

le cnam



Université de Paris

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

UNIVERSITÉ DE PARIS

**ÉTUDE PSYCHOLINGUISTIQUE DE LA VARIABILITÉ DES STRATÉGIES
D'ÉCOUTE DES PARTICIPANTS MALENTENDANTS APPAREILLÉS**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'État d'Audioprothésiste

Par

TAHIR Allya

Sous la direction de

M.COUDERT Cyrille / M.VARNET Leo

Maîtres de mémoire

Année Universitaire 2024-2025

Résumé

Introduction : Ce mémoire a pour objectif d'étudier la variabilité des informations acoustiques effectivement utilisées par le cerveau humain pour comprendre les sons de la parole chez les personnes malentendantes appareillées.

Sujets et méthodes : L'Image de Classification Auditive a alors été utilisée. Cette méthode repose sur une expérience de psycholinguistique consistant à catégoriser des phonèmes dans un bruit de fond, et nous permet ensuite de cartographier ces indices acoustiques de manière précise non seulement à l'échelle du groupe mais également à l'échelle individuelle. 21 sujets malentendants, présentant des profils de pertes auditives variables ont pu alors être testés.

Résultats : Une variabilité notable de pondérations de ces informations par le cerveau a pu être constatée non seulement par rapport au groupe normoentendant mais également à l'échelle individuelle des participants malentendants.

Conclusion : Ce mémoire marque le début d'une recherche visant à documenter de manière précise les stratégies d'écoute des malentendants. Ainsi pour plus de précisions, des prochaines études pourraient être réalisées en prenant en compte les spécificités des réglages prothétiques de chaque participant.

Mots clés : stratégie d'écoute, indice acoustique, Image de Classification Auditive

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à témoigner ma reconnaissance au Laboratoire d'Expertise Auditive Paris-Gobelins de m'avoir accueilli durant mes stages. Ce fut, pour moi, une expérience professionnelle extrêmement riche en enseignement.

Je suis tout particulièrement reconnaissante envers Cyrille COUDERT, mon maître de stage. Observer et pratiquer à ses côtés a été une chance inestimable, et je le remercie pour sa bienveillance, la disponibilité dont il a fait preuve pour me former et la confiance qu'il m'a accordée.

Je remercie également l'ensemble des audioprothésistes et des coordinatrices de centre pour l'accueil qu'ils m'ont réservé ainsi que pour tout ce que j'ai appris à leurs côtés. Ils auront tous contribué à construire mon identité professionnelle de futur audioprothésiste.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au docteur Léo VARNET, chercheur au Laboratoire des Systèmes Perceptifs à l'Ecole Normale Supérieure de Paris, pour sa passion communicative pour la recherche, ses conseils éclairés, ses observations toujours pertinentes, ainsi que pour le soutien infaillible qu'il m'a apporté tout au long de ce projet.

Je suis très reconnaissante envers l'ensemble des patients ayant participé à cette étude. Leur contribution a été plus qu'essentielle pour mener à bien nos recherches.

Un grand merci à l'équipe enseignante et pédagogique de la formation CPDA pour leur transmission de leur savoir quant au métier d'audioprothésiste.

Enfin, il me semble important de témoigner de ma reconnaissance à ma famille et mes amis. Leur soutien moral aura été un élément indispensable à l'aboutissement de ce travail.

