without the help of lexical knowledge (i.e. for the reading of unknown words or pseudowords). This does not seem to be compatible with the results of the present study, which suggest that impaired phonemic awareness and phonological short-term memory skills in some CI children do not affect their development of the sublexical reading procedure. However, there is another phonological property which is deficient in dyslexic children but not in CI children. Besides the classic phonological problems in phonemic awareness and short-term memory, dyslexics display a deficit in the

categorical perception of phonological features, such as voicing and place of articulation in stop consonants (for a review see Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, and Sprenger-Charolles, 2008). This categorical perception deficit arises from the fact that dyslexics discriminate sounds across allophonic boundaries inside the same phonemic category, a fact that has important implications for the acquisition of grapheme-phoneme correspondences and hence for the development of the sublexical reading procedure (Serniclaes et al., 2004). Allophonic perception, and a categorical perception deficit more generally, is specific to dyslexia. Converging evidence from two recent studies comparing CI children to NH children with the same amount of auditory experience indicates that CI children present no categorical perception deficit (Medina & Serniclaes, 2009; Bouton et al., submitted). CI children are thus quite different from dyslexic children in this regard.

In conclusion, the results presented here suggest that some CI children use both a lexical reading procedure for regular words and a sublexical reading procedure with the same efficiency as NH reading controls, despite deficits in phonological awareness and short-term phonological memory. The finding reported elsewhere that, contrary to dyslexic children, CI children do *not* display a deficit in the categorical perception of phonological features, may explain why they are nonetheless able to acquire reading skills. Further studies aimed at disentangling the links between the different phonological prerequisites of reading should help clarify the significance of these results.

References

- Backman, J., Bruck, M., Hebert, M., & Seidenberg, M. S. (1984). Acquisition and use of spelling-sound correspondences in reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38(1), 114-133.
- Baddeley, A.D. (1986). Working memory. Oxford: Clarendon Press.
- Baddeley, A.D, & Wilson, B.A. (1993). A case of word deafness with preserved span: implications for the structure and function of short-term memory. *Cortex*, 29, 741-748
- Bergeson, T.R. Pisoni D.B. & Davis, R.A. (2003). A longitudinal study of audiovisual speech perception by children with hearing loss who have cochlear implants. *Volta Review*, 103, 347-370.
- Bergeson, T.R. Pisoni D.B. & Davis, R.A. (2005). Development of Audiovisual Comprehension Skills in Prelingually Deaf Children With Cochlear Implants. *Ear and Hearing*, 26,149-164.
- 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, 137-155.
- Bosman, A.M., de Groot, A.M. (1996). Phonologic mediation is fundamental to reading: evidence from beginning readers. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 49, 715-744.
- Bouton, S., Colé, P., Bertoncini J., & Serniclaes, S. Categorical perception of speech sounds in French-speaking children with cochlear implant, *submitted*.
- Bradley, L., & Bryant, P. E., (1983). Categorising sounds and learning to read: a causal connection. *Nature*, 301, 419-21.
- Bryant, P.E., & Impey, L. (1986). The similarities between normal readers and developmental and acquired dyslexics. *Cognition*, 24, 121-137.
- Bryant, P. E., MacLean, M., Bradley, L. L., & Crossland. (1990). Rhyme and alliteration, phoneme detection, and learning to read. *Developmental Psychology*, 26, 429-438.
- Burkholder, R., & Pisoni, D. (2003). Speech timing and working memory in profoundly deaf children after cochlear implantation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 85, 63-88.
- Chin, S.B. (2003). Children's Consonant Inventories After Extended Cochlear Implant Use. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 46, 849-862.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204-256.
- Content, A., & Radeau, J. (1988). Données statistiques sur la structure orthographique du Français. *Cahier de Psychologie Cognitive*, 4, 399-404.
- Dillon, C.M., Burkholder, R.A., Cleary, M., & Pisoni, D.B. (2004). Nonword Repetition by Children With Cochlear Implants: Accuracy Ratings From Normal-Hearing Listeners. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 47, 1003-1016.
- Doctor, E.A., & Coltheart, M. (1980). Children's use of phonological encoding when reading for meaning. *Memory & Cognition*, 8, 195-209.
- Dunn, L.M., Theriault-Whalen, C.M. & Dunn, L.M. (1993). *Echelle de vocabulaire en images peabody*. Adaptation française du Peabody Picture Vocabulary test-revised. Manuel pour les formes A et B, Toronto, Psycan, 147 p.
- Dunn, L. M., & Dunn, L. M. (1997). *Peabody Picture Vocabulary Test*, Third Edition. Circle Pines, MN: American Guidance Service.

- Fagan, M.K., Pisoni, D.B., Horn, D.L., & Dillon, C.M. (2007). Neuropsychological Correlates of Vocabulary, Reading, and Working Memory in Deaf Children With Cochlear Implants. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 12, 461-471
- Fluss, J., Ziegler, J.C., Warszawski, J., Ducot, B., Richard, G. & Billard, C. (2009). Poor reading in French elementary school: the interplay of cognitive, behavioral, and socioeconomic factors. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*. 30, 206-216.
- Frauenfelder, U.H., Segui J., & Dijkstra, T. (1990). Lexical Effects in Phonemic Processing: Facilitatory or Inhibitory?. *Journal of Experimental Psychology*, 16(1), 77-91.
- Frost, R., Katz, L., & Bentin, S. (1987). Strategies for visual word recognition and orthographical depth: a multilingual comparison. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, 13(1), 104-115.
- Frost, J., Madsbjerg, S., Niedersoe, J., Olofsson, A., & Sorensen, P.M., (2005). Semantic and phonological skills in predicting reading development: from 3-16 years of age. *Dyslexia*, 11, 72-92.
- Geers, A. (2003). Predictors of reading skill development in children with early cochlear implantation. *Ear and Hearing*, 24, 59S-68S.
- Geers, A., Brenner C., & Davidson, L. (2003). Factors associated with development of speech perception skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing*, 24 (1S), 24s-35S.
- Hayes, H., Geers, A.E., Treiman, R., & Moog, J.S. (2009). Receptive Vocabulary Development in Deaf Children with Cochlear Implants: Achievement in an Intensive Auditory-Oral Educational Setting. *Ear and Hearing*, 30, 128-135.
- Hulme, C. Goetz, K., Gooch, D., Adams, J., & Snowling, M.J. (2007). Paired-associate learning, phoneme awareness, and learning to read. *Journal of Experimental Child Psychology*, 96, 150-166.
- Hulme, C., Hatcher, P.J., Nation, K., Brown, A., Adams J., & Stuart, G. (2002). Phoneme awareness is a better predictor of early reading skill than onset-rime awareness. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 2-28.
- James, D., Rajput, K., Brinton, J., & Goswami, U. (2008). Phonological awareness, vocabulary, and word reading in children who use cochlear implants: does age of implantation explain individual variability in performance outcomes and growth? *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 13, 117-137.
- Johnston, R.S., Thompson, G.B., Fletcher-Flinn, C.M., & Holligan, C. (1995). The functions of phonology in the acquisition of reading: lexical and sentence processing. *Memory & Cognition*, 23, 749-766.
- Lachs, L., Pisoni, D.B., & Kirk, K.I. (2001). Use of audiovisual information in speech perception by prelingually deaf children with cochlear implants: a first report. *Ear & Hearing*, 22, 236-251.
- Lecocq, P., (1991). *Apprentissage de la lecture et dyslexie*. Bruxelles: Mardaga.
- Lefavrais, P. (1967). *Test de l'Alouette: Manuel* [Alouette: A standardized reading test]. Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L. & Colé, P. (2004). MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 36(1), 156-166.
- Leybaert, J., Colin, C. (2007). Le rôle des informations visuelles dans le développement du langage de l'enfant sourd muni d'un implant cochléaire. *Enfance*, 59, 245-253.
- Leybaert, J., & Content, A. (1995). Reading and spelling acquisition in two different teaching methods: A test of the independent hypothesis, *Reading and Writing*, 7, 65-88.

Lundberg, I., Olofson A., & Wall, S. (1980). Reading and spelling skills in the first school years predicted from phonemic awareness skills in kindergarten. *Scandinavian Journal of Psychology*, 21, 159-173.

Mann V.A., & Liberman, I.Y. (1984). Phonological Awareness and Verbal Short-Term Memory. *Journal of Learning disabilities*. 10, 592-599

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(1), 112-133.

Medina, V., & Serniclaes, W. (2009). Consecuencias de la categorización fonológica sobre la lectura silenciosa de niños sordos con implante coclear. *Revista de Logopedia, Foniatria y Audiología*, 29, 186-194.

Muter, V., Hulme, C., Snowling, M.J., & Taylor, S. (1998). Segmentation, not rhyming, predicts early progress in learning to read. *Journal of Experimental Child Psychology*, 71, 3-27.

Osberger, M.J., Miyamoto, R.T., Zimmerman-Phillips, S., Kemink, J., Stroer, B., Firszt, B., & Novak, M. (1991). Independent evaluation of the speech perception abilities of children with the Nucleus 22-channel cochlear implant system. *Ear and Hearing*, 12, 665-805.

Pisoni, D.B. (2000). Cognitive factors and cochlear implants: Some thoughts on perception, learning, and memory in speech perception. *Ear & Hearing*, 21, 70-78.

Pisoni, D.B. (2005). Speech perception in deaf children with cochlear implants. In Pisoni, D.B. & Remez, R. (Eds.), *Handbook of Speech Perception*. (pp. 494-523). Blackwell Publishers.

Raven, J. C. (1947). *Coloured Progressive Matrices*. London: Lewis.

Ruben, R. (2000). Redefining the survival of the fittest: communication disorders in the 21st century. *Laryngoscope*, 110, 241-245.

Samuel, A.G. (1996). Does Lexical Information Influence the Perceptual Restoration of Phonemes?, *Journal of Experimental Psychology*, 125(1), 28-51.

Savage, R., & Carless, S. (2005). Phoneme manipulation not onset-rime manipulation ability is a unique predictor of early reading. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 46, 1297-1308.

Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mouty, P., Carré, R., Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 336-361.

Seymour, P. H., Aro, M., & Erskine, J. M. (2003). Foundation literacy acquisition in European orthographies. *British Journal of Psychology*, 94(2), 143-174.

Share, D. L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: a direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72, 95-129.

Snowling, M.J. (2001). From language to reading and dyslexia. *Dyslexia*, 7(1), 37-46.

Spencer, P.E. (2004). Individual Differences in Language Performance after Cochlear Implantation at One to Three Years of Age: Child, Family, and Linguistic Factors. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 9, 395-412.

Spencer, L., & Tomblin, B. (2009). Evaluating Phonological Processing Skills in Children With Prelingual Deafness Who Use Cochlear Implants. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14, 1-21.

Sprenger-Charolles, L., & Casalis, S. (1995). Reading and spelling acquisition in French first graders: Longitudinal evidence. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 7, 1-25.

Sprenger-Charolles, L., & Bonnet, P. (1996). New doubts on the importance of the logographic stage: A longitudinal study of French children. *Cahiers de psychologie cognitive*, 15(2), 173-208.

Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., & Bonnet, P. (1998). Reading and Spelling Acquisition in French: The Role of Phonological Mediation and Orthographic Factors. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68(2), 134-165.

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(2), 87-104.

Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., Béchenec, D., & Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: A four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84(3), 194-217.

Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchenec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). Lecture et compétences reliées: Données normatives pour la fin de la 1ère, 2nde, 3ème et 4ème année du primaire issues d'une nouvelle batterie de tests, EVALEC. *European Review of Applied Psychology/Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 55(3), 157-186.

Sprenger-Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2006). *Reading Acquisition and Developmental Dyslexia*. Psychology Press. Hove and New York.

Stanovich, K.E., Cunningham, A.E., & Cramer, B.B. (1984). Assessing phonological awareness in kindergarten children: Issues of task comparability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38, 175-190.

Stanovich, K.E. (1986). Matthew effects in reading: Some consequences of individual differences in the acquisition of literacy. *Reading Research Quarterly*, 21, 360-407.

Tyler, R.S., Fryauf-Bertschy, H., Kelsay, D., Gantz, B.J., Woodworth, G.R., & Parkinson, A. (1997). Speech perception by prelingually deaf children using cochlear implants. *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 17, 180-187.

Tye-Murray, N., Spencer, L., and Gilbert Bedia, E. (1995). Relationships between speech production and speech perception skills in young cochlear implant users. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98, 2454-2460.

Unthank, D., Rajput, K., Goswami, U. (2001). The effect of age of fitting with a cochlear implant on phonological awareness of young deaf children. Interim results from a longitudinal study. *Eighth Symposium on Cochlear Implants in Children*, Los Angeles.

Vermeulen, A.M., Van Bon, W., Schreuder, R., Knoors, H., & Snik, A. (2007). Reading Comprehension of Deaf Children With Cochlear Implants. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 12, 283-302.

Waters, G. S., Seidenberg, M. S., & Bruck, M. (1984). Children's and adults' use of spelling-sound information in three reading tasks. *Memory and Cognition*, 12(3), 293-305.

Wechsler, D. (2005). *Wechsler Intelligence Scale for Children – Fourth Edition*. ECPA.

Wimmer, H. (1993). Characteristics of developmental dyslexia in a regular writing system. *Applied Psycholinguistics*, 14, 1-33.

Wimmer, H. (1996). The early manifestation of developmental dyslexia: Evidence from German children. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 8, 171-188.

Wimmer, H. & Hummer, P. (1990). How German speaking first graders read and spell: Doubts on the importance of the logographic stage. *Applied Psycholinguistics*, 11, 349-368.

Ziegler, J.C., Perry, C., Jacobs, A.M., & Braun, M. (2001). Identical words are read differently in different languages. *Psychological Science*, 12(5), 379-384.

Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, 131(1), 3-29.

Ziegler, J.C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Fásca, L., Saine, N., Lyytinen, H., Vaessen, A., & Blomert, L. (2010). Orthographic depth and its impact on universal predictors of reading: a cross-language investigation. *Psychological science*, 21(4), 551-559.

Sublexical and lexical processing in reading: data from French-children using cochlear implant¹

Sophie Bouton¹, Willy Serniclaes², and Pascale Colé¹

¹ Université de Provence, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille

² CNRS & Université Paris-Descartes, Laboratoire Psychologie de la Perception, Paris

Résumé

Le but de cette étude est de mieux comprendre l'acquisition de la lecture chez les enfants munis d'un implant cochléaire. Les compétences en lecture de 25 enfants implantés ont été comparées à celles de deux groupes contrôles normo-entendants. Un groupe est apparié sur le niveau de lecture, et un groupe est apparié sur l'âge chronologique. Dans une première expérience, les enfants lisent à haute voix des pseudo-mots (exemples : énoûre) et des mots irréguliers (exemple : album) afin de mettre en évidence l'effet de lexicalité qui évalue le recours à la procédure sous-lexicale pour lire les pseudo-mots et à la procédure lexicale pour lire les mots irréguliers. Dans une seconde expérience, les enfants effectuent une tâche de décision lexicale dans laquelle l'effet de pseudo-homophonie est mesuré afin de déterminer si les informations phonologiques sont activées automatiquement pendant la lecture silencieuse. Les résultats montrent que les enfants implantés obtiennent de plus faibles scores de précision en lecture que les deux groupes contrôles, alors qu'ils obtiennent un effet de lexicalité (mesuré sur les scores de précision et de rapidité) similaire aux enfants contrôles de même âge chronologique. L'expérience 2 a mis en évidence un effet de pseudo-homophonie plus fort pour les deux groupes contrôles que pour les enfants implantés pour les scores de précision seulement. Cet ensemble de résultats suggère que les procédures de lecture utilisées par les enfants implantés pour reconnaître les mots écrits sont similaires à celles des enfants normo-entendants mais qu'ils présentent une moins grande précision de reconnaissance des mots écrits. Cette difficulté pourrait s'expliquer par le fait que les enfants implantés activent les représentations phonologiques des mots écrits de façon moins automatique. La relation entre la perception de la parole et l'acquisition de la lecture chez les enfants implantés est discutée.

Mots clés : implant cochléaire, développement de la lecture, procédures de lecture, effet de pseudo-homophonie.

¹ Paper in preparation for submission

Abstract

The aim of the study was to better understand reading acquisition in children using cochlear implant (CI). Reading skills of 25 French-speaking CI children were compared to two normal hearing (NH) control groups, one matched for reading level (NH-RL) and one matched for chronological age (NH-CA). In a first experiment, children read pseudowords (example: énoûre) and irregular words (example: album) in order to highlight lexicality effect which assesses the use of the sublexical procedure to read pseudowords and the lexical procedure to read irregular words. In a second experiment, children performed a lexical-decision task where pseudohomophone effect was assessed in order to determine whether phonological representations are automatically activated in silent reading. Results showed that whereas CI children obtained lower accuracy scores for both pseudowords and irregular words reading than both NH groups, they obtained a similar lexicality effect as the NH-CA group both in accuracy and latency. Experiment 2 evidenced a greater pseudohomophone effect for both NH groups than CI children in accuracy scores only. Overall, these results suggest that CI children use both sublexical and lexical procedures but that they activate less automatically phonological representations when reading. The relationship between speech perception and reading acquisition was discussed.

Keywords: cochlear implant, reading development, reading procedures, pseudohomophone effect, phonology

INTRODUCTION

When normal-hearing (NH) children learn to read, they have already mastered oral language. Research on reading acquisition in NH children has emphasized the importance of the quality of phonemic representations in the success of this acquisition (in dyslexic: Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, & Sprenger-Charolles, 2008; in normal-readers: Bradley & Bryant, 1983; Burnham, 2003; Hoonhorst, Medina, Colin, Markessis, Radeau, Deltenre, & Serniclaes, in revision; Lundberg, Olofson & Wall, 1980). Bouton, Colé, Bertoncini and Serniclaes (submitted) showed that speech perception in deaf children using cochlear implant (CI) is characterized by a normal acquisition of categorical perception. Categorical perception is considered as a crucial speech perception mechanism as it refers to the ability to perceive phoneme belonging to different phonemic category and do not perceive variants of the same phonemic category. It is assessed by the interdependency between discrimination and identification abilities, since the discrimination scores was predicted by the identification scores. Nevertheless, they also showed that CI children present a severe impairment of categorical precision as assessed by the precision in phoneme discrimination and identification. Fundamental processes involved in categorizing phonemes are thus as similar as those used by NH children but CI children present difficulties to discriminate and identify accurately phonemes.

In reading acquisition, phonemic representations are required in phonological processing which refers to a set of processes that involve the phonological structure of words. As such, it refers both to the efficiency of the sublexical procedure, used to convert graphemes into phonemes in order to identify what is read. Phonological processing also contributes to the development of reading-related skills such as phonemic awareness, which requires manipulating the phonemic units of spoken words, or phonological short-term memory, which is needed to retain the assembled phonological code derived from the use of

grapheme-phoneme correspondences when decoding newly encountered words and pseudowords. Phonemic awareness is crucial for reading acquisition because it is required to grasp the principle of the alphabet, which must be understood before grapheme-phoneme correspondences can be used to decode words (i.e., accessing the phonological representation of what is being decoded). In addition, the sublexical reading procedure is seen as the bootstrapping mechanism upon which the lexical (or orthographic) procedure can develop (Share, 1995, 1999; Sprenger-Charolles, Siegel, Béchennec, & Serniclaes, 2003; Sprenger-Charolles, Siegel, & Bonnet, 1998b).

According to this growing amount of evidence that phonological representations play a crucial role on the acquisition of normal reading, speech perception impairments in CI children may have an impact on the quality of reading procedures they can develop. The present study was aimed at assessing the reading skills of French CI children through two experiments. A first experiment was conducted in order to determine if lexical and sublexical reading procedures of CI children develop normally or are impaired by comparison to those of NH children matched for reading level (NH-RL) and chronological age (NH-CA). A second experiment was designed to determine whether CI children automatically activated phonological representation during silent reading.

Experiment 1. The use of sublexical and lexical reading procedures in children using cochlear implant

Development of reading skills in normal hearing children

Most studies on reading acquisition refer to the dual-route model (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001, and see Perry, Ziegler and Zorzi, 2010 for recent development), which holds that written words can be read either by a lexical or a sublexical procedure. The lexical procedure gives direct access to orthographic word form from the

subject's internal lexicon. Reliance on the sublexical procedure in alphabetic scripts consists of translating sublexical written units (graphemes) into sublexical units of the spoken language (phonemes), which are then assembled into words. As already mentioned, the sublexical reading procedure is seen as the bootstrapping mechanism upon which the lexical procedure can develop (Share, 1995, 1999). Lexical and sublexical procedures are assumed to be used in parallel to process printed material, with processing tradeoffs that depend on the overall level of word identification attained (e.g. for English-speaking children: Backman, Bruck, Hebert, & Seidenberg, 1984; Waters, Seidenberg, & Bruck, 1984; for French-speaking children: Sprenger-Charolles et al., 2003; Sprenger-Charolles et al., 1998b). Within the dual-route model, the efficiency of the sublexical procedure is usually assessed through performance on the task of reading aloud pseudowords. The efficiency of the lexical procedure is usually assessed using performance on the task of reading aloud irregular words. More, the lexicality effect, defining that regular or irregular words were read more accurately and faster than pseudowords, is taken as an indicator of the subjects' reliance on the lexical procedure in reading when reading words and on the sublexical procedure when reading pseudowords.

Considering that NH children begin to learn to read in being competent oral language users, it has been showed that NH children's phonological skills determine how successful they will be in using phonological representation to read new words (Bradley & Bryant, 1983; Bryant, MacLean, Bradley, & Crossland, 1990; Lundberg et al., 1980; Mann & Liberman, 1984). CI children begin to learn to read with poorer phonemic representations (Bouton et al., submitted; Medina and Serniclaes, 2009; Tye-Murray, Spencer and Gilbert-Bedia, 1995). Our aim is thus to explore in more details possible differences in the use of sublexical and lexical procedures. We close to do this in comparing the ability to read pseudowords and irregular words, and the lexicality effect in CI and NH groups.

To determine whether or not reading skills have developed differently in CI children –i.e. whether there is a deviant developmental trajectory rather than a developmental lag– their reading performance must be compared to that of NH children matched for reading level and for chronological age. The categorization of impairments as either deficits or delays was described by Bryant and Impey (1986) for dyslexic reading skills. They suggested that in order to establish the presence of processing impairments, it is essential to establish a comparison of the dyslexic performance to that of both normal reader groups. When dyslexic readers perform less well than their reading level controls, the skill being assessed is considered deficient and is assumed to be causally related to reading impairment. In contrast, when dyslexic readers perform similarly to reading level controls, the assessed skill is considered to be developmentally delayed and the observed impairment of that skill is regarded as a consequence of the reading disability. Both deficiency and developmental delay indicate impaired processing, and the distinction simply characterizes the extent to which each of these impairments is involved in dyslexics’ reading ability. Because our aim is to highlight the presence of processing impairments in CI children, separating deficiency from developmental delay is highly relevant.

Reading skills in children using cochlear implant

To our knowledge, there are only a few studies assessing the efficiency of the sublexical and lexical procedures in CI children. Whatever tasks used, studies indicated that CI children use sublexical procedure with the same accuracy as NH children. Geers (2003) observed that CI children fitted in mean at 5;6 years of age and tested ranging from 8 to 9;11 years old obtained an average mid-to-high 2nd-grade reading level on the Word Attack task. Findings showed that 10 (5.5%) CI children were non-readers (below first grade), 54 (30%) attained a first grade reading level, 63 (35%) the second grade, 25 (14%) the third grade, and 29 (16%) the fourth grade or higher. Since most of the CI children had just completed the

first, second or third grade, Geers (2003) concluded that scores on the Word Attack task respected actual grade placement. Vermeulen, Van Bon, Schreuder, Knoors, & Snik (2007) evidenced same results with a lexical decision task, observing that CI children fitted at an average age of 6 years and tested at the age of 13 had scores within norms established by NH children matched for grade level. With the Word Attack test, Spencer and Tomblin (2009) observed that CI children obtained similar scores as NH children matched for reading comprehension level, but lower than those of NH children matched for chronological age. It could be therefore accepted that level of CI children in using sublexical procedure respects the level of instruction received or the reading level. Moreover, Fagan, Pisoni, Horn, & Dillon (2007) observed that most CI children (fitted at an average age of 2.5 years and tested at 9.1 years of age) obtained scores, on the lexical decision task, within the normal range for NH children matched for chronological age.

Other studies have indicated that CI children use the lexical procedure with the same accuracy as NH children. Using the PIAT, where CI children had to read simple words, Geers (2003) observed that CI children performed as well as NH children matched for grade level. Vermeulen et al. (2007) completed these results with a lexical decision task where CI children read very frequent words. They observed that all CI children had scores within norms established with NH children matched for grade level. As for sublexical procedure, Fagan et al. (2007) showed that CI children obtained the same scores on PIAT task as NH children matched for chronological age. Thus, the phonological processing skills of CI children seem to be sufficient to allow them to acquire orthographic knowledge and to develop the lexical procedure in order to read words.