Table des matières

TABLE DES FIGURES	7
TABLE DES ABREVIATIONS.....	8
INTRODUCTION	9
1. NOTIONS THEORIQUES ET CONCEPTUELLES.....	10
1.1 Spectrogramme	10
1.2 Phonèmes	11
1.2.1 Consonne.....	13
a) Transition formantique.....	14
b) Burst de désocclusion Haute fréquence	15
1.3 Coarticulation des voyelles et des consonnes	15
1.4 Recherches des indices acoustiques.....	16
1.4.1 Phonétique acoustique et ses limites	16
1.4.2 Phonétique perceptive	16
1.5 Notion de stratégie d'écoute.....	17
1.5.1 Définition	17
1.5.2 Variabilité des stratégies d'écoute chez les normoentendants	17
2. ETAT DE L'ART	18
2.1 Variabilité des stratégies d'écoute chez les malentendants	18
2.2 Limites observées des méthodes d'analyses des stratégies d'écoutes	19
2.3 L'Image de Classification Auditive (ACI)	19
2.3.1 Contexte et émergence de la méthode	19
2.3.2 Principe générale de l'ACI	20
2.3.3 Procédure d'obtention d'une ACI	20
a) Calcul de la corrélation inverse	20
b) Obtention d'une matrice de corrélation.....	20
c) Superposition de la matrice obtenue avec spectrogramme des phonèmes	21
2.3.4 Principe de l'ACI appliquée au normoentendant.....	22
2.3.5 Principe de l'ACI appliquée au malentendant	23
a) Justification quant à la compensation de la perte auditive par NAL-R	23
b) Présentation de la méthodologie NAL-R.....	23
c) Première expérimentation de l'ACI appliquée au malentendant	24
3. OBJECTIFS DE CETTE ETUDE	25
4. MATERIEL ET METHODE	26
4.1 Population testée	26
4.1.1 Critère d'inclusion	26
4.1.2 Groupe contrôle	26
4.1.3 Critère d'exclusion des participants malentendants et normoentendants.....	26
4.2 Procédure expérimentale.....	26
4.2.1 Test préliminaire	26
4.2.2 Dispositifs et conditions expérimentales	26
a) Dispositif technique	27
b) Déroulement de la passation.....	27
4.2.3 Stimulis de l'ACI.....	27
a) Les logatomes	27

b) Le bruit de fond	28
4.2.4 Cadre éthique et réglementaire	28
4.3 Analyse statistique	28
4.3.1 Calcul de l'ACI	29
a) Modèles linéaires généralisés (GLM)	29
b) Régression pénalisée	29
4.3.2 Principe de la validation croisée	30
4.3.3 La déviance	30
5. RESULTATS	30
5.1 Audiométrie	30
5.2 Effet de l'amplification NAL-R pour chaque participant malentendant	31
5.3 Performances du groupe normoentendants et malentendants	32
5.3.1 RSB et d prime	32
5.3.2 Déviance du groupe malentendant	33
5.4 Lecture des ACI	34
5.4.1 ACI moyennes des groupes	34
5.4.2 ACI individuelles	35
a) ACI individuelles des normoentendants	35
b) ACI individuelles des malentendants	36
6. DISCUSSION	37
6.1 Interprétation générale des résultats	37
6.1.1 RSB	37
6.1.2 Différence globale entre les stratégies d'écoute des deux groupes	38
6.1.3 Variabilité interindividuelle des stratégies d'écoute	38
6.2 Discussion spécifique par indice acoustique	38
6.2.1 L'absence du burst de désocclusion chez les malentendants	38
6.2.2 L'indice F1	39
6.2.3 L'indice F2	39
CONCLUSION	40
BIBLIOGRAPHIE	41

TABLE DES FIGURES

- **Figure 1** : Illustration de la notion de spectre et de spectrogramme
- **Figure 2** : Représentation schématique du triangle vocalique
- **Figure 3** : Schéma illustrant la théorie source-filtre
- **Figure 4** : Tableau de l'API représentant la classification des consonnes
- **Figure 5** : Spectrogramme des logatomes "aga" et "ada"
- **Figure 6** : Représentation schématique de la coarticulation lors de la prononciation du mot "soucis"
- **Figure 7** : Diagramme schématique du protocole expérimental employé pour le calcul d'une ACI
- **Figure 8** : ACI obtenue par un sujet normo entendants dans la tâche de discrimination aba/ada avec les spectrogrammes de ces signaux cibles
- **Figure 9** : ACIs moyennes obtenues pour chaque condition.
- **Figure 10** : Tableau recensant les indices acoustiques identifiés dans les ACI individuelles de des participants normoentendants testés.
- **Figure 11** : Tableau des facteurs de correction C de l'amplification NAL-R en fonction des fréquences
- **Figure 12** : Spectrogrammes des 6 signaux vocaux pouvant être utilisés pour l'expérimentation de l'ACI
- **Figure 13** : Audiométries tonales liminaires en conduction aérienne oreilles séparées des participants malentendants de HI15 à HI38
- **Figures 14** : Audiométrie tonale en dB SPL et Spectre d'un son de parole dans le bruit après amplification par NAL-R à différentes fréquences pour chaque participant malentendant.
- **Figure 15** : Représentation graphique du RSB en fonction des écoutes pour les participants normoentendants.
- **Figure 16** : Représentation graphique du RSB en fonction des écoutes pour les participants malentendants.
- **Figure 17** : Performances de chaque ACI individuelle des HI pour la prédiction de nouvelles données du même individu (rond bleu) ou des autres individus du même groupe (point orange)
- **Figure 18** : Image de Classification Auditive moyenne du groupe normo-entendant pour la tâche de distinction phonémique /ada/et /aga/
- **Figure 19** : Image de Classification Auditive moyenne du groupe malentendant pour la tâche de distinction phonémique /ada/et /aga/
- **Figure 20** : ACI individuelles des participants normoentendants testés pour la tâche de distinction phonémique /ada/ /aga/
- **Figure 21** : ACI individuelles des participants malentendants testés pour la tâche de distinction phonémique /ada/ /aga/
- **Figure 22** : Représentation graphique du RSB en fonction des écoutes à l'échelle du groupe malentendant et pour HI34