The existing literature suggests that CI children use the lexical and sublexical procedures with the same accuracy as NH children matched for grade level or chronological age. Nevertheless, these studies were carried out using different control groups (comparisons

with either grade level or chronological age controls) that cannot give a clear image of the developmental trajectory of CI children's reading skills. As mentioned above, comparison with both reading level and chronological age controls is essential to show deficit or delayed performance. Moreover, the studies cited above used only accuracy scores to assess the efficiency of the sublexical and lexical procedures. It has recently been suggested that it would be more relevant (particularly with transparent orthographies) to take into account both accuracy and processing time due to speed-accuracy tradeoffs. Processing time offers a fine-grained measure of the reading skills (see for example Sprenger-Charolles et al., 2003; Sprenger-Charolles, Colé, Béchenec, & Kipffer-Piquard, 2005).

The present study

In summary, previous studies provide some evidence that child CI users are able to develop and use sublexical and lexical procedures. However, there are no clear indications about the accuracy and the rapidity in using these reading procedures. In the current experiment, we therefore set out to investigate the abilities of CI children to use sublexical and lexical procedures in comparison to both NH groups matched for reading level and chronological age. Our main research questions were whether difficulties in speech perception could nevertheless allow to CI children developing reading procedures similarly to those of NH children. The comparison with NH children matched for reading level and with NH children matched for chronological age allowed determining whether difficulties observed in CI children correspond to a deficit or a delay in the development of reading skills. The aim of the first experiment is therefore to obtain a comprehensive picture of the ability to use sublexical and lexical reading procedures. More precisely, we assessed the effect of lexicality on the reading of pseudowords and irregular words, which are respectively indicators of the use of sublexical and lexical procedures.

In normal hearing children, reading success depends on the successful activation and the use of phonemic representations in different kind of phonological processing used to read. We hypothesized that speech information provided by cochlear implant device is likely to be not sufficient.

METHOD

Participants

Twenty-five children with cochlear implant (11 boys and 14 girls) were recruited from 15 French institutes of the deaf located in different regions of France. All the children were congenitally deaf, had used a cochlear implant device for at least 5 years, and had been fitted with an implant before the age of 3;6 years. The implant was either the Clarion (Advanced Bionics), the Nucleus 24 device (Cochlear Corporation) or the Digisonic (Neurelec). Children recruited ranged from 7;11 to 11;6 years, and from grades 2 to 4. Age at implantation ranged in age from 1;10 to 3;6 years. Only one child had deaf parents. Table 1 describes the characteristics of the CI participants. Before implantation, all children used conventional hearing aids. Before and after implantation, 9 out of 25 children used cued speech (early and intensive practice), and 11 children out of the remaining children used only spoken language, i.e. they solely used speech and audition to communicate. Five children used spoken language and cued speech from grade 1. In this study, 19 out of 25 children were enrolled in mainstream classes with hearing children. Six children were in a spoken language classroom in a deaf school (special education with spoken language instruction).

Chronological age (years; months)	Age at implantation (years; months)	Length of cochlear implant use (years; months)	Types of device	Communication modes	Education placements
Mean and standard deviation in parentheses					
9;1 (1;1)	2;7 (0;9)	6;6 (1;1)	16 Nucleus Freedom	9 early and intensive Cued Speech + oral	6 special education
			7 Nucleus Sprint	11 oral	
			1 Digisonic	5 late Cued Speech + oral	19 mainstream
			1 Clarion		

Table 1. Characteristics of children with cochlear implant

Each child with CI was matched with one NH child with the same reading level and with one NH child with the same chronological age to compare the performance of CI group to both groups. All the NH children met the following criteria: (a) they were native speakers of French, (b) they had no history of auditory, language and reading disorders, and (c) they presented a reading-score within the normal range. Reading scores were obtained from the Alouette test (Lefavrais, 1967), a standardized French reading test employed in the computerized battery of test (EVALEC, Sprenger-Charolles et al. 2005; BELEC, Mousty and Leybaert, 1999). This test requires subjects to read a meaningless text aloud, and each subject's performance is converted into a reading age. Finally, all families, both those of CI children and those of NH children, were informed about the goals of the study, and provided written consent before the participation of their child.

As indicated in Table 2, the chronological age of the CI group is the same as NH-CA group ($t < 1$) but is significantly higher than those of NH-RL group ($t(24) = 4.01$; $p < .001$). The reading score of the CI group is similar as NH-RL group ($t < 1$) but significantly lower than those of NH-CA group ($t(24) = 3.81$; $p < .001$). Additionally, the nonverbal reasoning scores of all groups, tested using the progressive matrices (PM47, Raven, 1947), were within the normal range. We observed that PM47 scores of CI children did not differ significantly to

those of NH-RL group ($t(24) = 1.24$; $p > .20$) whereas scores of CI children are significantly lower than those of NH-CA children ($t(24) = 2.82$; $p < .01$).

	Chronological Age		Reading Age		PM47		
	years;months	p	years;months	p	/36	percentiles	p
CI	9;1 (1;1)		7;6 (0;8)		28 (6)	25 ^e	
NH-RL	7;6 (0;6)	***	7;6 (0;9)	>.20	27 (4.5)	50 ^e	$p > .20$
NH-CA	9;1 (0;9)	>.20	9;1 (1)	***	34 (5)	75 ^e	**

Table 2: means and standard deviations (in parentheses) of cochlear implant (CI) and normal hearing (NH) participants' chronological age, listening age and non-verbal IQ level.

For the purpose of another study (Bouton et al., submitted), CI children of the present study were assessed on their categorical perception skills. Categorical precision and categorical perception account for the ability to perceive phonemes so categorical. We assessed "categorical perception", i.e. the relationship between discrimination and identification, and the level of "categorical precision," i.e. the accuracy in both feature identification and discrimination. Children realized a discrimination task which used a two-alternative forced choice procedure. The stimuli were presented by pairs (AX format) (example: mouche – bouche) and children had to indicate whether the stimuli within each pair were the same or different. Children also realized an identification task, one word was presented on each trial (example: “mouche” or “bouche”), and children had to indicate whether the picture presented on the computer screen was the same as or different from the spoken word. The scores of discrimination and identification of minimal pairs were measured in each listener which allow assessing all features defining consonants (e.g. place, voicing, manner, nasality) and vowels (e.g. frontness, nasality, aperture).

For both tasks, children heard words at a comfortable level (70-80dB) through headphone (Beyerdynamic DT290). Before the test session, we first ensured that CI children were able to hear the stimuli well, with a very frequent word repetition task. Stimuli were

presented at first at 70 dB and we increase intensity level of 5 dB until children repeat correctly at least 80% of the words presented. Children also can't use lip-reading information because items had been previously recorded. This precaution is important because lip-reading has been shown to have an effect on speech perception in both deaf children (O'Donoghue, Nikolopoulos & Archobold, 2000; Bergeson, Pisoni & Davis, 2003; Bergeson, Pisoni & Davis, 2005; Lachs, Pisoni & Kirk, 2001; Leybaert & Colin, 2007; Spencer & Tomblin, 2009; Tyler, Fryauf-Bertschy, Kelsay, Gantz, Woodworth & Parkinson, 1997) and normal-hearing children (McGurk & MacDonald, 1976).

Each child with CI was matched with one NH child with the same listening age (mean: 6;4 (SD: 1;2) for NH children and 6;6 (SD: 1;1) for CI children) to compare the performance of the two groups. Whereas the listening age of the CI group and NH controls did not differ significantly, the chronological age of CI group was significantly higher than that of the NH group (mean: 6;4 (SD: 1;2) for NH children and 9;1 (SD: 1;1) for CI children). As presented in Figure 1, results showed that for both the CI children and NH controls matched for listening age the observed discrimination scores were larger than those expected from identification. This means that categorical perception was not perfect for both groups. The magnitude of the difference between the two tasks did not depend on the group, which means that CI children and NH children matched for listening age showed equivalent categorical perception skills. However, both the identification and discrimination scores were lower for CI children than for NH children, indicating a lower level of categorical precision. Thus, reading skills are tested in CI children who present lower categorical precision than NH children matched for listening age but fairly similar categorical perception as NH controls. The difference in precision for phoneme perception could influence reading abilities.

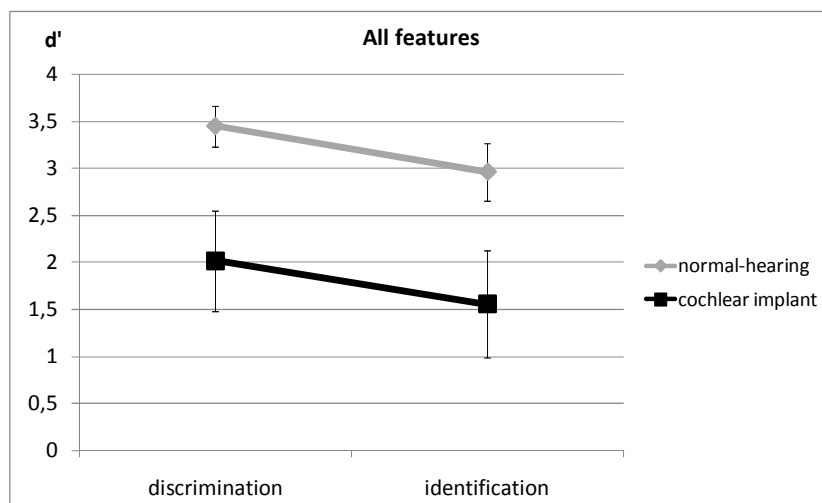


Figure 1. Discrimination and identification scores for cochlear implant and normal-hearing children.

Reading aloud task

This task evidenced possible differences between groups in the use of sublexical and lexical procedures. Because, in the studies reported in the introduction only percent correct responses were used, leading to potential ceiling effect, we measured both accuracy and processing time, which allows us take into account speed-accuracy tradeoffs, and exploits the fact that processing time offers a fine-grained measure of performance (see for example Sprenger-Charolles et al., 2003).

In order to assess reading procedure acquisition, we used pseudowords, assumed to be the best “signature” of the sublexical procedure in grades 1 to 4, and we used irregular words as the best indicator of the use of the lexical procedure in grades 1 to 5. Both lists were composed of 30 irregular words (example: *orchestre, pied*) and 30 pseudowords (example: *supon, pitode*). In each list, the items are matched for length (number of letters, phonemes and syllables) as well as for orthographic frequency (frequency of bigrams, Content and Radeau, 1988). Their mean length was 5.7 letters (SD: 1.7), 4.1 phonemes (SD: 1.6), 1.6 syllables (SD: 0.6) for irregular words and 5.6 letters (SD: 1.6), 4.4 phonemes (SD: 1.8), 1.7 syllables (SD: 0.5) for pseudowords (for all $t < 1$). Their mean orthographic frequency was 36 (SD: 11.6) and 37 (SD: 13.3) respectively for irregular words and pseudowords ($t < 1$). In order to

collect the latency time, the items in each list were also matched for their initial grapheme/phoneme.

Response latency and accuracy were recorded. A sound card was used to record the children's vocal responses in individual files. The software calculated latency from the onset of the stimulus on the screen until the detection of the onset of the response in the speech signal. The software allowed for manual readjustment if necessary and the elimination of latencies on incorrect responses. This enabled the experimenter to ensure that no latencies were invalid and to calculate the percentage of errors. Correct responses are coded by 10 listeners. These judges who have no daily contact with CI children had to decide whether productions of children are correct or not. They listened to the production and wrote on a table the phonetic responses of children without have previously seen the word expected. Finally, the experimenter compared words expected and words wrote by judges in order to obtain the percentage of correct responses of each child.

Procedure. The children were instructed to read aloud the item displayed in the center of the screen as accurately and as quickly as possible. Practice items were used to familiarise children with the material and to make sure that the child understood the instructions. No feed-back was given. The procedure on each trial was as follows. A fixation cross remained in the center of the screen for 500 ms and was immediately followed by the test item in lower case. The item remained on the screen until the subject had finished reading aloud, at which point the experimenter triggered the presentation of the next item. The order in which both lists were administered was random across children and all the items were presented only one time in a random order.

CI and NH children were tested individually in a quiet room (at home and at school, respectively). They received all tasks (Alouette test, PM47, reading aloud task) during one session which lasted around 20 minutes. For all groups, children realized in a first time

Alouette test and PM47 and in a second time, reading aloud task. Both lists of reading aloud task were presented in a random order. Presentation was controlled by E-prime 2.0, running on a Dell PC.

RESULTS

The percentage of correct responses and latency times were entered in two repeated-measures analyses of variance (ANOVA) performing using both participants (F1) and items (F2). The design of both F1 ANOVAs run on the irregular words and pseudowords reading scores comprised Lexicality (irregular vs. pseudowords) as within-subject factor and Group (cochlear implant group vs. normal hearing group matched for reading level vs. normal hearing group matched for chronological age) as a between-subject factor. The design of both F2 ANOVAs comprised as random variables Lexicality as a between-subject factor and Group as a within-subject factor. Differences in precision and rapidity of reading between groups were tested with the Group effect and with planned contrasts to compare groups with each other. Lexicality effect allows assessing the procedure used to read pseudowords and irregular words. Differences in Lexicality effect between groups were tested with the Lexicality x Group interaction and with planned contrasts for each group.

Response Accuracy

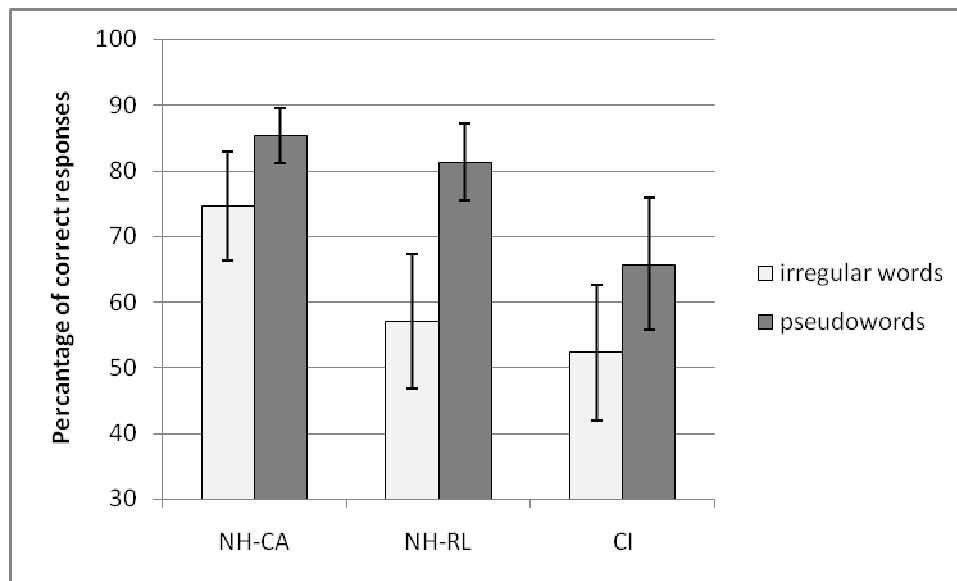


Figure 2. Percentage of correct responses on naming task for irregular words and pseudowords reading for normal hearing children matched for chronological age (NH-CA), normal hearing children matched for reading level (NH-RL) and children using cochlear implant (CI)

Figure 2 presents the mean of reading scores of irregular words and pseudowords (expressed in percentage of correct responses) for each group. Among the main effects, significant effect was found for Group ($F(2,72) = 12.1, p < .001$; $F(2,140) = 91.2, p < .001$). The group effect was due to greater reading scores of irregular words and pseudowords for CA-NH children compared to RL-NH children and CI children ($t(72) = 3.43, p < .01$; $t(70) = 10.3, p < .001$; $t(72) = 5.83, p < .001$, $t(70) = 12.4, p < .001$, respectively) and also to greater scores for RL-NH children compared to CI children ($t(72) = 2.82, p < .01$; $t(70) = 6.55, p < .001$). Results also showed a significant effect for Lexicality ($F(2,72) = 84.6, p < .001$; $F(1,70) = 12.4, p < .001$), indicating that pseudowords were recognized with more accuracy than irregular words. The interaction Group x Lexicality was also significant ($F(4,72) = 5.63, p < .01$; $F(2,140) = 11.6, p < .001$). This interaction revealing that although each group present a lexicality effect ($t(72) = 4.40, p < .001$; $t(70) = 2.69, p < .01$, for CI children, $t(72) = 3.54, p < .001$; $t(70) = 2.42, p < .05$, for NH-CA children, $t(72) = 7.93, p < .001$, $t(70) = 4.78, p < .001$, for NH-RL children), but the difference between pseudowords and irregular

words was greater for RL-NH children than for CA-NH and CI children ($t(72) = 3.67, p < .01$; $t(70) = 6.41, p < .001$; $t(72) = 2.53, p < .05$; $t(70) = 2.97, p < .01$, respectively). The lexicality effect was similar for CA-NH and CI children ($t(72) < 1, t(70) < 1$). The difference between the mean correct responses for pseudowords minus irregular words for RL-NH, CA-NH and CI children were respectively of 24%, 11% and 13%.

Latency time

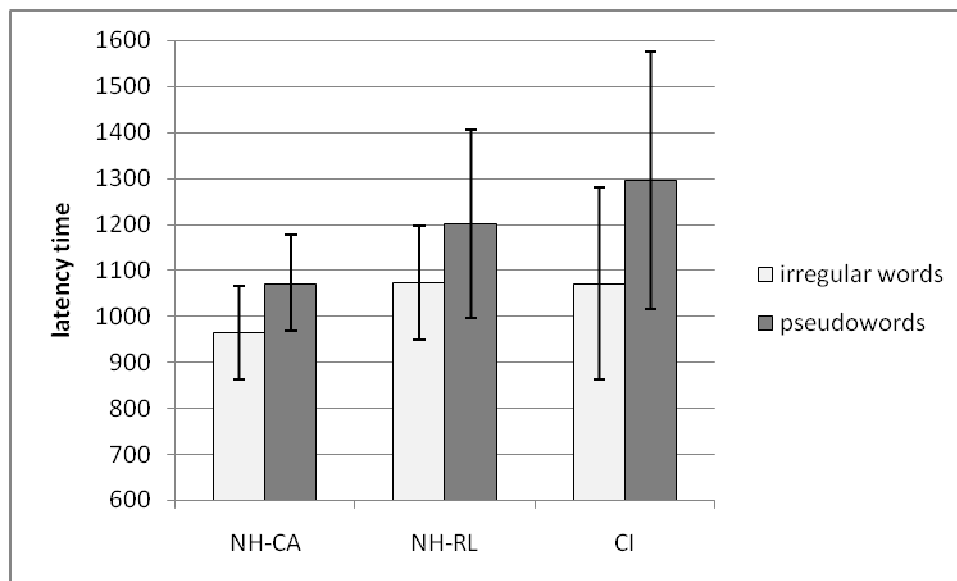


Figure 3. Latency times on naming task for irregular words and pseudowords reading for normal hearing children matched for chronological age (NH-CA), normal hearing children matched for reading level (NH-RL) and children using cochlear implant (CI)

Figure 3 presents the mean of reading latency time of irregular words and pseudowords (expressed in milliseconds) for each group. There was no significant effect for Group ($F(2,58) = 1.61, p > .20, F(2,72) = 2.22, p > .20$) but a significant effect was found for Lexicality ($F(1,58) = 13.3, p < .001; F(2,136) = 9.74, p < .01$). The lexicality effect was significant for each group and indicated that pseudowords were read more rapidly than irregular words ($t(58) = 2.98, p < .01; t(36) = 3.32, p < .05$, for CI children, $t(58) = 2.70, p < .05; t(36) = 3.16, p < .05$, for NH-CA children, $t(58) = 2.61, p < .05, t(36) = 3.23, p < .05$, for NH-RL children). The interaction Group x Lexicality was not significant ($F(1,58) < 1, F(2,136) < 1$).

DISCUSSION

The present study investigated the reading skills of French CI children and sought to compare their degree of development to that of NH control children matched for reading level and chronological age. The CI children of this experiment presented a deficit in speech perception (Bouton et al., submitted) when compared to normal hearing controls, which might affect their reading abilities, such as the use of sublexical and lexical reading procedures.

The results on the reading aloud task show that CI children read items (pseudowords and irregular words) with less accuracy than NH controls but with similar rapidity as NH controls. Lexicality effect was observed in both accuracy and latency time scores for the three groups of children. For the accuracy scores, the lexicality effect advantaged pseudowords since pseudowords were recognized more accurately than irregular words. For latency time scores, lexicality effect advantage irregular words since irregular words were recognized more rapidly than pseudowords. To summarize, like showed by Sprenger-Charolles et al. (2005), the lexicality effect was detrimental to irregular words for accuracy, but favored them for latency time. This may be interpreted as follows. Although, pseudowords can only be processed by the sublexical procedure and need to be decoded in a serial mode, this is would not be the case for irregular words. In French, these words are never totally irregular (example: automne) so that they can benefit from some direct parallel orthographic processing but also be partly read using the sublexical procedure. Because children could first use the sublexical in order to read French irregular words, this will lead to more errors than for pseudowords. Alternatively but not exclusively, whereas to read accurately pseudowords only entailed the knowledge and use of grapheme-phoneme correspondences, to read accurately irregular words implied that children had previously read and memorize these words. While pseudoword could be correctly read at the first glance, irregular words imply multiple previous reading. For latency time with correct responses, irregular words are read faster than

pseudowords because the use of sublexical procedure imply the graphemic decomposition of word while the use of lexical procedure entail only the match between orthographical representation and phonological representation. However, for accuracy scores the size of the lexicality effect depended on the group. The lexicality effect was similar for the NH-CA and CI children, and was smaller than the one of the NH-RL group. Thus, we found that whereas CI children recognized written items with less accuracy than NH children, they used same procedure as NH children. CI and NH children both relied on the lexical procedure to recognize irregular words and on sublexical procedure to decode pseudowords.

The efficiency of the sublexical procedure is linked to the ability to use the grapheme-phoneme correspondences, leading to the activation of some phonological representations of what is being read (for a review: Sprenger-Charolles, Colé & Serniclaes, 2006). CI children of this experiment showed some deficit in perceiving phonemes so that the results obtained with pseudo-words may be the consequence of phonological representations being less rapidly activated in CI children than in NH children. The purpose of the second experiment was to test this hypothesis.

Experiment 2. Automatic activation of phonological representations in reading development in children using cochlear implant

Introduction

As already explained in the section about the development of reading skills in normal hearing children, because reading success depends on the successful activation and use of phonemic representations involved in different kind of phonological processing used to read, speech information provided by cochlear implant device is likely to be not sufficient to acquire reading skills with same efficiency than NH children. Children who learn to read with lower quality of phonemic representations could develop reading procedures with less

accuracy and rapidity than NH children and might not activate phonological representations as automatically as NH children would do. The aim of this second study is thus to explore possible differences in the use of the sublexical procedure, and more precisely in the automatic activation of phonological representation when reading pseudowords between NH and CI children. We close to do this in comparing pseudohomophone effect in CI and NH groups.

The pseudohomophone effect

The pseudohomophone effect in the lexical-decision task is one indicator of the subject' use of the sublexical procedure since it supports the idea that phonological representation is automatically activated in visual word recognition (Ziegler, Van Orden, and Jacobs, 1997; Ziegler, Jacobs, and Klüppel, 2001). This effect shows that pseudowords that sound like real words, so-called pseudohomophones (example: brane, which is a pseudohomophone of brain) are harder to reject in a lexical-decision task than pseudowords matched spelling controls that do not sound like real words (example: brale). For example, participants typically take longer and make more errors when rejecting the pseudohomophone BRANE than rejecting the matched control BRALE. The standard explanation for the pseudohomophone effect in lexical decision task assumes that pseudohomophone (BRANE), by virtue of being phonologically identical to a real word (BRAIN), contacts a lexical entry in the phonological lexicon. This contact slows down pseudoword categorization in the lexical decision task because the phonological representation signals the presence of a real word, whereas the orthographic information signals the absence of a real word. Since we assume that resolving this conflict takes time, it follows that pseudohomophone give longer decision latencies than matched control pseudowords. More errors to reject pseudohomophone like BRANE compared to control pseudowords are also observed when the phonological form of

the corresponding word is activated. Pseudohomophone effects in lexical decision task have been obtained in NH children (in English: Booth, Perfetti, and MacWhinney, 1999; in German: Goswami, Ziegler, Dalton, and Schneider, 2001; in French: Sprenger-Charolles et al., 2003). This effect is interpreted as evidence of the automatic activation of phonological representations during reading.