TABLE DES ABREVIATIONS

- **ACI** : Auditory Classification Image (ICA en français)
- **API** : Alphabet phonétique International
- **BIAP** : Bureau International d'Audiophonologie
- **dB SPL**: decibel Sound Pressure Level
- **dB HL**: decibel Hearing Level
- **f₀** : fréquence fondamentale
- **F1, F2, F3** : premier formant, deuxième formant, troisième formant
- **Hz** : Hertz
- **ICA** : Image de Classification Auditive
- **NAL-R** : National Acoustic Laboratories-Revised
- **PTM** : Perte Tonale Moyenne
- **RSB** : Rapport Signal sur Bruit

INTRODUCTION

D'ici 2050, à l'échelle mondiale, une personne sur quatre pourrait être atteinte de déficience auditive. Dans ces personnes, plus de 700 millions seraient susceptibles de nécessiter une réhabilitation auditive (OMS, 2021). La déficience auditive constitue ainsi un enjeu croissant pour les systèmes de santé publique. Pouvant être de nature différente, l'hypoacousie impacte considérablement la qualité de vie des malentendants. En effet, bien que les prothèses auditives permettent une amélioration considérable de la perception sonore, ces systèmes ne permettent pas de rétablir une audition normale, notamment dans le bruit (Lessica, 2018). C'est ainsi que de nombreuses études ont montré la variabilité des performances de l'intelligibilité dans le bruit chez les personnes malentendantes appareillées. Par exemple, dans l'étude de (Varnet et., 2021), les résultats montrent que malgré une amplification, les scores individuels de reconnaissance de phonèmes varient de 0 % à 100 %. Ce résultat suggère que ces personnes malentendantes ne tirent pas le même bénéfice de l'appareillage.

A ce jour, un débat important demeure quant à la nature exacte des informations extraites et exploitées par le système auditif normoentendant et malentendant pour catégoriser les sons.

Dans cette étude psycholinguistique, en utilisant une méthodologie basée sur l'analyse des réponses comportementales individuelles, dans une tâche de catégorisation des phonèmes dans le bruit, nous essayerons de comprendre les origines de cette variabilité de performances. Pour cela, nous nous intéresserons à **l'étude de la variabilité des stratégies d'écoute chez les participants malentendants appareillés, autrement dit, l'étude des informations acoustiques utilisées par ces personnes pour distinguer, identifier et comprendre les sons.**

A une échelle plus large, comprendre ces origines nous permettrait de mieux cibler les difficultés d'écoute dans le bruit rencontrées par les personnes malentendantes appareillées et ainsi d'améliorer, de personnaliser et d'affiner les solutions de prise en charge et d'adaptation prothétique en fonction des stratégies d'écoute de chacun.

1. NOTIONS THEORIQUES ET CONCEPTUELLES

Cette partie a pour but de présenter les notions essentielles sur lesquelles s'appuie notre problématique. Dans le cadre de ce mémoire, il ne s'agit pas d'aborder la perception de la parole dans sa globalité, mais de s'intéresser plus particulièrement à la catégorisation des phonèmes en présence de bruit. Ainsi, cela permet non seulement de cibler mais également d'isoler le mécanisme potentiellement affecté par la déficience auditive : bien qu'une tâche de compréhension de phrases soit plus écologique et représentative des situations de communication réelle, elle implique d'autres mécanismes (lexicaux, syntaxiques, sémantiques) que nous souhaitons ici mettre de côté. C'est la raison pour laquelle, nous nous intéresserons à la "brique" élémentaire du langage oral, le phonème, que nous visualiserons à travers des spectrogrammes.