To our knowledge, no study directly assesses the ability of CI children to automatically activate phonological representation in reading using the pseudohomophone effect. This was done in the present experiment. To investigate this question, we compared the performance of CI and NH children on a pseudohomophone lexical decision task. Because CI children obtained lower accuracy scores in pseudoword and irregular word reading task, CI children would also exhibit a lesser automatic activation of phonological representation than NH children when using the sublexical procedure. This hypothesis was tested by the assessment of pseudohomophone effect which was based on performance obtained on lexical decision.

METHOD

Participants

The participants were the same as in Experiment 1.

Lexical decision task

In this task, we manipulated type of misspelling in comparing pseudowords which were homophone of real words (pseudohomophone condition) versus control pseudowords which were not homophones of words (control condition). 40 French words issued of Manulex (Lété, Sprenger-Charolles, Colé, 2004) were chosen. Pseudowords were created from regular words selected because they had an orthographic pattern known by children since these words are spelled correctly at least 80% of the time by first graders (EOLE,

Echelle d'acquisition en orthographe lexicale, Pothier & Pothier, 2004). These regular words are also very frequent since these words occurred one and a half in every 100 words which corresponds to 85 standard frequency effect (MANULEX, Lété et al., 2004). From each of the 20 selected words a pseudohomophone and a control pseudoword were created. The pseudohomophones were constructed such that their pronunciation but not their spelling was identical to that of real words. Control pseudowords shared the orthographic and phonological rime of the same real word but they were not phonologically identical to real words. Pseudohomophones were created by changing one vowel or one consonant in the middle of the baseword (example: plage changed in plaje) and the same was applied to create control pseudowords (example: plage changed in plade). Others 20 words constituted fillers. Between conditions, the items are matched for length (number of letters, phonemes and syllables) as well as for orthographic frequency (frequency of bigrams, Content and Radeau, 1988). Their mean length was 5.2 letters (SD: 0.6), 4.1 phonemes (SD: 0.7), 1.8 syllables (SD: 0.5) for pseudohomophones and 4.9 letters (SD: 0.6), 4.0 phonemes (SD: 0.5), 1.5 syllables (SD: 0.6) for control pseudowords (for all $t < 1$). Their mean orthographic frequency was 39 (SD: 13.1) and 41 (SD: 14.2) respectively for pseudohomophones and control pseudowords ($t < 1$). In order to calculate the latency time, the items in each list were also matched for their initial grapheme/phoneme. Thus, pseudohomophones are only phonologically more similar to real words but orthographically as similar to real words as control pseudowords.

The order in which all items in the list were administered was random across children and all items were presented only one time in a random order.

Procedure. The children were instructed to decide as accurately and as quickly as possible whether the item was a word or not. Their task was to read silently the item displayed in the center of the screen of a computer as accurately and as quickly as possible and to press one of two differently coloured keys on the computer keyboard. Practice items were used to

familiarise children with the material and to make sure that the child understood the instructions. No feed-back was given. The procedure on each trial was as follows. A fixation cross remained in the center of the screen for 500 ms and was immediately followed by the test item in lower case. The item remained on the screen until the subject had pressed one of two keys, at which point the experimenter triggered the presentation of the next item. Response latency and accuracy were recorded. Latency was measured from the onset of the stimulus on the screen until the participant click on keyboard. Presentation was controlled by E-prime 2.0, running on a Dell PC.

RESULTS

The percentage of correct responses and latency times were entered in two repeated-measure analyses of variance (ANOVA) performed using both participants (F1) and items (F2). The design of both F1 ANOVAs run on the lexical decision scores on pseudohomophones and control pseudowords comprised Homophony (pseudohomophones vs. control pseudowords) as within-subject factor and Group (cochlear implant group vs. normal hearing group matched for reading level vs. normal hearing group matched for chronological age) as a between-subject factor. The design of both F2 ANOVAs was performed with Homophony as a between-subject factor and Group as a within-subject factor. Differences in precision and rapidity of lexical decision between groups were tested with the Group effect and planned contrasts allowed comparing groups with each other. Homophony effect allows assessing the difference in precision and rapidity of lexical decision between pseudohomophones and control pseudowords. Differences in homophony effect between groups were tested with the Homophony x Group interaction and with planned contrasts for each group.

Response Accuracy

Figure 4 presents the mean of pseudowords correctly rejected (expressed in percentage of correct responses) for each group. Among the main effects, a marginal effect in the subject analysis was found for Group ($F(2,72) = 2.81, p=.06$; $F(2,36) = 12.2, p<.001$). This group effect was due to greater lexical decision scores for CA-NH children compared to RL-NH children and CI children ($t(72) = 2.25, p<.05, t(18) = 4.84, p<.001$; $t(72) = 1.96, p=.05$; $t(18) = 3.44, p<.01$, respectively). RL-NH children and CI children obtained similar scores ($t(72)<1, t(18)<1$). Significant effect was found for Homophony ($F(1,72) = 112, p<.001$; $F(1,18) = 25.4, p<.001$), indicating that control pseudowords were rejected with more accuracy than pseudohomophones. The interaction Group x Homophony was also significant ($F(1,72) = 8.49, p<.001$; $F(2,36) = 12.3, p<.001$). Results showed that each group presents a homophony effect ($t(72) = 3.01, p<.01$; $t(18) = 2.36, p<.05$, for CI children; $t(72) = 6.66, p<.001$; $t(18) = 4.18, p<.001$, for NH-CA children; $t(72) = 8.62, p<.001$; $t(18) = 6.80, p<.001$, for NH-RL children). Group x Homophony interaction also indicated that the difference between pseudohomophones and control pseudowords was bigger for RL-NH and CA-NH children than for CI children ($t(72) = 5.35, p<.001$; $t(70) = 5.72, p<.001$; $t(1) = 2.62, p<.01$; $t(18) = 2.73, p<.01$, respectively). The homophony effect was similar for CA-NH and RL-NH children ($t(72) = 1.22, p>.20$; $t(18) = 1.71, p>.10$). The difference between the mean correct responses for pseudohomophones minus control pseudowords for RL-NH, CA-NH and CI, were respectively of -42%, -33% and -15%). Results also showed that this lower difference in CI children is due to a lower score in control pseudowords for CI children than for CA-NH children ($t(72) = 3.26 ; p<.001$; $t(18) = 4.33 ; p<.001$) whereas CI and CA-NH children obtained similar scores in pseudohomophone condition ($t(1)<1; t(2)<1$).

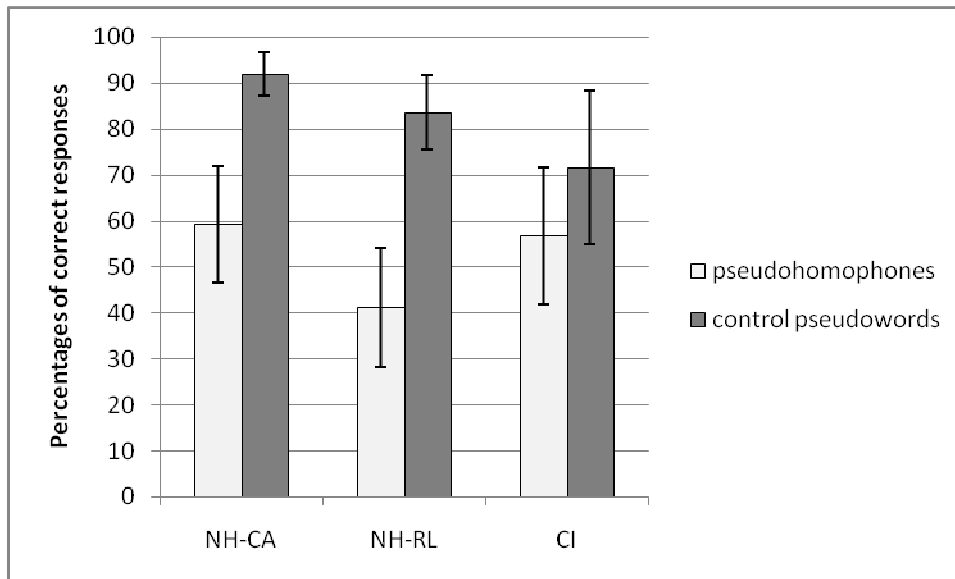


Figure 4. Percentage of correct responses on lexical decision task for pseudohomophones and control pseudowords for normal hearing children matched for chronological age (NH-CA), normal hearing children matched for reading level (NH-RL) and children using cochlear implant (CI)

Latency time

Figure 5 presents the mean of latency times of control pseudowords and pseudohomophones (expressed in milliseconds) for each group. Among the main effects, significant effect was found for Group ($F(2,72) = 3.88, p=.05$; $F(2,36) = 19.5, p<.001$). The Group effect indicates that CA-NH children realized lexical decision more rapidly than RL-NH and CI children ($t(72) = 2.25, p < .05$; $t(18) = 7.36, p <.001$, $t(72) = 2.64, p<.05$; $t(18) = 3.71, p<.01$, respectively) whereas latency time scores of RL-NH and CI are similar ($t(72) < 1$; $t(18) = 1.53, p>.10$). Significant effect was also found for Homophony ($F(1,72) = 16.3, p<.001$; $F(1,18) = 5.62, p<.05$), indicating that pseudohomophones were read more slowly than control pseudowords. The homophony effect was significant for each group indicating that all groups categorize control pseudowords more rapidly than pseudohomophones ($t(72) = 2.24, p<.05$; $t(18) = 2.07, p<.05$, for CI children; $t(72) = 2.21, p<.01$; $t(18) = 2.03, p<.05$, for NH-CA children; $t(72) = 3.59, p<.001$; $t(18) = 3.11, p<.01$,

for NH-RL children). The interaction Group x Homophony was not significant ($F(2,72) = 1,55, p > .20; F_2 < 1$).

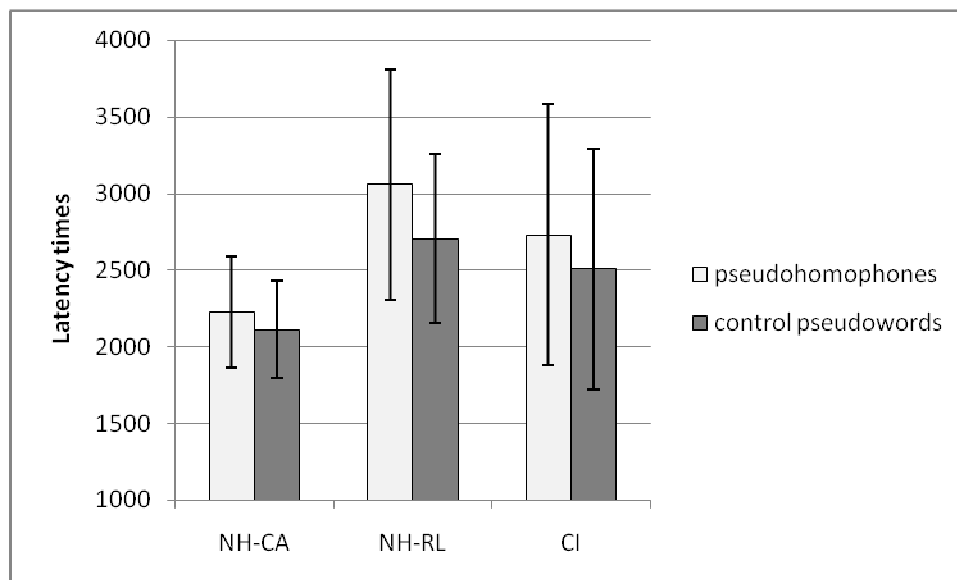


Figure 5. Latency times on lexical decision task for irregular words and pseudowords reading for normal hearing children matched for chronological age (NH-CA), normal hearing children matched for reading level (NH-RL) and children using cochlear implant (CI)

DISCUSSION

The present experiment investigated the use of sublexical reading procedure and more particularly the automaticity of phonological representation activation in sublexical procedure. The existence of a pseudohomophone effect in the lexical decision task is often used as a marker for the influence of phonological representations on reading. The present results showed a significant pseudohomophone disadvantage in lexical decision for the CI, RL-NH and CA-NH groups. Thus, all the groups were influenced by phonological information during silent reading. However, the analysis of accuracy scores also showed that the pseudohomophone effect was greater for both NH groups than for CI children. This could be due to orthographic knowledge lesser developed by CI children. However this critique does not apply to our study for several reasons. The first one is that words from which pseudohomophones were derived were very carefully selected as these words were correctly

spelled by 80% in first graders. Given that the mean reading level of CI children corresponds to second graders (range second and third graders), they could know the orthographic representation of words chosen. The second reason refers to the fact that CI children had similar accuracy scores to NH-CA controls (whose mean reading level corresponds to fourth graders) in the case of pseudohomophones. The less important pseudohomophone effect in CI children is in fact due to their performances with the control pseudowords (being lower than NH-CA controls) for which no phonological activation from lexical memory can be stated. This can be interpreted as the fact that the influence of orthographic information in performing the task is greater for CI children than for NH children and additionally argues for the fact that NH children employ more efficient phonological recoding processes for operating the grapheme-phoneme conversion than do CI children.

GENERAL DISCUSSION

The use of lexical and sublexical procedures in CI children

The results of the first experiment evidenced a lexicity effect for three groups on accuracy and rapidity, indicating that both CI and NH children used the sublexical procedure to read pseudowords whereas they used the lexical procedure to read irregular words. However, we found that CI children recognized irregular words and pseudowords with lesser accuracy than NH groups. This indicates some difficulties in the use of both the lexical and sublexical procedures by CI children: they make more errors in written item recognition than do NH children. This result differs from those reported in the literature. Studies with English-speaking children showed that CI children read words and pseudowords as accurately as NH children matched on grade level (Geers, 2003; Vermeulen et al., 2007). The success of CI children in using the lexical procedure to read regular words was also reported by Fagan et al. (2007), who showed that the majority of CI children obtained scores similar to those of NH

children with the same chronological age. One explanation of difference between our results and those of previous studies could be that we use independent judges to determine the quality of word produced. This procedure could be more severe with CI children's answers than one procedure where experimenter assessed the quality of responses. Another explanation of these different results could be that previous studies assessed the reading ability of CI children through z-score comparison while we realised ANOVA in this study. ANOVA being more severe than z-score analysis, it could explain the fact that previous findings showed similar reading performance between NH and CI children whereas our study showed accuracy deficit in reading by CI children.

Our set of results showed that in spite of abilities to use lexical and sublexical procedures to read respectively irregular words and pseudowords, CI children recognized written items (both pseudowords and irregular words) with less accuracy than NH groups. Reading procedures of the CI children are similar to those of the chronological age controls although these procedures are activated less efficiently by the CI children. These difficulties could be explained by lower abilities to activate phonological representations when using the sublexical procedure and as the consequence to access to orthographic representations during written word recognition with the lexical procedure. Indeed, the sublexical reading procedure being seen as the bootstrapping mechanism upon which the lexical (or orthographic) procedure can develop (Share, 1995, 1999; Sprenger-Charolles et al., 2003; Sprenger-Charolles et al., 1998), we observed that accuracy impairment on the use of sublexical procedure was also observed on the use of lexical procedure.

The use of phonological information in reading in CI children

We hypothesized that because of some deficits in speech perception of CI, phonological representations involved in the use of the sublexical procedure would be less

automatically activated than in NH children. Thus, the major purpose of the second experiment was to find new evidence for phonological activation in a silent reading task within a group of children using cochlear implant. Correct responses rates and latency time in a lexical decision task were analyzed for CI and NH children matched for reading level and chronological age. The results showed that pseudohomophones generate more errors than control pseudowords and in the three groups, and that pseudohomophones were rejected more slowly than control pseudowords. These results suggest that both NH and CI children can automatically activate phonological representations during silent-reading. However we also found that pseudohomophone effect was smaller in the CI group than in both NH control groups. This supports the hypothesis that NH children may have activated the phonological representations of pseudohomophones more rapidly and thus more automatically than CI children, generating a more important pseudohomophone effect. The access to phonological representations may have needed more attentional resources for CI children than for NH children. This result is congruent with those obtained in the first experiment: CI children were less accurate in using the sublexical procedure when reading pseudowords and they also were characterized by a deficit in speech perception. All these findings suggest that, although their phonemic representation activation may be less automatic, CI children can activate phonological representations while reading isolated pseudowords. The explanation could be that CI children develop phonological representations less accurately than NH children because of some speech perception deficit. Indeed, some studies indicated differences in phonemic perception and more particularly in categorical precision (Bouton et al., submitted; Medina and Serniclaes, 2009). CI children categorize phonemic features (place, nasality, manner and voicing for consonants and nasality, aperture and frontness for vowels) with less accuracy than NH children matched for listening age since they discriminated and identified minimal pairs varying on one feature with less accuracy than these NH children. This set of

results show that the absence of categorical perception difficulties allows CI children acquiring phonemic representations but that their phonemic representations are less accurately developed than those of NH children. This has repercussions in reading since CI children are able to automatically activate phonological representations when reading pseudoword but with more attentional resources than NH children. Moreover, CI children are also able to rely on sublexical and lexical procedures to read pseudoword and irregular word respectively, but they read with lower accuracy than NH children do. CI children can use the grapheme-phoneme sublexical procedure, but this procedure is less efficient in term of achieving accuracy in comparison to NH children. Thus, this research helps bring consistency results in speech perception and in reading acquisition in CI children.

To sum up, we have previously observed difficulties in the accuracy of phoneme perception. The fact that CI children present lower phonemic representations than NH children could imply that the access to phonological representations requires more attentional resources for CI children than for NH children. Thus, CI children present a lower automaticity in phonological representation activation in comparison to NH children. This difficulty could explain the lower accuracy of CI children to use sublexical and lexical procedures in reading than NH children. Clearly, we observe a possible relationship between oral language and written language abilities but this relationship was indirect. Thus further studies are needed to confirm a direct relationship between speech perception skills and reading skills in CI children. It should allow understanding better their ability to use similar processing as NH children but with lower accuracy.

References

- Backman, J., Bruck, M., Hebert, M., & Seidenberg, M.S. (1984). Acquisition and use of spelling sound correspondences in reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38, 114–133.
- Bergeson, T., Pisoni, D.B., & Davis, R.A.O. (2003). A longitudinal study of audiovisual speech perception by children with hearing loss who have cochlear implants. *Volta Review*, 103, 347-370.
- Bergeson, T.R., Pisoni, D.B., & Davis, R.A.O. (2005). Development of audiovisual comprehension skills in prelingually deaf children with cochlear implants. *Ear and Hearing*, 26(2), 149-164.
- 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., Perfetti, C., & MacWhinney, B. (1999). Quick, automatic, and general activation of orthographic and phonological representations in young readers. *Developmental Psychology*, 35(1), 3-19.
- Bouton, S., Colé, P., Bertoncini J., & Serniclaes, W. (submitted). Categorical perception of speech sounds in French-speaking children with cochlear implant. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*.
- Bradley, L., & Bryant, P.E. (1983). Categorizing sounds and learning to read—a causal connection. *Nature*, 301(3), 419-421.
- Bryant, P.E., & Impey, L. (1986). The similarities between normal readers and developmental and acquired dyslexics. *Cognition*, 24, 121-137.
- Bryant, P. E., MacLean, M., Bradley, L. L. et Crossland, J. (1990). Rhyme and alliteration, phoneme detection, and learning to read. *Developmental Psychology*, 26, 429-438.
- Burnham, D. (2003). Language specific speech perception and the onset of reading. *Reading and Writing: an interdisciplinary journal*, 16 (6), 573-609.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204-256.
- Content, A., & Radeau, J. (1988). Données statistiques sur la structure orthographique du Français. *Cahier de Psychologie Cognitive*, 4, 399-404.
- Fagan, M.K., Pisoni, D.B., Horn, D.L., & Dillon, C.M. (2007). Neuropsychological Correlates of Vocabulary, Reading, and Working Memory in Deaf Children With Cochlear Implants. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 12, 461-471.
- Geers, A. (2003). Predictors of reading skill development in children with early cochlear implantation. *Ear and Hearing*, 24, 59S-68S.
- Goswami, U., Ziegler, J., Dalton, L., & Schneider, W. (2001). Pseudohomophone Effects and Phonological Recoding Procedures in Reading Development in English and German. *Journal of Memory & Language*, 45, 648-664.
- Hoonhorst, I., Medina, V., Colin, C. Markessis, E., Radeau, M., Deltenre, P., & Serniclaes, W. (in revision). Development of categorical perception: changes in boundary precision across voicing, colors and facial expressions. *Journal of Experimental Child Psychology*.
- Lachs, L., Pisoni, D.B., & Kirk, K.I. (2001). Use of audiovisual information in speech perception by prelingually deaf children with cochlear implants: a first report. *Ear and Hearing*, 22(3), 236-251.

- Lefavrais, P. (1967). *Test de l'Alouette: Manuel* [Alouette: A standardized reading test]. Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L. & Colé, P. (2004). MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 36(1), 156-166.
- Leybaert, J., & Colin, C. (2007). Le rôle des informations visuelles dans le développement du langage de l'enfant sourd muni d'un implant cochléaire. *Enfance*, 59(3), 245-253.
- Lundberg, I., Olofson A., & Wall, S. (1980). Reading and spelling skills in the first school years predicted from phonemic awareness skills in kindergarten. *Scandinavian Journal of Psychology*, 21, 159-173.
- Mann V. & Liberman I.Y (1984) Phonological awareness and verbal short term memory. *Journal of Learning Disabilities*, 17, 592-599.
- McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746-748.
- Medina, V., & Serniclaes, W. (2009). Consecuencias de la categorización fonológica sobre la lectura silenciosa de niños sordos con implante coclear. *Revista de Logopedia, Foniatría y Audiología*, 29(3), 186-194.
- Mousty, P., & Leybaert, J. (1999) Evaluation des habilités de lecture et d'orthographe au moyen de BELEC: données longitudinales auprès d'enfants francophones testés en 2ème et 4ème années. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 4, 325-342.
- O'Donoghue, G., Nikolopoulos, T., & Archbold, S. (2000). Determinants of speech perception in children after cochlear implantation. *Lancet*, 356(9228), 466-468.
- Perry, C., Ziegler, J., & Zorzi, M. (2010). Beyond single syllables: Large-scale modeling of reading aloud with the Connectionist Dual Process (CDP++) model. *Cognitive Psychology*, 24.
- Pothier, B. & Pothier, P. (2004). *Echelle d'acquisition en orthographe lexicale*. Paris : Edition Retz.
- Raven, J. (1947). *Coloured Progressive Matrices* (Lewis.). London.
- Share, D.L. (1995) Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55, 151-218.
- Share, D. L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: a direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72, 95-129.
- Spencer, L. J., & Tomblin, J. B. (2009). Evaluating phonological processing skills in children with prelingual deafness who use cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14(1), 1-21.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchenec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). Lecture et compétences reliées: Données normatives pour la fin de la 1ère, 2nde, 3ème et 4ème année du primaire issues d'une nouvelle batterie de tests, EVALEC. *European Review of Applied Psychology/Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 55(3), 157-186.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2006). *Reading acquisition and developmental dyslexia*. London: Psychology Press.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S., Béchenec, D., & Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading and in spelling: a 4 year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84, 194-217.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S., & Bonnet, P. (1998b). Phonological mediation and orthographic factors in reading and spelling. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 134-155.

- Tye-Murray, N., Spencer, L., & Gilbert-Bedia, E. (1995). Relationships between speech production and speech perception skills in young cochlear-implant users. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2454-2460.
- Tyler, R.S., Fryauf-Bertschy, H., Kelsay, D.M., Gantz, B.J., Woodworth, G.P., & Parkinson, A. (1997). Speech perception by prelingually deaf children using cochlear implants. *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 117(3), 180-187.
- Vermeulen, A.M., Van Bon, W., Schreuder, R., Knoors, H., & Snik, A. (2007). Reading Comprehension of Deaf Children With Cochlear Implants. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 12, 283-302.
- Waters, G.S., Seidenberg, G.M.S., & Bruck, M. (1984). Children's and adults' use of spelling sound information in three reading tasks. *Memory & Cognition*, 12, 293-305.
- Ziegler, J., Jacobs, A., & Klüppel, D. (2001). Pseudohomophone effects in lexical decision: still a challenge for current word recognition models. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance*, 27(3), 547-559.
- Ziegler, J., Van Orden, G., & Jacobs, A. (1997). Phonology can help or hurt the perception of print. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance*, 23(3), 845-860.

Reading and reading-related skills in children using cochlear implant: Prospects for the influence of Cued Speech¹

Sophie Bouton¹, Willy Serniclaes², Josiane Bertoncini², and Pascale Colé¹

¹ Université de Provence, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille

² CNRS & Université Paris-Descartes, Laboratoire Psychologie de la Perception, Paris

Résumé

Les compétences en lecture et associées à la réussite en lecture (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique) ont été évaluées chez des enfants munis d'un implant cochléaire exposés à la Langue Parlée Complétée (LPC), ou jamais exposés à la LPC. Leurs performances sont comparées à celles de deux groupes contrôles. Un groupe contrôle est apparié sur le niveau de lecture et un groupe contrôle est apparié sur l'âge chronologique. La conscience phonémique et la mémoire à court terme phonologique ont été respectivement évaluées par une tâche de jugement de similarité phonologique et une tâche de répétition de mots mesurant l'effet de similarité phonologique. Pour tester la reconnaissance des mots écrits, les enfants lisent à haute voix des pseudo-mots (exemples : énoure) et des mots irréguliers (exemple : album) afin de mettre en évidence l'effet de lexicalité qui évalue le recours à la procédure sous-lexicale pour lire les pseudo-mots et à la procédure lexicale pour lire les mots irréguliers. Les résultats montrent que l'exposition à la LPC augmente les performances en conscience phonémique et en lecture mais pas en mémoire à court terme phonologique. En conscience phonémique et en lecture, les enfants implantés exposés à la LPC obtiennent des scores de précision et de rapidité similaires à ceux des contrôles en âge chronologique alors que les enfants implantés qui n'ont jamais été exposés à la LPC obtiennent des scores inférieurs aux deux groupes contrôles. En mémoire à court terme phonologique, les deux groupes contrôles présentent un effet de similarité phonologique mais les performances de répétition des deux groupes d'enfants implantés ne sont pas influencées par la similarité phonologique. Les résultats mettent donc en évidence que l'utilisation de la LPC influence le développement de la conscience phonémique et de la lecture chez les enfants munis d'un implant cochléaire.

Mots clés : implant cochléaire, enfant, langue parlée complétée, lecture, conscience phonémique, mémoire à court terme phonologique.

¹ Paper published in **Journal of Deaf Studies and Deaf Education**

Abstract

We assessed the reading and reading-related skills (phonemic awareness and phonological short-term memory) of deaf children fitted with cochlear implants (CI), either exposed to cued speech early (before 2 years old) (CS+) or never (CS-). Their performance was compared to that of two hearing control groups, one matched for reading-level (RL) and one matched for chronological age (CA). Phonemic awareness and phonological short-term memory were assessed respectively through a phonemic similarity judgment task and through a word span task measuring phonological similarity effects. To assess the use of sublexical and lexical reading procedures, children read aloud pseudowords and irregular words. Results showed that cued speech improved performance on both the phonemic awareness and the reading tasks but not on the phonological short-term memory task. In phonemic awareness and reading, CS+ children obtained accuracy and rapidity scores similar to CA controls, whereas CS- children obtained lower scores than hearing controls. Nevertheless, in phonological short-term memory task, the phonological similarity effect of both CI groups was similar. Overall, these results support the use of cued speech to improve phonemic awareness and reading skills in CI children.

Keywords: cochlear implants, children, cued speech, reading skills, phonemic awareness, phonological short-term memory.

1. Introduction

Some studies have shown that the addition of visual cues to auditory information allows deaf children using cochlear implant (CI) to acquire more accurate phonemic representations (Descourtieux, Groh, Rusterholtz, Simoulin, & Busquet, 1999; Moreno-Torres & Torres, 2008; Medina & Serniclaes, 2009). Deaf CI children have been found to perform better on speech recognition tasks when both auditory and visual information (lipreading) were available compared to conditions in which only auditory information was available (Lachs, Pisoni, & Kirk, 2001; Rouger, Lagleyre, Fraysse, Deneve, Deguine, & Barone, 2007; Colin, Deltenre, Radeau, & Leybaert, 2007; Colin, Leybaert, Charlier, Mansbach, Ligny, Mancilla, & Deltenre, 2008; Leybaert & Colin, 2007). On the one hand, given their limited auditory experience, CI individuals naturally tend to rely more on lipreading than normally hearing people (Leybaert, Colin & Hage, 2010; Rouger et al., 2007). On the other hand, lipreading alone does not suffice to support speech development. Previous studies suggest that the perception of speech sounds in CI children is less accurate than in normal-hearing (NH) children (Geers, Brenner & Davidson, 2003; Medina & Serniclaes, 2009; Tye-Murray, Spencer & Gilbert-Bedia, 1995). Lipreading information is ambiguous: Cued speech is designed to eliminate this ambiguity (Cornett, 1967). Cued speech combined with both visual information from the lips and the auditory information provided by the speech signal is expected to provide unambiguous access to phonological units. CI children exposed to cued speech are expected to develop more accurate phonemic representation than CI children who have never been exposed to cued speech.

Accurate phonemic representations are needed to identify phonemes and to discriminate which phoneme among those in the inventory of a particular language a given stimulus represents. Research with normal-hearing (NH) children has emphasized the importance of the accuracy of phonemic representations in the success of reading acquisition

in dyslexic children (Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, & Sprenger-Charolles, 2008), like in normally developing readers (Bradley & Bryant, 1983; Burnham, 2003; Hoonhorst, Medina, Colin, Markessis, Radeau, Deltenre, & Serniclaes, in revision; Lundberg, Olofson & Wall, 1980). The successful acquisition of reading depends on the acquisition of related skills (phonemic awareness and phonological short-term memory), which in turn depends on the accuracy of phonemic representations. Many studies have provided evidence that the ability to identify and explicitly manipulate segments of speech, known as phonemic awareness, is fundamental in learning to read in an alphabetic system. This ability is required to grasp the principle of the alphabet, which must be understood before starting to decode written words. A child's degree of phonemic awareness has been proven in several longitudinal studies to be a good predictor of future achievement in reading (Fluss, Ziegler, Warszawski, Ducot, Richard, & Billard, 2009; Frost, Madsbjerg, Niedersoe, Olofsson, & Sorensen, 2005; Hulme, Goetz, Gooch, Adams, & Snowling, 2007; Lundberg et al., 1980; Savage & Carless, 2005; Stanovich, Cunningham & Cramer, 1984). Experimental training studies have also evidenced a causal connection between phonemic awareness and reading (Ehri, Nunes, Willows, Schuster, Yaghoub-Zadeh and Shanahan, 2001; Hulme, Hatcher, Nation, Brown, Adams & Stuart, 2002). In addition, the ability to retain and manipulate phonological forms in short-term memory (phonological short-term memory) has been shown to contribute to reading achievement (Baddeley, 2003; Snowling, 2001). More specifically, during decoding, this ability makes it possible to retain the assembled phonological code derived from the use of grapheme-phoneme correspondences. Thus, the research literature amply supports the idea that for children to develop both reading-related skills and reading skills, they must have acquired accurate phonemic representations.

1.1. Influence of Cued speech on language acquisition in children using cochlear implant

Cued speech may facilitate the speech development of CI children. Numerous studies have experimentally demonstrated that cued speech contributes to the establishment of word representations in deaf people (with or without a hearing aid). In particular, many studies have experimentally demonstrated that cued speech helps the deaf establish auditory word representations in French (Alegria, Charlier, & Mattys, 1999; Charlier & Leybaert, 2000; Hage, Alegria, & Perier, 1990; LaSasso, Crain, & Leybaert, 2003; Perier, Charlier, Hage, & Alegria, 1988; Leybaert & Charlier, 1996, Charlier & Leybaert, 2000, LaSasso, Crain, & Leybaert, 2003; Leybaert & LaSasso, 2010) and in English (Nicholls & Ling, 1982; Uchanski, Delhorne, Dix, Braidia, Reed, & Durlach, 1994; LaSasso & Crain, 2010; LaSasso & Metzger, 1998; Koo, Crain, LaSasso, & Eden, 2008). These data imply that visual cues (lips and keys) are perceptually integrated and are able to facilitate the discrimination, identification, and manipulation of phonological units.

While nowadays the majority of profoundly deaf children are fitted with CI, few studies provide any evidence about the impact of cued speech on speech perception in CI children. Two case studies describing the early development of language in a CI child have indicated that in each case, speech acquisition was influenced by exposition to cued speech (in French, Descourtieux et al., 1999; in Spanish, Moreno-Torres & Torres, 2008). To determine the influence of cued speech on speech production, Vieu, Mondain, Blanchard, Sillon, Reuillard-Artieres, Tobey, et al. (1998) compared performance on a picture naming task in three groups of 4 CI children. The first group was exposed to speech only (average age of implantation: 7.7 years), the second group was exposed to LSF (Langue des Signes Française, a French version of the American sign language, average age of implantation: 7.1 years) and the last group was exposed to cued speech (average age of implantation: 6.5 years).

After 36 months of implant use, the children whose scores improved the most were those who had been exposed to cued speech (44.3%), while the naming scores of CI children exposed to speech only or to LSF increased by 36.6% and 28.7%, respectively. We thus have an indication that cued speech seems to improve spoken language acquisition in CI children.

1.2. Reading-related skills in children with cochlear implant

To our knowledge, no study has investigated the influence of cued speech on phonemic awareness and phonological short-term memory in CI children. Given the observed impact of cued speech on speech perception and production (Descourtieux et al., 1999; Moreno-Torres & Torres, 2008; Vieu et al., 1998), it is quite possible that cued speech might help the development of these particular reading-related skills.

Previous studies on phonemic awareness have indicated that CI children are able to develop phonemic awareness, but the level they ultimately attain has yet to be determined. CI children fitted late (i.e. on average at 6 years) obtained scores significantly lower than NH children matched for reading level or chronological age in a phonemic similarity judgement task (James, Rajput, Brinton, & Goswami, 2007). In contrast, while CI children fitted early (i.e. on average at 2;10 years) also performed worse than NH children matched for reading level (mean chronological age: 6.8 years) their performance surprisingly are similar to those of NH children matched for chronological age (mean chronological age: 7.8 years) (James et al., 2008). Spencer and Tomblin (2009) reported that CI children performed as accurately on a first-phoneme deletion task as NH children matched for reading comprehension level. Thus, data on the development of phonemic awareness are not clear-cut, since CI children's performance can be interpreted differently depending on the match chosen to establish control group (reading age and chronological age). This suggests that control groups may sometimes not provide an age-appropriate level of phonemic awareness.

To our knowledge, only three studies have assessed phonological short-term memory in CI children, two of them with a pseudoword repetition task. First, Dillon, Burkholder, Cleary, and Pisoni (2004) showed that a sample of 76 children who had been fitted with cochlear implant at ages ranging from 1.9 to 5.4 years, and whose average chronological age at the time of testing was 8.9 years, only managed to repeat 42% of presented pseudowords correctly. Spencer and Tomblin (2009) found that CI children ranging in age from 7;2 to 17;8 years (mean age at implantation: 3;7 years) obtained significantly lower scores on a pseudoword repetition task than NH children matched for reading comprehension and ranging in age from 6;2 to 17;9 years. Finally, the third study used a word repetition task and explored the effect of phonological similarity (Willems & Leybaert, 2009). Sequences of phonologically dissimilar words (e.g.: ball, soon, life) are better recalled than sequences of words presenting phonological similarities (e.g.: pet, bet, set). This phonological similarity effect is regularly observed (Watkins, Watkins, & Crowder, 1974; Baddeley, 1986; Nairne & Kelley, 1999; Fournet, Juphard, Monnier, & Roulin, 2003) in word recall tasks. This effect suggests that words are encoded on the basis of the phonological information they contained. Willems & Leybaert (2009) showed that CI children (with a mean age at fitting of 37.6 months, and a mean chronological age of 6.9 years) presented a shorter span and reduced effect of phonological similarity compared to NH children matched for chronological age, but a similar phonological similarity effect when compared to NH children matched for span length. These results point to normally functioning phonological short-term memory in CI children. Their lower span seems due to heavier cognitive costs for word identification, which would leave less cognitive resources for memorization.

1.3. Development of reading skills in children using cochlear implant

Most studies on reading acquisition are based on the dual-route model (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001; for a recent review, see Perry, Ziegler and Zorzi, 2010), which holds that written words can be read either through a lexical or a sublexical procedure. The lexical procedure is said to give direct access to the orthographic word form from the subject's internal lexicon, whereas the sublexical procedure (in alphabetic scripts) consists of translating sublexical written units (graphemes) into sublexical units of the spoken language (phonemes), which are then assembled. This procedure might act as a bootstrapping mechanism upon which the lexical procedure can develop (Share, 1999). These two procedures are assumed to be used in parallel to process printed material, with processing tradeoffs that depend on the overall level of word identification (e.g. for English-speaking children: Backman, Bruck, Hebert, & Seidenberg, 1984; Waters, Seidenberg, & Bruck, 1984; for French-speaking children: Sprenger-Charolles, Siegel, & Bonnet, 1998; Sprenger-Charolles, Siegel, Béchenec, & Serniclaes, 2003). Generally, the efficiency of the sublexical procedure is assessed through the task of reading aloud pseudowords and the efficiency of the lexical procedure is assessed through that of reading aloud irregular words. When observed, the lexicality effect¹¹ is taken as an indicator of the subjects' use of the lexical procedure to read words and the sublexical procedure to read pseudowords. To determine whether or not reading skills have developed differently in CI children—i.e. whether there is a deviant developmental trajectory rather than a delay—their reading performance must be compared to that of NH children matched both for reading level and for chronological age. The categorization of impairments as either deficits or delays was originally described by Bryant and Impey (1986) for dyslexic reading skills. When dyslexic readers perform less well than their reading level controls, the skill being assessed is considered deficient. In contrast, when

¹ As previously found by Sprenger-Charolles et al. (2005), the lexicality effect was detrimental to irregular words for accuracy, but favored them for latency.

dyslexic readers perform similarly to reading level controls, the development of the assessed skill is considered merely to be delayed. Because our aim is to characterize the extent to which processing impairments are involved, separating deficiency from developmental delay is highly relevant.

Again, very few published studies have assessed reading development in CI children according to their experience with cued speech. Torres, Rodriguez, Garcia-Orza, & Calleja (2008) indicated that the reading comprehension level of CI children (fitted at an average of 4.2 years old; average age of 12.6 years old at the time of the study) is similar to that of NH children matched for reading level or chronological age. Children tested were exposed intensively to cued speech, at home and with a speech therapist, starting at an average age of 12 months. The results of Medina & Serniclaes (2009) showed that the reading level of children implanted from 2 to 3 years and aged from 6 to 11 years was similar to that of NH children matched for chronological age. In this study, children were also exposed to cued speech, suggesting that the joint contribution of cued speech and CI enables reading acquisition with the same developmental time course as NH children. Leybaert, Bravard, Sudre & Cochard (2009) showed that reading scores for regular and irregular words were better for CI children exposed to cued speech (with a speech therapist and/or at home) than for CI children who had not been exposed to cued speech. However, both CI groups obtained lower accuracy scores than NH children matched for grade level. These data strongly suggest that the use of cued speech with CI effectively aids deaf children in reading acquisition. However, neither Torres et al. (2008) nor Medina and Serniclaes (2009) directly compared CI children either exposed to cued speech or not. And in Leybaert et al. (2009), CI children were not compared with NH children matched for reading level or chronological age.

1.4. The present study

In summary, previous studies provide some evidence that young CI users are able to acquire phonemic awareness and phonological short-term memory skills and to develop sublexical and lexical procedures. But, as reviewed above, it is difficult to establish a clear reading level and reading-related skills remain largely unspecified, because control groups differ between studies and no study has realized a double comparison with both NH control groups matched for reading level and chronological age.

Studies on cued speech show very encouraging signs of joint contributions from cued speech and CI to reading acquisition, but methodological issues remain. It is necessary to combine comparisons between CI children who have been exposed to cued speech and those who have not, on one hand, with comparisons to the two types of NH control (matched for either reading level or chronological age), on the other. The aim of the present study was to assess the reading-related skills (phonemic awareness and phonological short-term memory) and reading skills of French CI children exposed to cued speech. We sought to determine whether cued speech could influence the acquisition of reading and reading-related skills by comparing CI children exposed to cued speech (CS+) early (before age 2) and intensively (at home and with a speech therapist), and CI children who have never been exposed to cued speech (CS-). Because cued speech may speed the development of phonemic representations, it may also influence the development of reading-related skills and reading abilities. We thus evaluated whether the reading skills and reading-related skills of both CI groups developed normally or in an impaired fashion in comparison to those of NH children matched for reading level (NH-RL) and chronological age (NH-CA). If cued speech positively influences reading acquisition, we expect that CS+ children will exhibit a level of reading and reading-related skills comparable to that of NH children, while CS- children would present impairment or delay.

2. Method

The present study was designed to investigate the influence of cued speech on CI children's capacity to identify, manipulate, and encode phonemic units, and to read isolated written items. The performance of both groups of CI children, either exposed to cued speech (CS+) or never exposed to cued speech (CS-) was compared to that of two groups of NH children matched for reading level (NH-RL) and chronological age (NH-CA).

2.1. Participants

Eighteen children with cochlear implant (8 boys and 10 girls) were recruited from 9 French school support services for the deaf located in different regions of France. All the children were congenitally deaf, had used a cochlear implant device for at least 5 years, and had been fitted with an implant before the age of 3;6 years. Different implants were used: one Clarion (Advanced Bionics), 16 Nucleus 24 devices (Cochlear Corporation) and one the Digisonic (Neurelec). Children recruited ranged from 7;11 to 11 years, and from grades 2 to 4. Their age at implantation ranged from 1;10 to 3;6 years. Only one child had deaf parents. Table 1 describes the characteristics of the two CI groups (CS+ and CS-). Before implantation, all children used conventional hearing aids. Before and after implantation, 9 out of 18 CI children used cued speech early (before the age of 2) and with intensive practice (at home and with speech therapist). These children composed the CS+ group. To be selected for the CS+ group, they had to obtain more than 80% of correct responses to the TERMO test (Descourtieux & Busquet, 2003) in which children have to name the words presented with visual signals (keys and lipreading) but without an auditory signal. Nine other CI children composed the CS- group. Among them, 6 children used spoken language, i.e. they exclusively used speech and audition to communicate, 2 had been exposed to both spoken language and

LSF, and 1 child was exposed to both spoken language and signed French (Français signé²). The children in the CS- group had never been exposed to cued speech. Thirteen out of the 18 CI children were enrolled in mainstream classes with hearing children. The remaining five children were in a spoken language classroom in a special school (special education with spoken language instruction).

CI groups	Chronological age (years; months) Mean (standard deviation in parentheses)	Age at implantation (years; months)	Length of cochlear implant use (years; months)	Communication mode	Educational placement
CS- (N = 9)	9;1 (0;8)	2;8 (0;5)	6;5 (1;1)	6 oral 2 oral + LSF 1 oral + FS	4 special education 5 mainstream
CS+ (N = 9)	8;8 (1;1)	2;6 (0;9)	6;2 (1)	9 early and intensive Cued Speech + oral	8 mainstream 1 special education

Table 1. Characteristics of children with cochlear implant

To compare the performance of the CI group and the two NH groups, each child with CI was matched with one NH child with the same reading level and with one NH child with the same chronological age. All the NH children met the following criteria: (a) they were native speakers of French, and (b) they had no history of auditory, language or reading disorders. The reading level was obtained using the Alouette test (Lefavrais, 1967), a standardized French reading test used in assessment for developmental dyslexia (i.e. Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, & Sprenger-Charolles, 2008; Casalis, Colé & Sopo, 2004; Sprenger-Charolles, Colé, Kipffer-Piquard, Pinton & Billard, 2009; Ziegler, Castel, Pech-Georgel, George, Alario & Perry, 2008; Ziegler, Pech-Georgel, George, & Lorenzi, 2009). This test requires subjects to read a meaningless text aloud; their performance is then converted into a reading age. The Alouette test was standardized for the reading performance of children ages 5 to 14, and a composite score (called “reading score”) that took both accuracy and speed into account was calculated. The families of all the participants (both CI

² Signed French (français signé) corresponds to the use of LSF according to the linear syntax of spoken French.

children and NH children) were informed about the goals of the study, and provided written consent before their child's participation.

As indicated in Table 2, the chronological ages of the CS+ and CS- groups are the same as those of NH-CA group ($t < 1$, $t < 1$) but are significantly higher than those of the NH-RL group ($t(16) = 4.02$, $p < .001$; $t(16) = 4.33$, $p < .001$, respectively). The reading scores of the CS+ and CS- groups are similar to those of the NH-RL group ($t < 1$, $t < 1$) but significantly lower than those of the NH-CA group ($t(16) = 3.82$, $p < .001$; $t(16) = 4.51$, $p < .001$, respectively). Moreover, the reading scores of CS+ children are significantly higher than those of CS- children ($t(16) = 3.30$, $p < .01$). The nonverbal reasoning scores of all groups, tested using the progressive matrices (PM47, Raven, 1947), were within the normal range. The PM47 scores of CS+ and CS- children did not differ significantly from those of the NH-RL group ($t(16) = 1.21$, $p > .20$; $t(16) = 1.18$, $p > .20$, respectively) but were significantly lower than those of NH-CA children ($t(16) = 2.82$, $p < .01$; $t(16) = 3.25$, $p < .01$, respectively).

	Chronological Age years;months	Reading Age (Alouette test) years;months	PM47	
			/36	Percentiles
CS-	9;1 (0;8)	7;1 (0;4)	27 (6)	25 th
CS+	8;8 (1;1)	7;9 (0;7)	28 (5)	25 th
NH-RL	7;6 (0;6)	7;6 (0;9)	27 (4.5)	50 th
NH-CA	9;1 (0;9)	9;1 (1)	34 (5)	75 th

Table 2: Means and standard deviations (in parentheses) of cochlear implant and normal-hearing (NH) participants' chronological age, listening age and non-verbal IQ level.

2.2. Experimental tasks

Two tasks were administered in order to assess the development of subjects' reading-related skills development. The first was a phonemic similarity judgment task which assessed phonemic awareness. The second task was a word repetition task assessing phonological short-term memory.

A reading task was used to evaluate reading skills and possible between-group differences in the use of sublexical and lexical procedures. Because in the studies reported in the introduction only percentage of correct responses was used, leading to potential ceiling effects, we measured both accuracy and processing time, to take possible speed-accuracy tradeoffs into account and to provide a fine-grained measure of performance (see for example Sprenger-Charolles et al., 2003).

Reading-related skills

For tasks assessing reading-related skills, words that are very frequent (and assumed to be known by all the participants – frequent and familiar): one and a half per 100 words, corresponding to a standard frequency effect of 85 (MANULEX, Lété, Sprenger-Charolles and Colé, 2004).

Phonemic awareness – similarity judgment task

For each trial in the test, children were instructed to name three pictures (example: savon – bouton – balai ; soap – button – brush) and to indicate the two pictures that begin with the same sound. In each trial, the three items are matched for length (number of letters, phonemes and syllables) as well as written frequency. The mean length of all the words was 5.2 letters (SD: 0.9), 3.3 phonemes (SD: 0.7), and 1.3 syllables (SD: 0.5).

Procedure. The children were instructed to name the three pictures displayed in the center of the screen and to choose the two pictures whose names begin with the same sound as accurately and as quickly as possible. Practice items were used to familiarize the children with the material and to make sure that they understood the instructions. The procedure on each trial was as follows. A fixation cross remained in the center of the screen for 500 ms and was immediately followed by the three pictures. Children answered by pointing to the two

pictures whose names begin by the same sound. The pictures remained on the screen until the subject had finished performing this similarity judgment, at which point the experimenter triggered the presentation of the next item. No feedback was given.

The order in which the items were administered was random across children, and each of the items was presented only one time. The positions of the three pictures displayed on a trial were also randomly distributed across children.

Phonological short-term memory – word repetition task

The second task, controlled by E-prime 2.0 and running on a Dell PC, was a word recall task where each word is represented by a picture. To assess phonological short-term memory, we measured for a phonological similarity effect. We manipulated the phonological similarity of words, comparing the children's ability to repeat a series of phonologically similar words (example: bateau – râteau – château; boat – rake - castle) or a control series of phonological dissimilar words (example: cochon – tapis – lapin; pig - carpet - rabbit). Within each list and between the lists, items were matched for length (number of letters, phonemes and syllables), and written frequency. Their mean length was 5.3 letters (SD: 1), 3.5 phonemes (SD: 0.6), and 1.5 syllables (SD: 0.5) for phonologically similar words and 5.5 letters (SD: 1.2), 3.6 phonemes (SD: 0.4), and 1.6 syllables (SD: 0.5) for phonologically dissimilar words (all $t < 1$). Series contained two to five pictures (eight blocks per number of pictures in a series: eight blocks of two, eight blocks of three, etc.). A total of thirty-two blocks comprised of between two and five pictures were presented. Children were presented with the eight blocks containing two pictures; if they achieved at least 50% correct responses, the following block (containing three pictures) was presented, and so on. The accuracy of ordinate recall was measured through span. No feedback was given during test. Practice items

were used to familiarize children with the material and to make sure that they understood the instructions.