1.1 Spectrogramme

La parole est définie comme un signal acoustique continu. Le spectrogramme, un outil qui permet la représentation de l'amplitude en fonction du temps et de la fréquence, est utilisé pour visualiser et étudier le signal de parole. Par analogie avec la vidéo, caractérisée par une succession d'images dans le temps donnant l'impression de mouvement, le spectrogramme est, quant à lui, une succession de spectres dans le temps. Ainsi, sur un spectrogramme la fréquence est portée sur l'axe des ordonnées tandis que le temps est représenté sur l'axe des abscisses. L'amplitude n'apparaît pas directement sous forme d'axe mais est traduite par l'intensité des zones colorées. En effet, plus la teinte de la zone est foncée, plus l'amplitude, autrement dit **l'énergie acoustique**, correspondante est importante.

Sur la figure 1, il est à noter que la phrase prise pour exemple, se découpe en segments temporels où le son est relativement stable. Ces segments représentent les phonèmes. Dans ces segments stables, certaines fréquences de la source glottique se manifestent par des lignes horizontales appelées raies. La source glottique correspond au son initial produit par la vibration des cordes vocales comprenant la fréquence fondamentale et ses multiples appelés harmoniques. Ce sont précisément ces fréquences harmoniques qui sont amplifiées par le conduit vocal et qui se traduisent ainsi par des zones d'énergies plus intenses, les formants, reflétant les caractéristiques acoustiques propres à chaque phonème (voir 1.2.1).

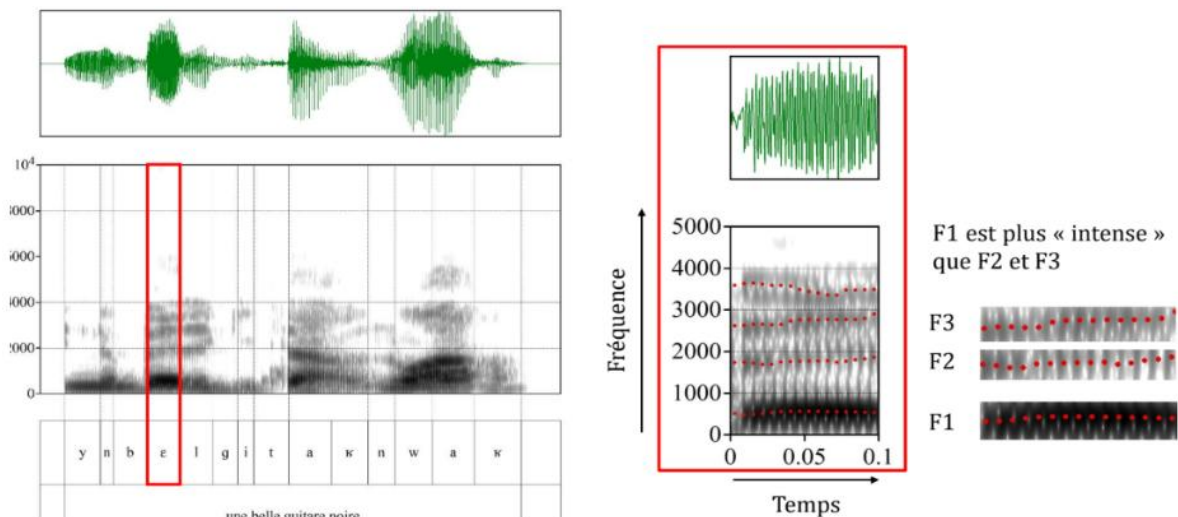


Figure 1 : Illustration de la notion de spectre et de spectrogramme (Amelot, 2023)

A gauche : spectre de la phrase “une guitare noire” (en vert) avec son spectrogramme correspondant (en noir) / A droite : spectre et spectrogramme du phonème (ε) et illustration de ses premier, deuxième et troisième formants (F1, F2, F3)

1.2 Phonèmes

Le phonème est une unité minimale distinctive qui, par des jeux de contraste, va permettre d'établir des oppositions entre différentes catégories de sons. Ce sont ces oppositions qui permettent d'établir des distinctions lexicales.

Par exemple, dans la paire minimale « sac » versus « bac », en substituant le phonème /s/ par /b/ on change le sens du mot.

Dans la langue française, on distingue généralement 32 phonèmes : 15 voyelles et 17 consonnes. Chaque phonème est représenté en Alphabet Phonétique Internationale, un outil standardisé qui permet de noter précisément les sons indépendamment de l'orthographe.

A titre d'exemple, le mot “chat”, se transcrit en /ʃa/ dans l'API.