Procedure. A fixation cross remained in the center of the screen for 500 ms and was immediately followed by pictures which were presented one by one in a block. Each picture remained in the center of the screen for 2500ms. Children had to name each picture during its presentation. At the end of each block, the pictures were presented simultaneously and the child had to indicate the order in which the pictures had been presented. Pictures remained on the screen until the subject had finished recalling the order of presentation, at which point the experimenter triggered the presentation of the next item. The order in which the lists were administered was randomized across children, and all the items in each block were presented only one time in a random order. The positions of the pictures on the screen in the recall step were randomly distributed for each child.

Reading task

To assess the acquisition of the different reading procedures, we used pseudowords, assumed to be the best “signature” of the sublexical procedure in grades 1 to 4, and irregular words, considered the best indicator of the use of the lexical procedure with CI children in grades 2 to 5 (Sprenger-Charolles, Colé, Béchennec, & Kipffer-Piquard, 2005).

Both lists were composed of 30 irregular words (example: orchestre, pied) and 30 pseudowords (example: supon, pitode). Within each list and between lists, the items were matched for length (number of letters, phonemes and syllables) and orthographic frequency (frequency of bigrams, Content and Radeau, 1988). Mean length was 5.7 letters (SD: 1.7) 4.1 phonemes (SD: 1.6), and 1.6 syllables (SD: 0.6) for irregular words, and 5.6 letters (SD: 1.6), 4.4 phonemes (SD: 1.8), and 1.7 syllables (SD: 0.5) for pseudowords (all $t < 1$). Their mean orthographic frequency was 36 (SD: 11.6) and 37 (SD: 13.3) respectively for irregular words

and pseudowords ($t < 1$). In order to ensure comparable measurements for latency, the items in each list were also matched for their initial grapheme.

Procedure. The children were instructed to read the item displayed in the center of the screen aloud as accurately and as quickly as possible. Practice items were used to familiarize children with the material and to make sure that they understood the instructions. No feedback was given. The procedure on each trial was as follows. A fixation cross remained in the center of the screen for 500 ms and was immediately followed by the test item. The item remained on the screen until the subject had finished reading aloud, at which point the experimenter triggered the presentation of the next item.

Response latency and accuracy were recorded. A sound card was used to record the children's vocal responses in individual files. The software calculated latency as the interval between the stimulus onset on the screen and the detection of the onset of the spoken response. The software allowed for manual readjustment if necessary and the elimination of latencies on incorrect responses. This enabled the experimenter to ensure that no invalid latencies were included, and to calculate the percentage of errors. The order in which the two lists were administered was random across children and all the items were presented only one time in a random order.

CI and NH children were tested individually in a quiet room (at home and at school, respectively). They performed all tasks (Alouette test, PM47, phonemic awareness, phonological short-term memory and tasks with written items) during a single session which lasted around 30 minutes.

3. Results

Phonemic awareness task

The percentage of correct responses and latencies were entered in two repeated-measures analyses of variance (ANOVA) using either participants (F1) or items (F2) as factors. In F1 ANOVAs run on phonemic awareness scores, Group (CS+ vs. CS- vs. normal-hearing group matched for reading level vs. normal-hearing group matched for chronological age) was a between-subject factor. The design of both F2 ANOVAs had Group as a within-items factor. Differences in the accuracy and rapidity of responses between groups were tested for a Group effect using planned comparisons between groups. The average scores of CS+, CS- and NH control groups on the phonemic awareness task are presented in Table 3.

Percentage of correct responses				Latency times (in seconds)			
CS-	CS+	RL	CA	CS-	CS+	RL	CA
79.3 (25)	99.3 (22)	92.2 (17)	93.1 (15)	6.15 (2.8)	4.54 (1.2)	4.63 (1.5)	3.63 (1.3)

Table 3. Percentage of correct responses and latencies (standard deviations in parentheses) for the phonemic similarity judgment task.

For accuracy measures, significant effect of Group was found ($F(1,3,50) = 3.22$, $p < .05$; $F(2,3,42) = 20.3$, $p < .001$). The group effect was due to greater phonemic awareness scores for NH-CA, NH-RL and CS+ children compared to CS- children (respectively, $t(50) = 2.21$, $p < .05$; $t(14) = 4.93$, $p < .001$; $t(50) = 2.75$, $p = .01$, $t(14) = 3.50$, $p < .01$; $t(50) = 2.84$, $p < .001$, $t(14) = 5.91$, $p < .001$). NH-CA, NH-RL and CS+ children obtained similar scores (comparison of NH-CA and NH-RL: $t_1 < 1$, $t_2 < 1$; comparison of NH-CA and CS+: $t(50) = 1.11$, $p > .20$, $t_2 < 1$; comparison of NH-RL and CS+: $t_1 < 1$, $t_2 < 1$).

For latency time measures, analyses were conducted on correct answers only. Errors were removed from analyses. We found significant effect of Group was found ($F(1,3,48) =$

3.52, $p < .05$, $F_2(3,42) = 18.2$, $p < .001$). The group effect was due to shorter latencies for NH-CA, NH-RL and CS+ children compared to CS- children (respectively, $t_1(48) = 2.52$, $p < .05$, $t_2(14) = 5.31$, $p < .001$; $t_1(48) = 3.73$, $p < .01$, $t_2(14) = 4.35$, $p < .001$; $t_1(48) = 3.82$, $p < .001$, $t_2(14) = 5.71$, $p < .001$). NH-CA, NH-RL and CS+ children all obtained similar scores (for all comparisons: $t_1(48) < 1$, $t_2 < 1$).

Phonological short-term memory

Span size was entered into a repeated-measures analysis of variance (ANOVA) using participants (F1) as a factor. The F1 ANOVA involved Similarity (phonologically similar words vs. phonologically dissimilar words) as a within-subjects factor and Group (CS+ vs. CS- vs. NH-RL vs. NH-CA) as a between-subjects factor. Differences in span size of word recall between groups were tested for a main effect and planned comparisons between groups were also performed. The similarity effect is the difference in precision (span) of word recall between phonologically similar words and phonologically dissimilar words. Differences in the Similarity effect between groups were tested for with the Similarity x Group interaction and with planned comparisons for each group. For latency time measures, analyses were conducted on correct answers only.

Average span scores of CS+, CS- and NH control groups on the phonological short-term memory task are presented in Table 4.

	Percentage of correct responses			
	CS-	CS+	RL	CA
Phonologically similar items	57.7 (15.3)	62.4 (8.4)	64.2 (8.7)	70.1 (8.9)
Phonologically dissimilar items	55.9 (16.2)	60.5 (15.9)	76.4 (10.9)	83.6 (6.5)
	Latency times (in seconds)			
	CS-	CS+	RL	CA
Phonologically similar items	8.5 (2.4)	6.9 (1.5)	8.9 (1.8)	7.1 (1.7)
Phonologically dissimilar items	6 (2.3)	5.1 (1.1)	7.1 (1.6)	5.1 (1.5)

Table 4. Span scores (standard deviation in parentheses) for recall task for phonologically similar words and phonologically dissimilar words.

For accuracy measure, a significant main effect was found for Group ($F(3,50) = 14$, $p < .001$) and for Similarity ($F(1,50) = 12$, $p = .001$). The group effect was due to greater scores for CA children, compared to CS+ and CS- children (respectively, $t(50) = 4.47$, $p < .001$; $t(50) = 5.74$, $p < .001$), and for RL children compared to CS+ and CS- children (respectively, $t(50) = 2.71$, $p < .05$; $t(50) = 3.99$, $p < .01$). Whereas CS+ and CS- children obtained similar scores ($t(50) < 1$), CA children obtained greater scores than RL children ($t(50) = 2.76$, $p < .05$). The Group x Similarity interaction was significant ($F(3,50) = 7.34$, $p < .001$). CA and RL groups presented a Similarity effect (respectively, $t(50) = 4.78$, $p < .001$; $t(50) = 5.23$, $p < .001$), while CS+ and CS- groups did not (for both groups, $t(50) < 1$).

For latency, a significant main effect was found for Group ($F(3,50) = 13.42$, $p < .001$) and for Similarity ($F(1,50) = 27.12$, $p < .001$). The group effect was due to shorter latencies for CA children compared to RL and CS- children (respectively, $t(50) = 5.31$, $p < .001$; $t(50) = 2.55$, $p < .05$) and to shorter latencies for CS+ children compared to RL and CS- children (respectively, $t(50) = 5.01$, $p < .001$; $t(50) = 3.01$, $p < .05$). Results also showed

that CA and CS+ children obtained similar latencies ($t < 1$), and that RL and CS- children performed similarly ($t < 1$). The Group x Similarity interaction was not significant ($F < 1$). CA, RL, CS+ and CS- groups presented a Similarity effect (respectively, $t(50) = 4.62, p < .001$; $t(50) = 2.09, p < .05$; $t(50) = 2.02, p < .05$; $t(50) = 3.28, p < .01$).

Reading skills

Percentage of correct responses and latencies were entered into two repeated-measure analyses of variance (ANOVA) performed using either participants (F1) or items (F2) as factors. F1 ANOVAs run on irregular word and pseudoword reading scores involved Lexicality (irregular words vs. pseudowords) as a within-participants factors and Group (CS+ vs. CS- vs. RL vs. CA) as a between-participants factor. The design of both F2 ANOVAs involved Lexicality as a between-items factor and Group as a within-items factor. Differences between groups in the precision and rapidity of reading were tested with the Group effect and with planned comparisons between groups. A lexicality effect corresponds to a difference in accuracy and rapidity of reading between pseudowords and irregular words. Differences between groups in the presence and extent of Lexicality effects were tested with the Lexicality x Group interaction and with planned comparisons for each group.

Response Accuracy

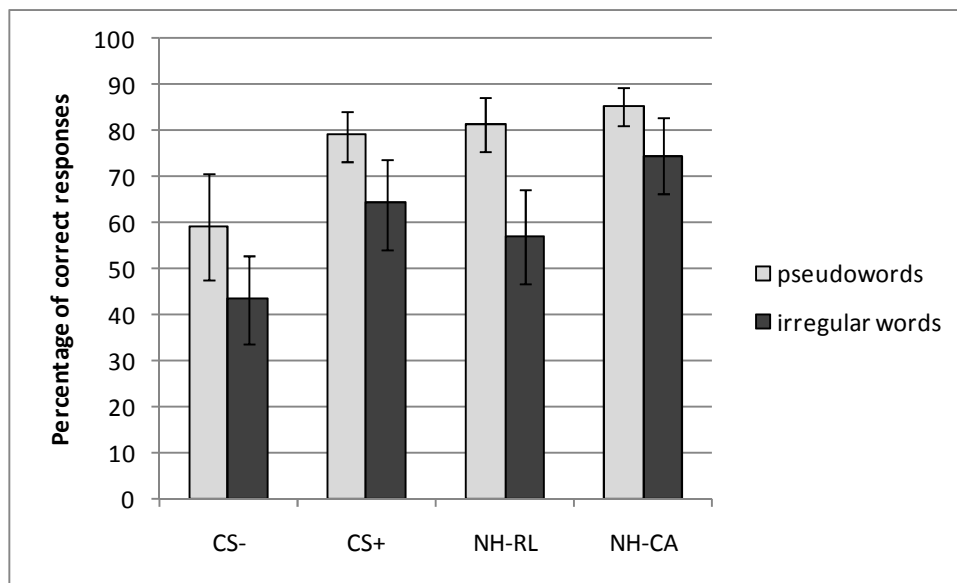


Figure 1. Percentage of correct responses on a reading aloud task for irregular words and pseudowords for normal-hearing children matched for chronological age (NH-CA), normal-hearing children matched for reading level (NH-RL), children using cochlear implant and exposed to cued speech (CS+), and children using cochlear implant and never exposed to cued speech (CS-).

Figure 1 presents the mean reading scores for irregular words and pseudowords (expressed in percentage of correct responses) for each group. Among main effects, a significant effect was found for Group ($F(1,3,50) = 8.44, p < .001, F(2,3,174) = 32.9, p < .001$). The group effect was due to the greater reading scores of CA, RL and CS+ children compared to CS- children for both irregular words and pseudowords (respectively, $t(50) = 5.54, p < .001, t(58) = 10.4, p < .001$; $t(50) = 2.44, p < .05, t(58) = 9.84, p < .001, t(50) = 3.38, p < .01, t(58) = 11.5, p < .001$). Additionally, whereas RL children scored lower than to CA children ($t(50) = 3.36, p < .01, t(58) = 8.64, p < .001$), the scores of CS+ children were similar to those of both RL and CA children ($t(50) = 1.23, p > .20, t(58) < 1; t(50) = 1.42, p = .15, t(58) < 1$, respectively).

The effect of Lexicality was also found to be significant ($F(1,50) = 65.6, p < .001, F(2,158) = 15.2, p < .001$) specifically, pseudowords were read with more accuracy than irregular words.

The Group x Lexicality interaction was also significant ($F(3,50) = 4.52, p < .01, F(2,174) = 12.3, p < .001$). Although each group presented a lexicality effect ($t(50) = 3.07, p < .01; t(58) = 2.60, p < .05$, for CS- children, $t(50) = 2.90, p < .01; t(58) = 2.44, p < .05$, for CS+ children, $t(50) = 3.54, p < .001; t(58) = 2.42, p < .05$, for CA children, $t(50) = 7.93, p < .001, t(58) = 4.78, p < .001$, for RL children), the difference in favor of pseudowords was larger for RL children than for CA, CS+ and CS- children (respectively, $t(50) = 3.62, p < .001, t(58) = 7.33, p < .001; t(50) = 2.23, p < .05, t(58) = 3.54, p < .01; t(50) = 2.25, p < .05, t(58) = 3.22, p < .01$). Among the latter three groups (CA, CS+ and CS- children) the lexicality effect was similar (all comparisons: $t_1 < 1, t_2 < 1$). The difference between the mean percentage correct responses for pseudowords minus irregular words for RL, CA, CS+ and CS- children was 24%, 11%, 16%, and 15%, respectively.

Latency

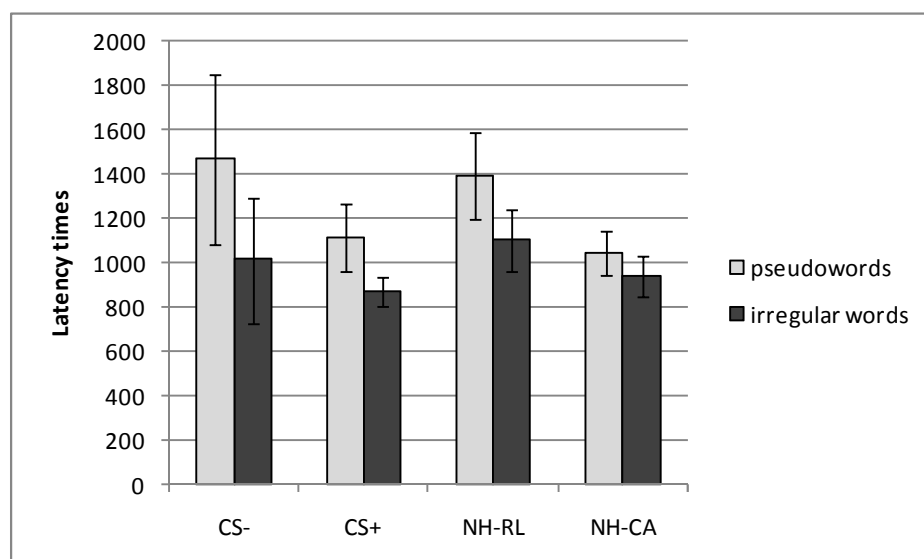


Figure 2. Latency times on a naming task for irregular words and pseudowords reading for normal-hearing children matched for chronological age (NH-CA), normal-hearing children matched for reading level (NH-RL), children using cochlear implant and exposed to cued speech (CS+), and children using cochlear implant and never exposed to cued speech (CS-).

Figure 2 presents the mean reading latencies for irregular words and pseudowords (expressed in milliseconds) for each group. Among main effects, a significant effect was found for Group ($F(3,44) = 6.34, p < .001, F(3,174) = 7.54, p < .001$). The group effect indicates that CS- children read pseudowords and irregular words less rapidly than CS+, RL and CA children (respectively, $t(44) = 3.54, p < .001, t(58) = 4.21, p < .001; t(44) = 3.11, p < .01, t(58) = 4.42, p < .001; t(44) = 4.14, p < .001, t(58) = 5.85, p < .001$). RL, CA and CS+ children showed similar latencies (for all comparisons, $t < 1, t < 1$). A significant effect was also found for Lexicality ($F(1,44) = 16.5, p < .001, F(1,58) = 11.2, p < .01$), with irregular words read more rapidly than pseudowords. The Group x Lexicality interaction was not significant ($F(3,44) = 1.70, p > .15, F < 1$). The lexicality effect was significant for each group ($t(44) = 2.45, p < .05; t(58) = 3.32, p < .05$, for CS- children, $t(44) = 2.34, p < .05; t(58) = 3.46, p < .05$, for CS+ children, $t(44) = 2.70, p < .05; t(58) = 3.16, p < .05$, for CA children, $t(44) = 2.61, p < .05, t(58) = 3.23, p < .05$, for RL children).

Discussion

The present study was designed to investigate the reading and reading-related skills of French CI children, either exposed to cued speech or not (CS+ vs. CS-) in comparison with hearing control children matched for reading level and chronological age. Because previous evidence suggested that cued speech influences speech and reading development in deaf children using hearing aid (Leybaert, 2000; Leybaert & Charlier, 1996; Leybaert & Lechat, 2001; Charlier & Leybaert, 2000), direct study of the influence of cued speech on CI's children reading and reading-related skills seemed valuable. We thus explored the links between the quality of phonemic representations and the development of phonemic awareness, phonological short-term memory and reading skills.

We found that exposure to cued speech influences phonemic awareness. CS+ group presented accuracy and latencies similar to both hearing control groups, whereas CS- obtained

lower scores than CS+ and hearing children. Nevertheless, regardless of exposure to cued speech, CI children seem use similarly the phonological representations of words in order to complete a word span task. In phonological short-term memory, cued speech might not influence the quality and the rapidity of the use of phonological representations.

The reading task showed that cued speech influences the ability to read. CS+ children read items (pseudowords and irregular words) with accuracy and rapidity similar to that of both hearing control groups whereas CS- children read pseudowords and irregular words with lesser accuracy and rapidity than hearing controls. Cued speech might influence only the quality of the use of reading procedures, but not the processing involved in reading. A lexicality effect was observed in both accuracy and latency time scores for all groups, and was similar for CA, CS+ and CS-, indicating that all groups read pseudowords through the sublexical procedure and irregular words through the lexical procedure.

In summary, our study showed that children exposed early to cued speech are better at phonological processing than CI children never exposed to cued speech. CI children exposed to cued speech develop better abilities at manipulating and identifying phonemes, i.e. phonemic awareness, and better correspondences between grapheme and phoneme for reading. However, we found no impact of cued speech on processing implied in phonological short-term memory.

The influence of cued speech on reading-related skills in children using cochlear implants

The comparisons of the CI children with both reading level-matched and chronological age-matched groups aimed to determine whether the phonological skills that are related to reading success develop normally in CI children (performance similar to CA children), and if not, whether the observed phonological impairments constitute a deficit (lesser performance than RL group) or a delay (performance similar to RL children). As

expected, CS+ children obtained scores similar to those of both hearing groups, whereas CS- children were outperformed by hearing controls on the phonemic awareness task. Impairment in both accuracy and latency were observed for the phonemic similarity judgment task, indicating a deficit in phonemic awareness in CS- children. These results are congruent with those of Descourtieux et al., (1999), Moreno-Torres and Torres (2008), and Vieu et al., (1998) which showed that cued speech improves the speech perception and production abilities of CI children. By improving the quality of phonemic representations, cued speech enhances the ability of CI children to identify and manipulate phonemes.

Results on a short-term memory task present a different pattern, since CI children in both the CS+ and CS- groups were outperformed by CA and RL children on the accuracy scores. Moreover, as expected with both hearing groups, CS+ and CS- children presented a phonological similarity effect, since they recalled phonologically dissimilar words more rapidly than phonologically similar ones. The results observed in the short-term memory task might be explained by the absence of influence of cued speech in processing strategies used by CI children. Nevertheless, cued speech might influence only the rapidity of processing implied in word span task since we observed that CS+ children recalled items as rapidly as CA children whereas CS- children recalled items as rapidly as RL children.

Our results suggest a relationship between cued speech and phonemic awareness and therefore confirm the results of previous research indicating that cued speech promotes the acquisition of phonemic representations in CI children. As suggested above, these results showed that CI children exposed to cued speech develop better identification and manipulation of phonemes than CI children who have not been exposed to cued speech. Our results showed that CS+ children obtained scores similar to those of both hearing groups, whereas CS- children were outperformed by hearing controls on the phonemic awareness task. Thus, phonological representations of CS- children are less accurate than those of

hearing children. Because we do not observe the same difficulty in CS+ children, we can think that this difficulty is not due to a lesser amount of experience with speech sounds as a result of deafness or late implantation. But when the task (word span task) implied the memorization of words, CI children performed on the basis of phonological representations, and this, regardless of exposure to cued speech. As a whole, cued speech seems to improve the phonemic processing involved in speech perception, and allows children with CI to develop abilities similar to those of hearing children.

The influence of cued speech on the use of lexical and sublexical procedures in CI children

The major characteristics of CI children's performance on the reading task can be summarized as follows. Cued speech influences the development of both lexical and sublexical procedures. CS- children recognized irregular words and pseudowords with lesser accuracy than both hearing groups, whereas CS+ children obtained scores similar to those of both hearing groups. These results indicate a deficit in the use of lexical and sublexical procedures in CI children never exposed to cued speech. Nevertheless, we observed a Lexicality effect in all four groups, suggesting that CI and hearing children used the sublexical procedure to recognize pseudowords and the lexical procedure to recognize irregular words.

These results reproduce those obtained in earlier studies with French-speaking children. In particular, Bouton, Serniclaes and Colé (in revision) showed a similar lexicality effect on response time in CI and hearing children matched for chronological age. Another study with English-speaking children also showed that CI children are able to use the sublexical procedure, since they read words and pseudowords as accurately as hearing children matched on grade level (Geers, 2003; Vermeulen, Van Bon, Schreuder, Knoors, & Snik, 2007). The success of CI children in using the lexical procedure to read regular words

was also reported by Geers (2003) and Fagan, Pisoni, Horn, and Dillon (2007), who showed that the majority of CI children obtained scores similar to those of hearing children at the same grade level and with the same chronological age, respectively.

In spite of some abilities similar to those of hearing children, CS- children recognized written items with less accuracy and rapidity than hearing groups. These results completed the findings of Leybaert et al. (2009) who showed that CS+ children obtained better accuracy scores in regular and irregular words reading than CS- children. Leybaert et al. (2009) also reported that CS+ children obtained lower scores than hearing children matched for grade level. Our findings showed that CS+ children obtained accuracy and latency scores similar to those of hearing children matched for reading level and chronological age. Taken together, these results indicate that CS- children present difficulties in using both reading procedures: they make more errors in written item recognition and read items more slowly than hearing children. These difficulties could be explained by a lower quality of phonological representations.

Relationship between reading-related skills and reading procedures

Our basic aim with the three tasks presented here was to delineate more precisely the abilities of CI children, either exposed to cued speech or not, to identify, manipulate and memorize phonemes, and to use lexical and sublexical reading procedures. Considering the fact that the sublexical procedure is an important function in reading acquisition, particularly in alphabetic writing systems (for review, see Sprenger-Charolles, Colé, & Serniclaes, 2006), the lesser efficiency with which CI children use the sublexical procedure to read pseudowords is assumed to be due to less accurate phonemic representations. Unlike hearing children, who can rely on phonemic representations in the use of the sublexical procedure (Goswami,

Ziegler, Dalton and Schneider, 2001), CI children might rely on psycholinguistic units of various sizes, including orthographic representations of whole words.

The CS- children showed a deficit in phonemic awareness and in the use of sublexical and lexical procedures, but appeared to be able to use each of these procedures to read pseudowords and irregular words, respectively. Difficulties using sublexical and lexical procedures could be explained by a lesser use of phonemic representations in reading, since CS+ children did not present these difficulties. CS+ children demonstrated phonemic awareness and reading skills similar to hearing children. Again, the pattern of results supports the view that cued speech improves the quality of phonemic representations (Colin et al., 2008; Leybaert & Charlier 1996; Leybaert & Colin, 2007). Phonemic awareness and the use of sublexical and lexical procedures depend on the quality of phonemic representations and on the ability of children to manipulate or use them in reading. Our results suggest that phonemic units are more accurately used in reading by CS+, CA and RL children than by CS- children. Obviously, CS- children were able to use the grapheme-phoneme sublexical strategy, but did so less accurately and rapidly than CS+ and hearing children. In addition, the sublexical reading procedure is seen as the bootstrapping mechanism on the basis of which the lexical (or orthographic) procedure can develop (Share, 1995, 1999; Sprenger-Charolles et al., 2003; Sprenger-Charolles et al., 1998). The development of this procedure can thus have an impact on the development of the lexical procedure. Our results suggest that this might be also the case for CI children because CS- children read irregular words with less accuracy and longer latencies than hearing children.

In conclusion, cued speech appears to improve CI children's ability to identify and manipulate phonemic units, as well as their ability to use lexical and sublexical word reading procedures. Our results thus indicate that CI children draw advantages from being exposed to cued speech. Our conclusions need to be confirmed by future studies comparing the

development of phonemic representations in CI children either exposed to cued speech or not. The finding that phonemic representations are more accurate in CS+ children would support the hypothesis that speech perception abilities mediate the relationship between phonological representations and reading skills. Thus, future research should directly compare the phonemic perception abilities and reading skills of CI children based on their exposure to cued speech. Spelling tasks of irregular words and pseudowords might be used.

References

- Alegria, J., Charlier, B., & Mattys, S. (1999). The Role of Lip-reading and Cued Speech in the Processing of Phonological Information in French-educated Deaf Children. *European Journal of Cognitive Psychology*, *11*(4), 451-472, doi:10.1080/095414499382255.
- Backman, J., Bruck, M., Hebert, M., & Seidenberg, M. (1984). Acquisition and use of spelling-sound correspondences in reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, *38*(1), 114-133, doi:10.1016/0022-0965(84)90022-5.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Review: Neuroscience*, *4*(10), 829-839, doi:10.1038/nrn1201.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Bradley, L., & Bryant, P.E. (1983). Categorizing sounds and learning to read—a causal connection. *Nature*, *301*(3), 419-421, doi:10.1038/301419a0.
- 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, doi:10.1016/j.jecp.2008.03.006.
- Bouton, S., Serniclaes, W. & Colé, P. (in revision). Sublexical and lexical processing in reading: data from French-children using cochlear implants. *Scientific Studies of Reading*.
- Bryant, P.E., & Impey, L. (1986). The similarities between normal readers and developmental and acquired dyslexics. *Cognition*, *24*, 121-137, doi:10.1016/0010-0277(86)90007-7.
- Burnham, D. (2003). Language specific speech perception and the onset of reading. *Reading and Writing: an interdisciplinary journal*, *16*(6), 573-609, doi: 10.1023/A:1025593911070.
- Casalis, S., Colé, P. Sopo, D., (2004). Morphological awareness in developmental dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *54*(1), 114-138, doi:10.1007/s11881-004-0006-z
- Charlier, B.L., & Leybaert, J. (2000). The rhyming skills of deaf children educated with phonetically augmented speechreading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, *53*(2), 349-375, doi:10.1080/713755898.
- Colin, C., Leybaert, J., Charlier, B., Mansbach, A.-L., Ligny, C., Mancilla, V., & Deltenre, P. (2008). Apport de la modalité visuelle dans la perception de la parole. *Les cahiers de l'audition*, *21*, 42-50.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, *108*, 204-256, doi:10.1037/0033-295X.108.1.204.
- Content, A., & Radeau, M. (1988). Données statistiques sur la structure orthographique du Français. *Cahiers de Psychologie Cognitive/European Bulletin of Cognitive Psychology*, *87*(Special Issues).
- Cornett, R.O. (1967). Cued Speech. *American Annals of the Deaf*, *112*, 3-13.
- Descourtieux, C., Groh, V., Rusterholtz, A., Simoulin, I., & Busquet, D. (1999). Cued speech in the stimulation of communication: an advantage in cochlear implantation.

- International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 47(2), 205-207, doi:10.1016/S0165-5876(98)00145-1.
- Descourtioux, C., & Busquet, D. (2003). TERMO, tests de réception du message oral. Paris: Ortho Edition.
- Dillon, C.M., Burkholder, R.A., Cleary, M., & Pisoni, D.B. (2004). Nonword Repetition by Children With Cochlear Implants: Accuracy Ratings From Normal-Hearing Listeners. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 47, 1003-1016, doi:10.1044/1092-4388(2004/082).
- Duchnowski, P., Lum, D., Krause, J.C., Sexton, M., Bratakos, M., Braida, L.D. (2010). "Development of Speechreading Supplements Based on Automatic Speech Recognition." Reprinted in C.J. LaSasso, K.L. Crain, J. Leybaert (Eds.), *Cued Speech and Cued Language Development of Deaf Students*, (pp. 467-486). San Diego, CA: Plural Publishing, Inc.
- Ehri, L., Nunes, R.S., Willows, D., Schuster, B.V., Yaghoub-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, doi: 10.1598/RRQ.36.3.2.
- Fagan, M.K., Pisoni, D.B., Horn, D.L., & Dillon, C.M. (2007). Neuropsychological correlates of vocabulary, reading, and working memory in deaf children with cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 12(4), 461-471, doi:10.1093/deafed/enm023.
- Fluss, J., Ziegler, J.C., Warszawski, J., Ducot, B., Richard, G. & Billard, C. (2009). Poor reading in French elementary school: the interplay of cognitive, behavioral, and socioeconomic factors. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*. 30, 206-216, doi: 10.1097/DBP.0b013e3181a7ed6c.
- Fournet, N., Juphard, A., Monnier, C., Roulin, J.-L. (2003). Phonological similarity in free and serial recall: The effect of increasing retention intervals. *International Journal of Psychology*, 38(6), 384-389, doi: 10.1080/00207590344000204.
- Frost, J., Madsbjerg, S., Niedersoe, J., Olofsson, A., & Sorensen, P.M., (2005). Semantic and phonological skills in predicting reading development: from 3-16 years of age. *Dyslexia*, 11, 72-92, doi: 10.1002/dys.292.
- Geers, A.E. (2003). Predictors of reading skill development in children with early cochlear implantation. *Ear and Hearing*, 24(1 Suppl), 59S-68S.
- Geers, A., Brenner, C., & Davidson, L. (2003). Factors associated with development of speech perception skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing*, 24(1 Suppl), 24S-35S.
- Goswami, U., Ziegler, J., Dalton, L., & Schneider, W. (2001). Pseudohomophone Effects and Phonological Recoding Procedures in Reading Development in English and German, *Journal of Memory & Language*, 45, 648-664.
- Hage, C., Alegria, J., & Perier, O. (1990). Cued Speech and language acquisition: The case of grammatical gender morpho-phonology. In D. Martin (Ed.), *Advances in cognition, education, and deafness*. Washington, DC: Gallaudet University Press.

- Hulme, C., Goetz, K., Gooch, D., Adams, J., & Snowling, M.J. (2007). Paired-associate learning, phoneme awareness, and learning to read. *Journal of Experimental Child Psychology*, 96, 150-166, doi:10.1016/j.jecp.2006.09.002.
- Hulme, C., Hatcher, P., Nation, K., Brown, A., Adams, J., & Stuart, G. (2002). Phoneme awareness is a better predictor of early reading skill than onset-rime awareness. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82(1), 2-28, doi:10.1006/jecp.2002.2670.
- Hoonhorst, I., Medina, V., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., Deltenre, P., & Serniclaes, W. (2011). Categorical perception of voicing, colors and facial expressions: A developmental study. *Speech Communication*, 53, 417-430.
- James, D., Rajput, K., Brinton, J., & Goswami, U. (2008). Phonological awareness, vocabulary, and word reading in children who use cochlear implants: does age of implantation explain individual variability in performance outcomes and growth? *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 13(1), 117-137, doi:10.1093/deafed/enm042.
- Koo, D., Crain, K., LaSasso, C., & Eden G.F. (2008) Phonological Awareness and Short Term Memory in Hearing and Deaf Individuals of Different Communication Backgrounds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145, 83-99, doi: 10.1196/annals.1416.025.
- Lachs, L., Pisoni, D., & Kirk, K. (2001). Use of audiovisual information in speech perception by prelingually deaf children with cochlear implants: a first report. *Ear and Hearing*, 22(3), 236-251.
- LaSasso, C. & Crain, K. (2010) Cued Language for the Development of Deaf Students' Reading Comprehension and Measured Reading Comprehension (Ed.), Cued Speech and Cued Language for Deaf and Hard of Hearing Children (pp. 217-241). San Diego: Plural Publishing.
- LaSasso, C., Crain, K., & Leybaert, J. (2003). Rhyme generation in deaf students: the effect of exposure to cued speech. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 8(3), 250-270, doi:10.1093/deafed/eng014.
- LaSasso, C., & Metzger, M. (1998). An alternate route to bilingualism: The home language as L1 and Cued Speech for conveying traditionally spoken languages. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 3(4), 264-289.
- Lefavrais, P. (1967). *Test de l'Alouette: Manuel [Alouette: A standardized reading test]* (Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.). Paris.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L. & Colé, P. (2004). MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 36(1), 156-166.
- Leybaert, J. (2000). Phonology acquired through the eyes and spelling in deaf children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 75(4), 291-318, doi:10.1006/jecp.1999.2539.
- Leybaert, J., Bravard, S., Sudre, S., & Cochard, N. (2009). La adquisición de la lectura y la ortografía en niños sordos con implante coclear: Efectos de la Palabra Complementada. In : M. Carillo & A.B. Dominguez (Eds). *Lineas actuales en el estudio de la lengua escrita y sus dificultades : dislexia & sordera. Libro de lecturas en honor de Jesús Alegria*. Malaga : Aljibe.

- Leybaert, J., & Charlier, B. (1996). Visual speech in the head: the effect of cued-speech on rhyming, remembering, and spelling. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, *1*(4), 234-248.
- Leybaert, J., & Colin, C. (2007). Le rôle des informations visuelles dans le développement du langage de l'enfant sourd muni d'un implant cochléaire. *Enfance*, *59*(3), 245-253, doi: 10.3917/enf.593.0245.
- Leybaert, J., Colin, C. & Hage, C. (2010). Cued speech for enhancing speech perception of individuals with cochlear implants. In C. La Sasso, K. Crain, J. Leybaert (EDS). *Cued speech and cued language for deaf and hard of hearing children*. San Diego, Californie: Plural publishing INC.
- Leybaert, J., & LaSasso, C. J. (2010). Cued speech for enhancing speech perception and first language development of children with cochlear implants. *Trends in Application*, *14*, 96-112, doi: 10.1177/1084713810375567.
- Leybaert, J., & Lechat, J. (2001). Phonological similarity effects in memory for serial order of cued speech. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *44*(5), 949-963, doi:10.1044/1092-4388(2001/074).
- Lundberg, I., Olofson, A., & Wall, S. (1980). Reading and spelling skills in the first school years predicted from phonemic awareness skills in kindergarten. *Scandinavian Journal of Psychology*, *21*, 159-173, doi: 10.1111/j.1467-9450.1980.tb00356.x.
- Medina, V., & Serniclaes, W. (2009). Consecuencias de la categorización fonológica sobre la lectura silenciosa de niños sordos con implante coclear. *Revista de Logopedia, Foniatría y Audiología*, *29*(3), 186-194.
- Moreno-Torres, I., & Torres, S. (2008). From 1-word to 2-words with cochlear implant and cued speech: a case study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, *22*(7), 491-508, doi:10.1080/02699200801899145.
- Nairne, J.S., & Kelley, M.R. (1999). Reversing the phonological similarity effect. *Memory and Cognition*, *27*, 45-53.
- Nicholls, G.H., & Ling, D. (1982). Cued Speech and the reception of spoken language. *Journal of Speech and Hearing Research*, *25*(2), 262-269.
- Perier, O., Charlier, B., Hage, C., & Alegria, J. (1988). Evaluation of the effects of prolonged cued speech practice upon the reception of spoken language. In I. Taylor (Ed.), *The education of the deaf: Current perspectives* (Vol. 1), 1985 International Congress on the Education of the Deaf. Beckenham, Kent, UK: Croom Helm, LTD, 616-628.
- Perry, C., Ziegler, J., & Zorzi, M. (2010). Beyond single syllables: Large-scale modeling of reading aloud with the Connectionist Dual Process (CDP++) model. *Cognitive Psychology*, *24*, 106-151, doi:10.1016/j.cogpsych.2010.04.001.
- Raven, J. (1947). *Coloured Progressive Matrices* (Lewis.). London.
- Rouger, J., Lagleyre, S., Fraysse, B., Deneve, S., Deguine O., & Barone, P. (2007). Evidence that cochlear-implanted deaf patients are better multisensory integrators. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(17), 7295-7300, doi: 10.1073/pnas.0609419104.
- Savage, R., & Carless, S. (2005). Phoneme manipulation not onset-rime manipulation ability is a unique predictor of early reading. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, *46*, 1297-1308, doi: 10.1111/j.1469-7610.2005.01436.x.

- Share, D.L. (1995) Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55, 151-218, doi:10.1016/0010-0277(94)00645-2.
- Share, D.L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: A direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72(2), 95-129, doi:10.1006/jecp.1998.2481.
- Snowling, M.J. (2001). From language to reading and dyslexia. *Dyslexia (Chichester, England)*, 7(1), 37-46, doi: 10.1002/dys.185.
- Spencer, L.J., & Tomblin, J.B. (2009). Evaluating phonological processing skills in children with prelingual deafness who use cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14(1), 1-21, doi:10.1093/deafed/enn013.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchenec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). Lecture et compétences reliées: Données normatives pour la fin de la 1ère, 2nde, 3ème et 4ème année du primaire issues d'une nouvelle batterie de tests, EVALEC. *European Review of Applied Psychology/Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 55(3), 157-186, doi:10.1016/j.erap.2004.11.002.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Kipffer-Piquard, A., Pinton, F., & Billard, C. (2009). Reliability and prevalence of an atypical development of phonological skills in French-speaking dyslexics. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 22(7), 811-842, doi: 10.1007/s11145-008-9117-y.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2006). *Reading acquisition and developmental dyslexia*. London, UK: Psychology Press.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S., Béchenec, D., & Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: a four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84(3), 194-217, doi:10.1016/S0022-0965(03)00024-9.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S., & Bonnet, P. (1998). Reading and spelling acquisition in French: the role of phonological mediation and orthographic factors. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68(2), 134-165, doi:10.1006/jecp.1997.2422.
- Stanovich, K., Cunningham, A., & Cramer, B. (1984). Assessing phonological awareness in kindergarten children: Issues of task comparability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38, 175-190, doi:10.1016/0022-0965(84)90120-6.
- Torres, S., Rodriguez, J.M., Garcia-Orza, J., Calleja, M. (2008). Reading Comprehension of an Inferential Text by Deaf Students with Cochlear Implants Using Cued Speech. *The Volta Review*, 108(1), 37-59.
- Tye-Murray, N., Spencer, L., & Gilbert-Bedia, E. (1995). Relationships between speech production and speech perception skills in young cochlear-implant users. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2454-2460.
- Uchanski, R. M. Delhorne, L. A., Dix, A. K., Braid, L. D., Reed, C. M., and Durlach, N. I. (1994) Automatic speech recognition to aid the hearing impaired: Prospects for the automatic generation of cued speech, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 31(1), p. 20-41.
- Vermeulen, A.M., van Bon, W., Schreuder, R., Knoors, H., & Snik, A. (2007). Reading comprehension of deaf children with cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 12(3), 283-302, doi:10.1093/deafed/enm017.

- Vieu, A., Mondain, M., Blanchard, K., Sillon, M., Reuillard-Artieres, F., Tobey, E., et al. (1998). Influence of communication mode on speech intelligibility and syntactic structure of sentences in profoundly hearing impaired French children implanted between 5 and 9 years of age. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, *44*(1), 15-22, doi:10.1016/S0165-5876(98)00031-7.
- Waters, G.S., Seidenberg, M.S., & Bruck, M. (1984). Children's and adults' use of spelling-sound information in three reading tasks. *Memory & Cognition*, *12*(3), 293-305.
- Watkins, M.J., Watkins, O.C., & Crowder, R.G. (1974). The modality effect in free and serial recall as a function of phonological similarity. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *13*, 430-447, doi:10.1016/S0022-5371(74)80021-6.
- Willems, P., & Leybaert, J. (2009). Phonological short-term memory in deaf children fitted with a cochlear implant: effects of phonological similarity, word length and lipreading cues. *Revista de Logopedia, Foniatria y Audiologia*, *29*(3), 174-185.
- Ziegler, J. C., Castel, C., Pech-Georgel, C., George, F., Alario, F. X., & Perry, C. (2008). Developmental Dyslexia And The Dual Route Model Of Reading: Simulating Individual Differences and Subtypes. *Cognition*, *107*, 151-178, doi:10.1016/j.cognition.2007.09.004.
- Ziegler, J. C., Pech-Georgel, C., George, F., & Lorenzi, C. (2009). Speech-perception-in-noise deficits in dyslexia. *Developmental Science*, *12*, 732-745, doi: 10.1111/j.1467-7687.2009.00817.x.

PARTIE 3.
DISCUSSION GÉNÉRALE

Discussion générale

L'objectif initial de cette thèse visait à préciser le développement de certaines compétences langagières orale et écrite des enfants sourds munis d'un implant cochléaire. Une des compétences fondamentales du développement langagier est la perception des sons de parole en unités phonémiques (phonèmes ou traits) puisqu'elle permet l'acquisition du lexique, de la syntaxe et le développement de la compréhension orale. Il est important d'étudier la capacité à percevoir les phonèmes puisqu'elle conditionne également les compétences des enfants à apprendre à lire. Développer des représentations phonémiques bien spécifiées est une condition essentielle à la réussite en lecture (Bradley & Bryant, 1983 ; Bryant, MacLean, Bradley, & Crossland, 1990 ; Lundberg, Olofson & Wall, 1980 ; Mann & Liberman, 1984) puisque la qualité des représentations phonémiques conditionnent le développement des habiletés associées à la réussite en lecture (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique), ainsi que les traitements phonologiques et par voie de conséquence les traitements orthographiques impliqués dans la reconnaissance des mots écrits. Nous avons donc évalué les performances de perception de la parole des enfants implantés avec pour objectif de préciser leur influence sur les compétences de reconnaissance des mots écrits.

La perception des sons de parole chez les enfants munis d'un implant cochléaire est contrainte par deux facteurs principaux. D'une part, le développement du langage chez l'enfant implanté est caractérisé par une période de privation auditive. D'autre part, les informations acoustiques transmises par l'implant cochléaire sont dégradées lors de la transduction et la transmission des sons de parole au système nerveux par rapport à une perception auditive par l'oreille. L'un des objectifs de cette thèse consistait donc à évaluer l'influence de ces deux facteurs sur la perception de la parole. Le second objectif de cette

thèse était d'étudier le développement des habiletés associées à la réussite en lecture et le développement de la reconnaissance des mots écrits. Parce que l'acquisition de la lecture dépend de la capacité à percevoir les sons de parole en phonèmes, nous avons voulu déterminer si les enfants munis d'un implant cochléaire avaient développé des capacités de perception phonémique similaires à celles des enfants normo-entendants. La discussion de cette thèse confronte les observations principales obtenues au travers des cinq études réalisées sur ces questions.

1. Perception des sons de parole chez les enfants munis d'un implant cochléaire

Les recherches sur la perception des sons de parole chez le sujet normo-entendant envisagent un modèle à trois niveaux de traitement (acoustique, phonémique, lexical) pour identifier précisément les phonèmes (Serniclaes, 2000 ; Ramus, Peperkamp, Christophe, Jacquemot, Kouider, et Dupoux, 2010). Plus précisément, l'enfant normo-entendant extrait les indices acoustiques du signal de parole pour les intégrer et les associer aux traits articulatoires qui lui permettront d'identifier les phonèmes. Les informations lexicales présentes dans le signal de parole influencent également l'identification des phonèmes contenus dans les mots.

Les deux premières études (chapitres 4 et 5) ont permis d'évaluer les compétences des enfants implantés à percevoir les sons de parole et plus particulièrement leurs compétences à mettre en œuvre les niveaux de traitement phonémique et lexical. L'évaluation des capacités de discrimination et d'identification de paires minimales a permis de mettre en évidence d'une part si les sons de parole sont perçus avec la même précision par les enfants implantés et les enfants normo-entendants, et d'autre part si les mécanismes utilisés par les enfants implantés pour percevoir les sons de parole sont différents de ceux mis en œuvre par les enfants normo-entendants. Les paragraphes suivants présentent des arguments qui

suggèrent que les difficultés à percevoir les sons de parole concernent la précision perceptive mais non la nature des mécanismes mis en œuvre.

Dans le chapitre 4, nous avons évalué les compétences des enfants implantés à percevoir les sons de parole de manière catégorielle en déterminant leurs capacités à identifier et à discriminer les phonèmes. Les résultats de cette expérience ont montré que les enfants implantés perçoivent moins précisément les phonèmes que les enfants normo-entendants puisqu'ils font plus d'erreurs d'identification et de discrimination de phonèmes que les enfants contrôles. Ces difficultés à percevoir précisément les phonèmes varient également en fonction des traits phonémiques testés. Pour les traits consonantiques, les enfants implantés perçoivent les traits de mode et de voisement plus précisément que les traits de lieu d'articulation et de nasalité. Pour les traits vocaliques, les traits d'aperture et d'antériorité sont perçus plus précisément que le trait de nasalité. Néanmoins, quelque soit le trait phonémique considéré, les enfants implantés et normo-entendants mettent en œuvre des traitements catégoriels similaires pour percevoir les phonèmes.

Percevoir les sons de parole de manière catégorielle est une compétence qui s'acquière dès les premiers mois de vie par exposition à la langue maternelle (Chapitre 2). Des études récentes (Hoonhorst, Colin, Markessis, Radeau, Deltenre, & Serniclaes, 2009b) montrent que les nourrissons francophones de moins de six mois discriminent les stimuli d'un continuum /də/-/tə/ selon les frontières phonémiques universelles alors que les nourrissons de plus de huit mois sont sensibles à la frontière phonologique adulte, spécifique au français. De manière plus générale, la capacité à discriminer de manière catégorielle les sons de parole s'acquière par exposition au langage avant l'âge d'un an chez l'enfant normo-entendant (Kuhl, 2004). Cette période pourrait donc correspondre à une phase critique ou sensible du développement langagier. Cependant, nos résultats indiquent que les enfants sourds profonds congénitaux et implantés entre 1;6 et 3;6 ans ont acquis des capacités à percevoir les sons de

parole de manière catégorielle. Par conséquent, l'émergence du traitement catégoriel des sons de parole ne nécessiterait pas que l'individu soit soumis à une stimulation spécifique à un âge relativement précis. La première année de vie pourrait ne pas correspondre à une période critique ou sensible de l'acquisition du processus de perception catégorielle des phonèmes et ce traitement pourrait donc s'acquérir plus tard, lorsque l'enfant sourd est soumis à une stimulation auditive.

Par ailleurs, les analyses des scores de discrimination et d'identification ont montré que les enfants implantés ne perçoivent pas les phonèmes avec la même précision que les enfants normo-entendants. Ces difficultés pourraient s'expliquer par la présence d'une période de privation auditive, et/ou par la transmission dégradée des signaux acoustiques par l'implant cochléaire. Alors que la période de privation auditive pourrait ne pas correspondre à une période sensible pour l'acquisition du processus de perception catégorielle, elle pourrait correspondre à une période sensible de la précision catégorielle. Subir une période de privation auditive durant les premiers mois de vie semble donc influencer la capacité à développer des représentations phonémiques précises. Néanmoins, les difficultés à percevoir précisément les phonèmes pourraient également provenir du fait que les indices acoustiques caractérisant les traits phonémiques sont dégradés par la transmission avec l'implant cochléaire par rapport à une transmission par l'oreille ordinaire. Les précédentes études sur la transmission des indices acoustiques par l'implant cochléaire ont montré que ce dispositif transmet les indices d'enveloppe temporelle de façon dégradée mais ne transmet pas les indices de structure temporelle fine (Fu & Shannon, 2000 ; Chen & Zeng, 2004 ; Stickney, Zeng, Litovsky & Assmann, 2004). Les résultats présentés dans le chapitre 4 montrent que les traits consonantiques de mode et de voisement sont perçus plus précisément par les enfants implantés que les traits de lieu d'articulation et de nasalité. Parce que les indices acoustiques qui caractérisent majoritairement le mode et le voisement sont des indices d'enveloppe

temporelle alors que les indices acoustiques qui caractérisent majoritairement le lieu d'articulation et la nasalité sont des indices de structure temporelle fine, les résultats mettent en évidence une relation entre les difficultés des enfants implantés à percevoir les traits phonologiques et les difficultés de l'implant cochléaire à transmettre les indices acoustiques du signal de parole. La qualité de l'implant cochléaire à coder les indices acoustiques serait donc impliquée dans la précision à percevoir les sons de parole. Cette interprétation est d'ailleurs soutenue par l'observation des compétences des enfants implantés à percevoir les traits vocaliques. Nos résultats indiquent en effet que le trait de nasalité est plus difficilement perçu que les traits d'aperture et d'antériorité. Les traits vocaliques se différencient par leur résolution spectrale puisque la difficulté à percevoir les traits vocaliques varie en fonction du codage neural des formants. Alors que le trait de nasalité est transmis par des formants de très basse fréquence (dans la région de F1 bas), le trait d'aperture est transmis par les formants de basse et moyenne fréquence (dans la région de F1 et F2 bas) et le trait d'antériorité dépend de l'énergie des hautes fréquences (dans les régions de F2 et F3) (Calliope, 1989 ; Delvaux, 2009). Ces différences peuvent être la conséquence de l'insertion non optimale des électrodes (Harnsberger Svirsky, Kaiser, Pisoni, Wright & Meyer, 2001). Une profondeur d'insertion non suffisante peut entraîner une absence de stimulation des basses fréquences sur le nerf auditif. Les résultats de la première expérience tendent donc à montrer que les difficultés à percevoir précisément les sons de parole proviennent des particularités techniques de transmission des indices acoustiques par l'implant cochléaire.