Les parties suivantes s'attacheront à décrire plus en détail les deux grandes catégories de phonèmes pertinentes pour notre étude, à savoir les voyelles et les consonnes.

1.2.1 Voyelle et formant

La voyelle est un son caractérisé par le libre écoulement du flux d'air dans le conduit vocal.

En phonétique articulatoire, les voyelles se classent selon quatre traits : l'aperture (ouverture de la bouche), le lieu d'articulation (position de la langue), l'arrondissement des lèvres, et dans certains cas, la nasalité.

L'ensemble des voyelles orales peut être représenté sous la forme d'un triangle vocalique introduit par Jespersen en 1904 puis repris par l'Association Phonétique Internationale. Ce schéma permet de visualiser les principales oppositions articulatoires. En effet, l'axe vertical schématise le degré d'ouverture (voyelles fermées en haut et voyelles ouvertes en bas). L'axe horizontal illustre la position de la langue (antérieure à gauche et postérieure à droite). Il est à

noter que lorsque deux voyelles ont le même lieu et le même degré d'ouverture, elles se différencient par l'arrondissement des lèvres.

Ce triangle est représenté sur la figure 2.

Par exemple, les voyelles /i/ et /y/ sont toutes les deux fermées et antérieures. Toutefois, seul le /y/ requiert l'arrondissement des lèvres.

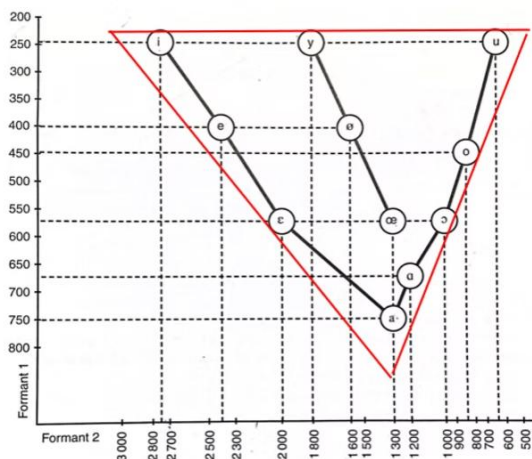


Figure 2 : Représentation schématique du triangle vocalique (Juret, 2021)

En abscisse : valeur de F2 correspondante à la voyelle ; En ordonnée : valeur du F1 correspondante à la voyelle.

D'un point de vue acoustique, la production des voyelles résulte des propriétés résonnantes du conduit vocal. En effet, la cavité de résonance est modifiée par les articulateurs (lèvres, langue, voile du palais), ce qui accentue certaines fréquences qu'on appelle formants.

Ces pics énergétiques sont ainsi mis en lumière sous forme de regroupements d'harmoniques renforcées sur le spectrogramme.

D'ailleurs à travers sa célèbre théorie source-filtre, Fant décrit ce mécanisme représenté sur la figure 3

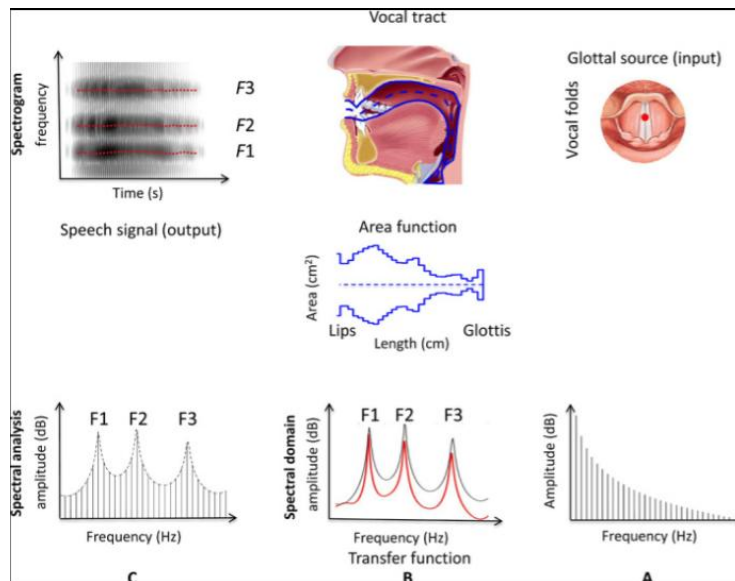


Figure 3 : Schéma illustrant la théorie source-filtre. (Boë et al., 2019)

A droite (A) la source sonore correspond à la vibration des cordes vocales, qui génère un signal périodique riche en harmoniques, représenté par un spectre où l'énergie est plus forte dans les basses fréquences et décroît progressivement vers les hautes fréquences.