Les résultats de la seconde étude présentée dans cette thèse (chapitre 5) vont également dans ce sens. Nous avons manipulé l'influence des informations lexicales sur la capacité à discriminer les sons de parole. Les enfants ont réalisé une tâche de discrimination de paires minimales de mots ou de pseudo-mots qui se différencient uniquement en fonction d'un trait phonémique. Nous avons comparé les performances des enfants à discriminer les

différents phonèmes lorsqu'ils composent un mot ou un pseudo-mot. Les résultats ont montré que les enfants implantés ne perçoivent pas les phonèmes compris dans des mots et des pseudo-mots avec la même précision que les enfants normo-entendants. Néanmoins, tant les enfants implantés et que les normo-entendants discriminent les phonèmes plus précisément lorsqu'ils sont contenus dans des mots que lorsqu'ils le sont dans des pseudo-mots et la taille de cet « effet de lexicalité » est similaire dans les deux groupes.

De précédentes études ont mis en évidence, chez les personnes normo-entendantes, que les informations lexicales associées au signal de parole favorisent l'identification des phonèmes contenus dans les mots (Pour une revue, voir Ramus, Peperkamp, Christophe, Jacquemot, Kouider, et Dupoux, 2010). Notre étude a donc permis de mettre en évidence que l'influence des connaissances lexicales sur la perception des sons de parole est similaire pour les enfants normo-entendants et les enfants implantés. Ces résultats confortent l'interprétation proposée dans le chapitre 4. Tout comme la similitude des performances de perception catégorielle pour les enfants implantés et contrôles, la similitude des effets lexicaux suggère que les enfants implantés mettent en œuvre des processus de perception des phonèmes de nature semblable à ceux des enfants normo-entendants. Nous avons également répliqué les résultats du chapitre 4 en montrant que les traits phonologiques ne sont pas perçus avec la même précision par les enfants normo-entendants et les enfants implantés. Avec un matériel non lexical, nous avons également mis en évidence que les traits consonantiques de mode et de voisement sont mieux perçus que ceux de lieu d'articulation et de nasalité, et que les traits vocaliques d'antériorité et d'aperture sont mieux perçus que celui de nasalité. Comme dans le chapitre 4, nous pouvons interpréter ces résultats en fonction des indices acoustiques transmis par l'implant cochléaire.

En résumé, les résultats des expériences des chapitres 4 et 5 suggèrent que la période de privation auditive ne correspond pas à une période critique du développement langagier

puisque les enfants implantés sont capables d'acquérir, après implantation, des mécanismes impliqués dans la perception des sons de parole. Les enfants implantés mettent en œuvre des traitements similaires à ceux utilisés par les enfants normo-entendants. En effet, les enfants implantés sont capables de catégoriser les sons de parole de manière aussi que cohérente les normo-entendants, comme l'attestent leurs performances de perception catégorielle, et d'utiliser leurs connaissances lexicales pour percevoir les sons de parole. Le fait que ces mécanismes soient utilisés moins efficacement par les enfants implantés, comme l'atteste la moindre précision de leurs percepts phonémiques, pourrait s'expliquer par les modalités de transmission des indices acoustiques par l'implant cochléaire et/ou par le fait que la période de privation auditive corresponde à une période sensible du développement langagier. Néanmoins, comme les difficultés se concentrent uniquement sur la précision de la perception et non pas sur la nature des traitements impliqués, et que la précision de la perception des traits phonémiques varie en fonction des indices acoustiques transmis par l'implant, nous pouvons supposer que l'interprétation en terme de dégradation des signaux acoustiques par l'implant cochléaire par rapport à la parole naturelle est plus adaptée qu'une interprétation en terme de correspondance entre une période sensible du développement langagier et la période de privation auditive.

Les résultats des études présentées dans les chapitres 4 et 5 ont mis en évidence qu'en dépit de capacités à mettre en œuvre des traitements de perception des sons de parole similaires à ceux des enfants normo-entendants (perception catégorielle et influence des représentations lexicales), la précision des représentations phonémiques est déficitaire. Parce que des représentations phonémiques bien spécifiées sont nécessaires au développement des habiletés associées à la réussite en lecture (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique) et des procédures de reconnaissance des mots écrits, nous pouvons penser que les enfants implantés présenteront des difficultés à apprendre à lire. En effet, des

représentations phonémiques mal spécifiées peuvent entraîner un retard d'acquisition de la lecture (Fowler, 1991). Dans la seconde partie de cette thèse, nous avons donc évalué les compétences en lecture des enfants implantés.

2. Reconnaissance des mots écrits chez les enfants munis d'un implant cochléaire

Trois études (présentées dans les chapitres 6, 7, et 8), ont permis d'évaluer les capacités des enfants implantés à reconnaître les mots écrits. L'objectif était de préciser de manière indirecte la relation entre les compétences de perception des sons de parole et la reconnaissance des mots écrits. Pour cela, nous avons évalué les habiletés associées à la réussite en lecture, les compétences à mettre en œuvre les procédures sous-lexicale et lexicale de lecture, l'automatisme de l'activation des représentations phonologiques au cours de la reconnaissance des pseudo-mots écrits, et l'influence de la Langue Parlée Complétée sur le développement des habiletés associées à la réussite en lecture et le développement des procédures de reconnaissance des mots écrits.

2.1. Habiletés associées à la réussite en lecture chez les enfants munis d'un implant cochléaire

Apprendre à lire nécessite l'acquisition de compétences langagières orales. Plus particulièrement, pouvoir mettre en œuvre la procédure sous-lexicale de lecture engage des capacités de perception phonémique et de mémoire à court terme phonologique. Dans le chapitre 6, nous avons réalisé une première investigation au travers de cinq études de cas qui ont permis d'évaluer les habiletés associées à la lecture (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique) et les habiletés à reconnaître les mots écrits. Les résultats ont montré un déficit à identifier, manipuler et mémoriser les phonèmes chez les enfants implantés. Selon la relation existant entre conscience phonémique, mémoire à court terme phonologique et reconnaissance des mots écrits, nous avons supposé que les difficultés en

conscience phonémique et en mémoire à court terme phonologique des enfants implantés devraient entraîner des difficultés à reconnaître les mots écrits. Les résultats de ces cinq études de cas mettent en évidence que les enfants implantés reconnaissent les pseudo-mots et les mots réguliers aussi précisément et aussi rapidement que les enfants normo-entendants de même niveau de lecture. De plus, comme attendu pour les enfants normo-entendants, les mots réguliers sont lus par la procédure lexicale alors que les pseudo-mots sont lus par la procédure sous-lexicale. Malgré un déficit de conscience phonémique et de mémoire à court terme phonologique, les enfants implantés sont donc capables de développer et d'utiliser la procédure sous-lexicale. Ils sont capables de traduire la séquence de graphèmes d'un mot écrit en une séquence de phonèmes en utilisant les correspondances graphème-phonème. La procédure sous-lexicale joue un rôle central dans l'apprentissage de la lecture et plus particulièrement dans la formation du lexique orthographique. Il semble que la procédure sous-lexicale utilisée par les enfants implantés soit suffisamment efficace pour permettre à l'enfant de développer la procédure lexicale. Les cinq enfants implantés testés dans ces études de cas sont en effet capables de recourir à la procédure lexicale pour reconnaître les mots réguliers écrits. Néanmoins, quatre enfants implantés sur cinq présentent des difficultés à reconnaître précisément les mots irréguliers. Ils reconnaissent les mots irréguliers avec moins de précision que les enfants contrôles puisqu'ils semblent les reconnaître par la procédure sous-lexicale, ce qui entraîne des erreurs de régularisation. L'ensemble de ces résultats suggèrent que les difficultés observées pour la lecture de mots irréguliers pourraient s'expliquer par le fait que les enfants implantés ont besoin d'être confrontés aux mots irréguliers écrits à une fréquence plus élevée que les enfants normo-entendants. On peut donc supposer que les enfants implantés mémorisent moins efficacement les représentations orthographiques des mots écrits que les enfants normo-entendants.

Cette première expérience sur la lecture questionne la relation existant entre perception des sons de parole et lecture chez l'enfant implanté. En effet, en raison des difficultés à percevoir précisément les phonèmes (chapitres 4 et 5) et à manipuler et mémoriser les phonèmes (chapitre 6), nous aurions dû observer un déficit plus important de mise en œuvre des deux procédures de reconnaissance des mots écrits (pour les relations entre troubles de lecture et précision perceptive, conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique, voir respectivement : Ziegler, Pech-Georgel, George, Alario & Lorenzi, 2005 ; Ramus & Szenkovits, 2008). Leurs représentations phonémiques moins précisément spécifiées que celles des enfants normo-entendants semblent être la cause des difficultés observées en conscience phonémique et en mémoire à court terme phonologique. Néanmoins, ces difficultés ne semblent pas se répercuter sur la capacité à reconnaître les mots écrits par établissement des correspondances grapho-phonologiques. Par contre, le fait que les enfants implantés ne présentent pas de déficit de perception catégorielle peut expliquer leurs bonnes performances de lecture (Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carré & Démonet, 2001).

2.2. Procédures de lecture chez les enfants munis d'un implant cochléaire

Dans le chapitre 7, nous avons complété la précédente étude en évaluant les compétences de 25 enfants implantés à reconnaître des pseudo-mots et des mots irréguliers écrits. Les résultats indiquent que les enfants implantés reconnaissent aussi rapidement les items écrits (mots irréguliers et pseudo-mots) que les enfants normo-entendants mais qu'ils sont déficitaires dans la précision de la reconnaissance. Contrairement aux résultats présentés dans le chapitre 6 et dans la littérature (Geers, 2003 ; Vermeulen, van Bon, Schreuder, Knoors, & Snik, 2007 ; Fagan, Pisoni, Horn & Dillon, 2007), les résultats du chapitre 7 indiquent que les 25 enfants implantés présentent des difficultés à reconnaître précisément les pseudo-mots. De nombreux aspects diffèrent entre ces expériences. Tout d'abord, la méthode

utilisée pour coder les réponses correctes des participants peut permettre d'interpréter ces différences. En effet, dans l'étude présentée dans le chapitre 7, nous utilisons des juges indépendants qui ont peu d'expérience avec les enfants implantés et qui ne sont donc pas habitués à leurs productions. Les juges estiment la qualité des productions des enfants implantés et cette méthode peut être plus sévère que lorsque l'expérimentateur juge lui-même les productions des enfants testés. De plus, les analyses réalisées dans le chapitre 6 ainsi que celles effectuées par Geers (2003) et Fagan et al. (2007) consistent à estimer si les scores des enfants implantés sont compris dans la norme définie par les scores des enfants normo-entendants (z-scores). Au contraire, dans le chapitre 7, nous avons réalisé une ANOVA qui compare les scores d'un groupe d'enfants implantés à ceux d'un groupe d'enfants normo-entendants, ce qui nous a permis de tester plus directement les différences entre les performances moyennes des deux groupes. Ces différences méthodologiques peuvent expliquer que les résultats du chapitre 7 mettent en évidence un déficit en lecture alors que les précédentes études ont mis en évidence des résultats similaires entre enfants normo-entendants et enfants implantés.

Les résultats présentés dans le chapitre 7 indiquent que les enfants implantés ont des difficultés à recourir précisément aux deux procédures de lecture. Parce que la procédure lexicale se développe sur la base des habiletés à recourir à la procédure sous-lexicale, il est important de déterminer la cause des difficultés à mettre en œuvre la procédure sous-lexicale. L'objectif de cette étude a donc été de définir les difficultés des enfants à recourir précisément à la procédure sous-lexicale. Nous avons évalué les compétences des enfants à activer automatiquement les représentations phonologiques au cours de la reconnaissance des pseudo-mots écrits. En utilisant une tâche de décision lexicale qui permet de mettre en évidence un effet de pseudo-homophonie, nous avons pu montrer que les enfants implantés et normo-entendants activent les représentations phonologiques des mots écrits de façon

automatique. Néanmoins, les enfants implantés activent les représentations phonologiques de manière moins automatique que les enfants normo-entendants. Ainsi, les enfants implantés ont besoin de plus de ressources attentionnelles pour reconnaître les mots écrits par la procédure sous-lexicale que les enfants normo-entendants (Ruthruff, Allen, Lien, & Grabbe, 2008). Ces difficultés d'automatisation de la procédure sous-lexicale peuvent influencer la mise en œuvre de la procédure lexicale et justifier le déficit de précision en lecture des enfants implantés.

En résumé, le chapitre 7 a permis de mettre en évidence des résultats fondamentaux. Nous avons montré que les enfants implantés ont des difficultés à reconnaître précisément les items écrits (pseudo-mots et mots irréguliers) et que l'activation des représentations phonologiques au cours de la lecture est moins automatique. Ces résultats peuvent permettre d'établir la relation entre les compétences en lecture et les difficultés à percevoir précisément les phonèmes qui ont été mis en évidence dans les chapitres 4 et 5. Nous observons que les compétences des enfants implantés à reconnaître les mots écrits impliquent des traitements similaires à ceux utilisés par les enfants normo-entendants mais l'utilisation de ces traitements est moins efficace que chez les enfants normo-entendants. Le pattern de résultats en perception des sons de parole est similaire à celui mis en évidence en lecture. Les résultats montrent que les enfants implantés recourent à des mécanismes (perception catégorielle, utilisation des informations lexicales, utilisation des procédures lexicale et sous-lexicale) similaires à ceux des enfants normo-entendants mais moins efficacement que les enfants normo-entendants. Ces résultats suggèrent également que les difficultés observées en perception des sons de parole et en reconnaissance des mots écrits auraient pour cause des représentations phonémiques insuffisamment spécifiées.

Les études sur la dyslexie montrent qu'une partie des enfants dyslexiques présentent également un déficit de traitement phonologique lors de la reconnaissance des mots écrits. Ce

déficit est associé à des difficultés en conscience phonémique, en dénomination rapide (de couleurs, d'images, de chiffres, de lettres) et en mémoire à court terme phonologique (Snowling, 2001; Sprenger-Charolles Colé, Lacert, & Serniclaes, 2000; Wimmer, 1993, 1996; Ziegler & Goswami, 2005). Il en résulte de grandes difficultés pour utiliser les correspondances grapho-phonologiques lors de la lecture de mots inconnus ou de pseudo-mots. Une autre propriété phonologique est déficitaire chez les enfants dyslexiques : ils présentent un déficit de perception catégorielle pour les traits phonologiques (pour une revue, voir Bogliotti, Serniclaes, Messaoud-Galusi, and Sprenger-Charolles, 2008). Ce déficit de perception catégorielle correspond au fait que les dyslexiques discriminent les sons entre les frontières allophoniques à l'intérieur d'une même catégorie phonémique, un fait qui a d'importantes implications pour l'acquisition de correspondances graphème-phonème et donc pour le développement de la procédure sous-lexicale de lecture (Serniclaes, Van Heghe, Mousty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004 ; Bogliotti et al., 2008 ; Dufor, Serniclaes, Sprenger-Charolles, & Démonet, 2009). La perception allophonique, et de manière plus générale le déficit de perception catégorielle, est spécifique à la dyslexie et ne s'observe pas chez les enfants munis d'un implant cochléaire. Les preuves convergentes issues de notre étude et d'autre étude récente comparant les enfants implantés et les enfants normo-entendants de même âge audio-perceptif indiquent que les enfants implantés ne présentent pas de déficit de perception catégorielle (Medina & Serniclaes, 2009; Chapitre 4). Les enfants implantés sont donc différents des enfants dyslexiques sur ce point. Les enfants dyslexiques présentent un déficit de perception catégorielle et de précision alors que les enfants implantés ne présentent que des difficultés de précision. Alors que le déficit de perception catégorielle observé chez les dyslexiques est associé à un déficit de précision et de rapidité du recours aux procédures sous-lexicale et lexicale de lecture, la présence d'un déficit de précision catégorielle chez les enfants implantés est associée à un recours aux procédures lexicale et

sous-lexicale moins précis par rapport aux enfants normo-entendants. Le déficit de précision catégorielle des enfants implantés ne semble pas influencer la nature des traitements impliqués dans la reconnaissance des mots écrits. Seule la précision des traitements impliqués semble dépendre de la précision catégorielle.

2.3. Influence de la Langue Parlée Complétée sur l'acquisition des représentations phonémiques chez les enfants munis d'un implant cochléaire

La cinquième étude de cette thèse (Chapitre 8) avait pour objectif d'étudier l'influence d'une exposition précoce et intensive à la Langue Parlée Complétée (LPC) sur la lecture. La LPC constitue une aide possible à la perception de la parole chez l'enfant sourd. En effet, le signal de parole fourni par les signaux labiaux est ambigu. Les sons /m/, /p/, et /b/ sont par exemple prononcés par le même geste labial. La LPC utilise un système de signaux visuels produits avec la main positionnée près de la bouche lorsqu'on parle. Ces signaux, combinés avec l'information vue sur les lèvres, ont pour but de produire un message phonologique non ambigu. Cette aide manuelle permet donc à l'enfant sourd de percevoir l'intégralité des contrastes phonémiques qui composent sa langue. Ainsi, parce que les enfants exposés à la LPC acquièrent des représentations phonémiques mieux spécifiées que les enfants non exposés à la LPC (en français, Alegria, Charlier, & Mattys, 1999 ; Charlier & Leybaert, 2000; Hage, Alegria, & Perier, 1990 ; LaSasso, Crain, & Leybaert, 2003 ; Perier, Charlier, Hage, & Alegria, 1988 ; Leybaert & Charlier, 1996 ; Charlier & Leybaert, 2000 ; LaSasso, Crain, & Leybaert, 2003 ; Leybaert & LaSasso, 2010 ; en anglais, Nicholls & Ling, 1982 ; Uchanski, Delhorne, Dix, Braid, Reed, & Durlach, 1994 ; Crain & LaSasso, 2010 ; LaSasso & Metzger, 1998 ; Koo, Crain, LaSasso, & Eden, 2008), nous pouvons supposer que cette différence de compétences langagières orales se répercutera sur l'apprentissage de la lecture. Nous avons vérifié cette hypothèse en comparant les performances de deux groupes d'enfants implantés (exposés ou non à la LPC) à deux groupes contrôles d'enfants normo-

entendants (groupe de même âge chronologique et groupe de même niveau de lecture). Nous avons évalué les habiletés associées à la réussite en lecture (conscience phonémique et mémoire à court terme phonologique) et les performances en lecture (recours aux procédures lexicale et sous-lexicale de lecture). Les résultats de cette étude ont montré une influence de l'exposition à la LPC sur les performances de conscience phonémique et de lecture (pour le recours aux procédures lexicale et sous-lexicale) mais pas d'impact sur les compétences de mémoire à court terme phonologique. Plus précisément, les tâches de lecture montrent que les enfants exposés à la LPC lisent les pseudo-mots et les mots irréguliers aussi précisément et rapidement que les deux groupes contrôles alors que les enfants non exposés à la LPC lisent ces mêmes mots avec moins de précision et de rapidité que les enfants normo-entendants et les enfants exposés à la LPC. Bien que la LPC influence la qualité de l'utilisation des procédures de lecture, elle n'aurait pas d'impact sur la nature des traitements impliqués en lecture : quel que soit le groupe, les enfants reconnaissent les pseudo-mots avec la procédure sous-lexicale et les mots irréguliers avec la procédure lexicale. Par conséquent, cette étude montre que les enfants exposés précocement et intensivement à la LPC sont meilleurs que les enfants non exposés à la LPC pour réaliser un traitement phonologique des mots. L'ensemble de ces résultats suggère donc que l'amélioration de la qualité des représentations phonémiques des enfants implantés permet d'acquérir de meilleures compétences en lecture et en conscience phonémique. Les difficultés principalement observées chez les enfants implantés pourraient donc être atténuées en proposant une aide à la structuration de leurs représentations phonémiques, telle que l'utilisation précoce et intensive de la LPC.

3. Perspectives de recherche

3.1. Etude de la correspondance entre signaux acoustiques et phonémiques

Pour approfondir la connaissance des bases acoustiques qui sous-tendent la perception des phonèmes, il est important de déterminer et de comparer les signaux acoustiques de parole naturelle et les signaux acoustiques fournis par l'implant cochléaire (pour une approche similaire, cf. Serniclaes et collaborateurs, 1996, 1998, 2002). Dans cette future étude, nous proposons d'évaluer les différentes stratégies de codage (SPEAK, ACE et CIS) par le Nucleus 24M qui est l'implant le plus fréquemment utilisé chez les enfants implantés. L'approche consiste à évaluer les effets de ces différentes stratégies sur la transmission des traits phonémiques par l'implant ce qui permet d'établir des relations spécifiques entre le codage de la parole dans l'implant et ses conséquences perceptives. En mettant en évidence les effets des changements de stratégie de codage sur les corrélats électrophysiologiques des unités phonologiques minimales (les traits) on disposera d'une heuristique permettant de sélectionner la stratégie la plus adaptée dans un ensemble très large de possibilités (vu le très grand nombre de combinaisons possibles des paramètres de réglage de l'implant).

Les différents traits phonémiques du français, contenus dans une syllabe CV, peuvent être caractérisés en utilisant un spectrogramme pour le signal de parole naturelle et une représentation équivalente pour le signal de parole fourni par l'implant cochléaire. Par exemple, pour l'implant Digisonic, le « digigramme » fournit des représentations énergie-temps-fréquence du son équivalentes à celles d'un spectrogramme. Alors que l'énergie est représentée par la noirceur du tracé sur le spectrogramme, elle est représentée par la grandeur d'un trait pour chaque bande de fréquences sur le digigramme (exemples d'un spectrogramme et d'un digigramme en Figure 1 a et b respectivement).

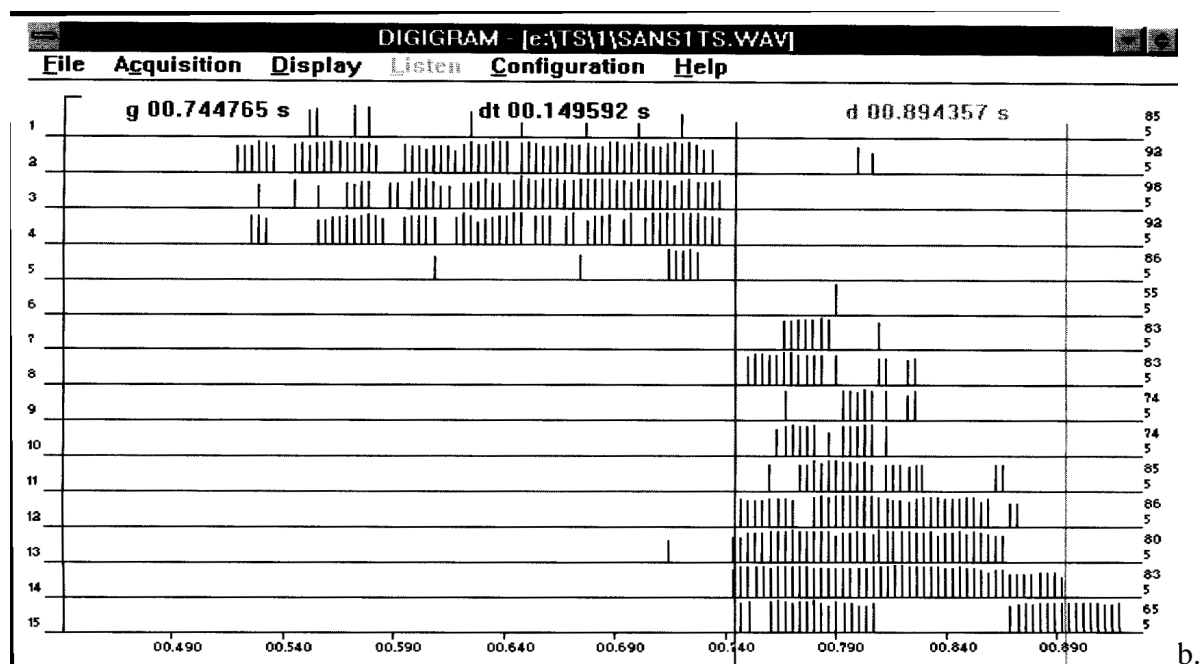
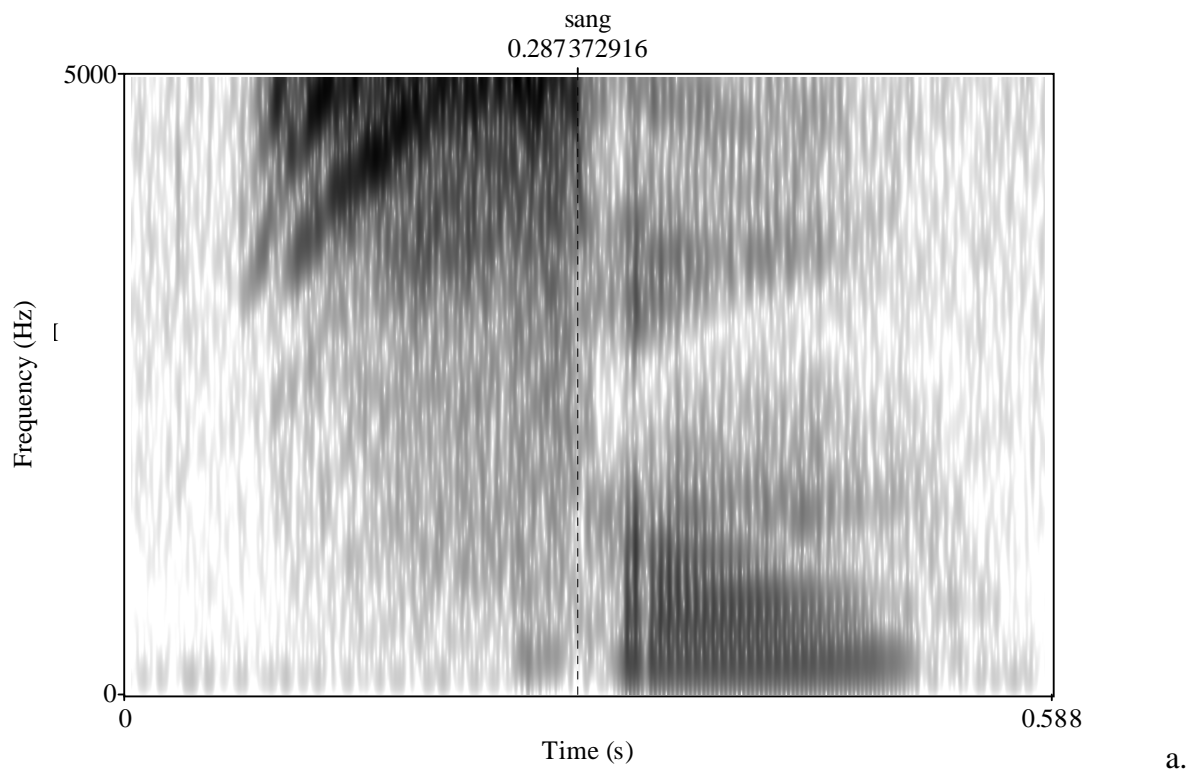


Figure 1. a. Spectrogram du mot « sang ». b. Digigramme du mot « sang ».

Le spectrogramme et le digigramme permettent donc de préciser les caractéristiques énergie-temps-fréquence pour chaque syllabe CV. Sur la base de représentations de ce type, nous réaliserons une évaluation objective basée sur la classification automatique des sons de parole naturelle et des sons de parole fournis par l'implant (pour une étude de faisabilité et de

validation partielle cf., Serniclaes, De Guchteneere, Secqueville, Bachelot, Genin, Meyer, & Chouard, 1996). Les résultats obtenus correspondront aux pourcentages de classifications correctes des différents traits vocaliques et consonantiques. L'analyse des patterns d'erreurs permettra de proposer des modifications spécifiques pour chaque paramètre de l'implant (par exemple la largeur de bande des canaux dans le Digisonic). Cette méthode pourrait servir à différents types d'applications depuis le choix de la meilleure stratégie de réglage pour un individu (en fonction de son profil électrophysiologique) jusqu'aux modifications technologiques de l'implant pour améliorer la transmission des sons de parole.

3.2. Etude développementale de l'influence des connaissances lexicales sur la perception phonémique

Pour comprendre l'influence des connaissances lexicales sur la perception des sons de parole, il est essentiel de caractériser la dynamique de ce processus. A ce titre, nous voudrions réaliser une étude en potentiels évoqués avec des enfants pré-lecteurs et normo-entendants âgés de 3, 4 et 5 ans. Il est important que les participants soient des enfants pré-lecteurs parce que plusieurs études ont mis en évidence l'influence de l'apprentissage de la lecture sur la précision des représentations phonémiques établies (Frauenfelder, Segui, & Dijkstra, 1990 ; Morais, Bertelson, Cary, Alegria, 1986; Morais, Cary, Alegria, Bertelson, 1979). Cette étude permettrait d'observer le déclenchement et le déroulement des traitements associés à l'utilisation de connaissances lexicales pour percevoir les sons de parole. L'objectif de ce travail serait de spécifier l'origine de la différence de précision dans la perception des phonèmes selon qu'ils apparaissent en mots ou en pseudomots. Cet effet lexical peut s'expliquer de deux manières différentes : soit par une plus grande précision dans la production des phonèmes en mots, soit par des processus de perception plus redondants par la mise en œuvre d'effets lexicaux haut-bas. L'utilisation de stimuli de parole dans nos travaux (Chapitre 5) ne permet pas de dissocier ces deux possibilités. Par contre, l'utilisation de

stimuli synthétiques permettrait de normaliser les indices acoustiques dans les mots et les non-mots. Si les effets lexicaux persistent au moins partiellement dans ces conditions nous pourrions conclure à l'intervention de facteurs perceptifs dont la nature pourrait ensuite être étudiée, notamment à l'aide de données électro-encéphalographiques.

Des investigations comportementales et électro-encéphalographiques permettraient de préciser l'activité électrique cérébrale au cours du temps, correspondant à l'activation des informations phonémiques et lexicales lors de la perception des sons de parole. Le recueil de ces données est important puisqu'elles permettront de déterminer si les effets lexicaux proviennent ou non d'une rétroaction haut-bas sur le traitement des informations acoustiques (à l'appui : McLelland, Mirman, & Holt, 2006 ; Myers & Blumstein, 2007; à l'encontre : McQueen, Norris, & Cutler, 2006). Ensuite, les connaissances lexicales mises en œuvre pourraient soit provenir de comparaisons avec des représentations en termes d'exemplaires (Pallier, Colomé & Sebastian-Gallés, 2001) ou de recalibrations d'indices acoustiques similaires à celles qui interviennent dans les effets contextuels pre-lexicaux (Shatzman & McQueen, 2006 ; Dahan, 2008).

Il est possible d'étudier différents marqueurs de l'utilisation d'informations lexicales. Les processus cérébraux d'identification des mots parlés se déroulent, pour la plupart, dans les 500 ms qui succèdent la présentation du stimulus. Les marqueurs temporels associés aux traitements sémantiques des mots parlés qui ont pu être identifiés dans la littérature sont la N400, qui présente une sensibilité aux manipulations sémantiques (Helenius, Salmelin, Service, Connolly, Leinonen, et al., 2002), et la '*Phonological Mismatch Negativity*', produite entre 200 et 350 ms après la présentation du stimulus (D'Arcy, Connolly, Service, Hawco, & Houlihan, 2004).

3.3. Etude des compétences de compréhension orale et de compréhension écrite

Selon le modèle développé par Hoover et Gough (1990), la compréhension en lecture serait le produit des compétences en reconnaissance des mots écrits et en compréhension orale. Dans les chapitres 4 et 5, nous nous sommes intéressés aux compétences de perception des sons de parole qui sous-tendent le développement de la compréhension orale. Les résultats de ces deux études montrent un déficit de précision de la perception des sons de parole chez les enfants implantés. Le premier objectif d'une étude en cours est donc de déterminer si le développement des compétences de compréhension orale est également déficitaire. Dans les chapitres 6 et 7, nous avons étudié les compétences de reconnaissance des mots écrits chez les enfants implantés. Les résultats montrent également un déficit de précision d'utilisation des deux procédures de lecture. Le second objectif de cette étude en cours est donc de déterminer si le développement des compétences de compréhension écrite, sous-tendu par l'acquisition de compétences de compréhension orale et de reconnaissance des mots écrits est déficitaire chez les enfants implantés. Si la compréhension écrite est déficitaire, cela signifierait que le modèle de Hoover et Gough s'appliquerait également aux enfants implantés.

Les premiers résultats de cette étude en cours qui sont intéressants concernent les compétences de compréhension orale et écrite des enfants implantés. Les enfants implantés qui ont participé à cette étude sont les mêmes que ceux qui ont participé aux études des chapitres 4, 5 et 7.

Afin de préciser les compétences de compréhension orale et écrite des enfants implantés, nous avons utilisé des tâches adaptées de l'ECOSSE (Lecocq, 1996). En compréhension écrite, les enfants lisent une phrase puis voient 4 images et la tâche demandée était de choisir l'image qui correspondait à la phrase. La même procédure est utilisée pour la tâche de compréhension orale hormis le fait que la phrase est entendue plutôt que lue. Les phrases étaient composées d'items qui étaient très fréquents (8.5/1000 frequency effect -

MANULEX, Lété, Sprenger-Charolles, et Colé, 2004). La complexité syntaxique des phrases était croissante : (1) phrases simples (exemple : l'homme caresse le chien), (2) phrases négatives (exemple : le chat n'est pas debout), (3) phrases contenant un pronom sujet (exemple : elle est debout sur le lit), (4) phrases contenant un pronom objet (exemple : la dame le porte), (5) phrases contenant une préposition (devant, derrière, dans, sur, ...) (exemple : la fleur est sur la boîte), (6) phrases relatives en qui (exemple : la fille poursuit le chien qui saute), et (7) phrases passives (exemple : la fille est poursuivie par le chien). Les images sont construites selon un modèle stricte qui suit la logique suivante : par exemple, pour la phrase « le chat qui pousse le chien est noir », une image correspond à la réponse correcte, une image représente le même sujet et le même objet mais dans une action différente (b), deux images représentent des sujets différents mais dans la même action (c) et (d). Voir la figure 1 pour un exemple d'images.

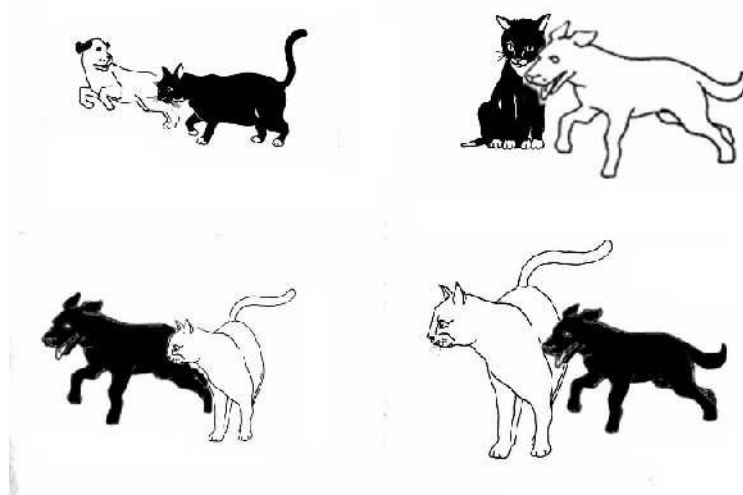


Figure 1. Exemple de planche réponse pour la tâche de compréhension.

Nous avons mesuré pour chaque groupe (25 enfants implantés, 25 enfants du groupe contrôle de même niveau de lecture et 25 enfants du groupe contrôle de même âge chronologique), le pourcentage de réponses correctes pour chaque structure syntaxique et dans chaque modalité. Les résultats de cette étude préliminaire indiquent que les enfants

implantés ont des performances de compréhension écrite et orale inférieure à celles des enfants normo-entendants (Figure 2). Nous observons également que les enfants implantés obtiennent de meilleurs scores de compréhension en modalité écrite par rapport à la modalité orale alors que les enfants normo-entendants comprennent les phrases présentées avec la même précision quelque soit la modalité.

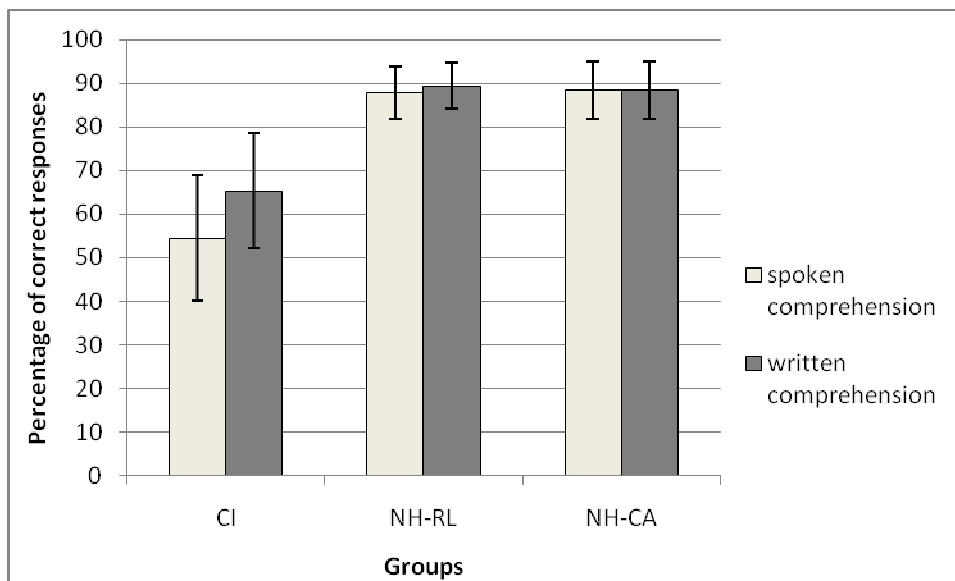


Figure 2. Pourcentage de réponses correctes pour les tâches compréhension écrite et de compréhension orale pour les enfants implantés (CI), les enfants contrôles appariés sur le niveau de lecture (NH-RL) et les enfants contrôles appariés sur l'âge chronologique (NH-CA)

Ces premiers résultats suggèrent que les difficultés à percevoir précisément les sons de parole influencent les compétences de compréhension orale. De plus, les difficultés à la fois en compréhension orale et en reconnaissance des mots écrits influencent également les performances de compréhension écrite qui sont déficitaires. Le modèle de Hoover et Gough semble donc s'appliquer aux compétences de compréhension écrite des enfants implantés. Afin de préciser les relations entre le développement de la compréhension écrite, de la compréhension orale et de la reconnaissance des mots écrits, il est nécessaire de réaliser des analyses de régressions. Néanmoins, en raison du petit nombre de participants (25 participants par groupe), il n'est pas possible de réaliser ces analyses de régressions sur les données actuelles. Par conséquent, l'objectif d'une prochaine étude est de répliquer cette expérience

avec un plus grand nombre d'enfants afin de pouvoir déterminer de manière plus complète, les compétences de compréhension écrite et le rôle joué par la reconnaissance des mots écrits et la compréhension orale dans son développement.

Références

- Alegria, J., Charlier, B., & Mattys, S. (1999). The Role of Lip-reading and Cued Speech in the Processing of Phonological Information in French-educated Deaf Children. *European Journal of Cognitive Psychology*, *11*(4), 451-472.
- D'Arcy, R.C.N., Connolly, J.F., Service, E., Hawco, C.S., & Houlihan, M.E. (2004). Separating phonological and semantic processing in auditory sentence processing: a high-resolution event-related brain potential study. *Human Brain Mapping*, *22*, 40-51.
- 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.
- Bradley, L., & Bryant, P. E., (1983). Categorising sounds and learning to read: a causal connection. *Nature*, *301*, 419-21.
- Bryant, P. E., MacLean, M., Bradley, L. L., & Crossland. (1990). Rhyme and alliteration, phoneme detection, and learning to read. *Developmental Psychology*, *26*, 429-438.
- Calliope. (1989). *La parole et son traitement automatique*. Paris: Masson.
- Charlier, B.L., & Leybaert, J. (2000). The rhyming skills of deaf children educated with phonetically augmented speechreading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, *53*(2), 349-375.
- Chen, H., & Zeng, F.G. (2004). Frequency modulation detection in cochlear implant subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *116*(4), 2269-2277.
- Crain, K.L., & Lasasso, C. (2010). Experiences and Perceptions of Cueing Deaf Adults in the U.S. In C. La Sasso, K. Crain, J. Leybaert (Eds). *Cued speech and cued language for deaf and hard of hearing children*. Plural publishing INC: San Diego.
- Dahan, D. (2008). Listeners' use of context-specific cue distributions during spoken-word recognition. Abstracts of the 49th Annual Meeting of the Psychonomics Society, 13, 12.
- Delvaux, V. (2009). Perception du contraste de nasalité vocalique en français. *Journal of French Language Studies*, *19*, 25-59.
- Dufor, O., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., & Démonet, J.-F. (2009). Left pre-motor cortex and allophonic speech perception in dyslexia: A PET study. *NeuroImage*. Doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.01.035
- Fagan, M.K., Pisoni, D.B., Horn, D.L., & Dillon, C.M. (2007). Neuropsychological Correlates of Vocabulary, Reading, and Working Memory in Deaf Children With Cochlear Implants. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, *12*, 461-47.
- Frauenfelder, U., Segui, J., & Dijkstra, T. (1990). Lexical effects in phonemic processing: facilitatory or inhibitory. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance*, *16*(1), 77-91.

- Fu, Q., & Shannon, R. (2000). Effect of stimulation rate on phoneme recognition by nucleus-22 cochlear implant listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1), 589-597.
- Geers, A. (2003). Predictors of reading skill development in children with early cochlear implantation. *Ear and Hearing*, 24, 59S-68S.
- Hage, C., Alegria, J., & Perier, O. (1990). Cued Speech and language acquisition: The case of grammatical gender morpho-phonology. In D. Martin (Ed.), *Advances in cognition, education, and deafness*. Washington, DC: Gallaudet University Press.
- Harnsberger, J.D., Svirsky, M.A., Kaiser, A.R., Pisoni, D.B., Wright, R., Meyer, T.A. (2001). Perceptual "vowel spaces" of cochlear implant users: implications for the study of auditory adaptation to spectral shift. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5), 2135-2145.
- Helenius, P., Salmelin, R., Service, E., Connolly, J. F., Leinonen, S., & Lyytinen, H. (2002). Cortical activation during spoken-word segmentation in nonreading-impaired and dyslexic adults. *Journal of Neuroscience*, 22, 2936-2944.
- Hoonhorst, I., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., Deltenre, P., & Serniclaes, W. (2009b). French native speakers in the making: from language-general to language-specific voicing boundaries. *Journal of Experimental Child Psychology*, 104(4), 353-366.
- Hoover, W.A. & Gough, P.B. (1990). The simple view of reading. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 2, 127-160.
- Koo, D., Crain, K., LaSasso, C. and Eden G.F. (2008) Phonological Awareness and Short Term Memory in Hearing and Deaf Individuals of Different Communication Backgrounds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145, 83-99.
- Kuhl, P.K. (2004). Early language acquisition: cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 831-843.
- LaSasso, C., Crain, K., & Leybaert, J. (2003). Rhyme generation in deaf students: the effect of exposure to cued speech. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 8(3), 250-270.
- LaSasso, C., & Metzger, M. (1998). An alternate route to bilingualism: The home language as L1 and Cued Speech for conveying traditionally spoken languages. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 3(4), 264-289.
- Lecocq, P. (1996). *Epreuve de Compréhension Syntaxico-Sémantique (E.CO.S.SE)*, Lille : Presses universitaires du Septentrion.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L. & Colé, P. (2004). MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 36(1), 156-166.

- Leybaert, J., & Charlier, B. (1996). Visual speech in the head: the effect of cued-speech on rhyming, remembering, and spelling. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 1(4), 234-248.
- Leybaert, J., & LaSasso, C. J. (2010). Cued speech for enhancing speech perception and first language development of children with cochlear implants. *Trends in Application*, 14, 96-112.
- Lundberg, I., Olofson, A., & Wall, S. (1980). Reading and spelling skills in the first school years predicted from phonemic awareness skills in kindergarten. *Scandinavian Journal of Psychology*, 21, 159-173.
- Mann V. & Liberman I.Y (1984) Phonological awareness and verbal short term memory. *Journal of Learning Disabilities*, 17, 592-599.
- McClelland, J., Mirman, D., & Holt, L. (2006). Are there interactive processes in speech perception? *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 363-369.
- McQueen, J.M., Norris, D., & Cutler, A. (2006). Are there really interactive processes in speech perception? *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 533.
- Morais, J., Bertelson, P., Cary, L., & Alegria, J. (1986). Literacy training and speech segmentation. *Cognition*, 24, 45-64.
- Morais, J., Cary, L., Alegria, J. & Bertelson, P. (1979). Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously? *Cognition*, 7, 323-331.
- Myers, E.B. & Blumstein, S.E. (2008). The neural basis of the lexical effect: An fMRI investigation. *Cerebral Cortex*, 18, 278-288.
- Nicholls, G.H., & Ling, D. (1982). Cued Speech and the reception of spoken language. *Journal of Speech and Hearing Research*, 25(2), 262-269.
- Pallier, C., Colomé, A., & Sebastian-Gallés, N. (2001). The Influence of Native-language Phonology on Lexical Access: Exemplar-Based Versus Abstract Lexical Entries. *Psychological Science*, 12, 445-449.
- Perier, O., Charlier, B., Hage, C., & Alegria, J. (1988). Evaluation of the effects of prolonged cued speech practice upon the reception of spoken language. In I. Taylor (Ed.), *The education of the deaf: Current perspectives* (Vol. 1), 1985 International Congress on the Education of the Deaf. Beckenham, Kent, UK: Croom Helm, LTD, 616-628.
- Ramus, F., Peperkamp, S., Christophe, A., Jacquemot, C., Kouider, S., & Dupoux, E. (2010). A psycholinguistic perspective on the acquisition of phonology. In C. Fougerson, B. Kühnert, M. d'Imperio & N. Vallée (Eds.), *Laboratory Phonology 10: Variation, Phonetic Detail and Phonological Representation* (pp. 311-340). Berlin: Mouton de Gruyter.
- Ramus, F. & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit ? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 129-141.
- Ruthruff, E., Allen, P. A., Lien, M.-C., & Grabbe, J. (2008). Visual word recognition without central attention: Evidence for greater automaticity with greater reading ability. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15, 337-343.

- Serniclaes, W. (2000). La perception de la parole. In P. Escudier, G. Feng, P. Perrier, J.-L. Schwartz (Eds.), *La parole, des modèles cognitifs aux machines communicantes* (pp. 159-190). Paris: Hermès.
- Serniclaes, W. (2002). Méthodes d'évaluation des performances de l'Implant Cochléaire.
- Serniclaes, W., De Guchteneere, R., Secqueville, T., Bachelot, G., Genin, J., Meyer, B., & Chouard, C.H. (1996). Objective evaluation of vowel identification with the Digisonic cochlear implant. *Audiology*, *35*(1), 23-36.
- 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*(4), 336-361.
- Shatzman, K. B., & McQueen, J. M. (2006). Prosodic knowledge affects the recognition of newly acquired words. *Psychological Science*, *17*(5), 372-377.
- Snowling, M.J. (2001). From language to reading and dyslexia. *Dyslexia*, *7*(1), 37-46.
- 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*(2), 87-104.
- Stickney, G.S., Zeng, F.G., Litovsky, R., & Assmann, P. (2004). Cochlear implant speech recognition with speech maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *116*(2), 1081-1091.
- Uchanski, R. M. Delhorne, L. A., Dix, A. K., Braid, L. D., Reed, C. M., and Durlach, N. I. (1994) Automatic speech recognition to aid the hearing impaired: Prospects for the automatic generation of cued speech, *J. Rehabilitation Research and Development*, *31*(1), p. 20-41.
- Vermeulen, A.M., van Bon, W., Schreuder, R., Knoors, H., & Snik, A. (2007). Reading comprehension of deaf children with cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, *12*(3), 283-302.
- Wimmer, H. (1993). Characteristics of developmental dyslexia in a regular writing system. *Applied Psycholinguistics*, *14*, 1-33.
- Wimmer, H. (1996). The early manifestation of developmental dyslexia: Evidence from German children. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, *8*, 171-188.
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, *131*(1), 3-29.
- Ziegler, J. C., Pech-Georgel, C., George, F., Alario, F. X., & Lorenzi, C. (2005). Deficits in speech perception predict language learning impairment. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, *102*, 14110-14115.