Au centre (B), le conduit vocal agit comme un filtre résonnant dont la forme décrite par la fonction d'aire allant de la glotte aux lèvres, déterminant les fréquences de résonance appelées formants. Ces résonances apparaissent dans la fonction de transfert acoustique, qui montre l'amplification de certaines harmoniques et l'atténuation d'autres.

A gauche (C), le résultat du passage de la source à travers le filtre est visible sur le spectrogramme et le spectre acoustique : les formants se manifestent par des bandes sombres stables et par des pics énergétiques localisés (F1, F2, F3...).

L'identification de ces voyelles repose particulièrement sur l'analyse des deux premiers formants (F1 et F2). Ils peuvent être représentés dans un plan reflétant leur organisation correspondant d'ailleurs à celle du triangle vocalique, comme illustré sur le schéma de la figure 2.

1.2.1 Consonne

La consonne est un son caractérisé par la fermeture totale ou partielle du conduit vocal qui perturbe ou empêche l'écoulement de l'air.

Les consonnes peuvent être décrites par différents traits phonétiques : le mode d'articulation, le lieu d'articulation et le voisement.

Le mode d'articulation décrit la nature de l'expulsion de l'air lors de la production de la consonne. Les occlusives ou « plosives » sont caractérisées par une obstruction totale du flux d'air par les organes articulatoires suivie d'un relâchement brutal. Comme par exemple lorsqu'on prononce les consonnes /d/ et /g/ utilisées dans cette présente étude (voir raisons de ce choix plus loin).

Les fricatives sont quant à elles produites suite à un rétrécissement partiel du conduit produisant un bruit de friction.

Le lieu d'articulation correspond à la zone du conduit vocal sollicitée lors de la production. Ainsi, en français les consonnes peuvent être bilabiales, labio dentales, dentales, alvéolaires,

post-alvéolaires, palatales, vélaires ou uvulaires. Par exemple, la consonne /d/ est alvéolaire alors que le /g/ est vélaire. C'est ce qu'on appelle **un contraste d'articulation**.

Enfin, le voisement met en opposition les consonnes sonores, dont la production s'accompagne d'une vibration des cordes vocales (comme c'est le cas des consonnes /d/ et /g/), aux consonnes sourdes caractérisées par une absence de vibration des cordes vocales.

Dans l'Alphabet Phonétique Internationale, les consonnes sont alors classées selon ces 3 traits caractéristiques de la production consonantique comme représenté sur la Figure 4.

	Bilabial	Labiodental	Dental	Alveolar	Postalveolar	Retroflex	Palatal	Velar	Uvular	Pharyngeal	Glottal
Plosive	p b			t d		ʈ ɖ	c ɟ	k ɡ	q ɢ		ʔ
Nasal	m	ɱ		n		ɳ	ɲ	ŋ	ɴ		
Trill	ʙ			r					ʀ		
Tap or Flap		ɸ		ɾ		ɽ					
Fricative	ɸ β	f v	θ ð	s z	ʃ ʒ	ʂ ʐ	ç ʝ	x ɣ	χ ʁ	ħ ʕ	h ɦ
Lateral fricative				ɬ ɮ							
Approximant		ʋ		ɹ		ɻ	j	ɰ			
Lateral approximant				l		ɭ	ʎ	ʟ			

Figure 4 : Tableau de l'API représentant la classification des consonnes de toutes les langues du monde, les **consonnes du français "standard"** y sont encadrées en rouge. Chaque colonne représente un **lieu d'articulation du conduit vocal** et chaque ligne un **mode d'articulation**. Dans chaque case la consonne de droite est orale et celle de gauche est sourde. (Amelot, 2023)

Ces traits phonétiques jouent non seulement un rôle dans la production des consonnes mais aussi dans la perception consonantique.

En effet, lorsque nous observons par exemple les matrices de confusions établies lors d'expériences perceptives (Miller and Nicely 1955) (Phatak et al, 2008), nous constatons que les erreurs respectent cette organisation par traits phonétiques. En d'autres termes, les confusions ont lieu le plus souvent lorsque les consonnes partagent un ou plusieurs traits phonétiques (par exemple entre 2 occlusives voisées). Cela nous montre ainsi la manière dont le cerveau humain analyse et traite les sons de la parole.

Ces tendances perceptives reposent généralement sur les informations acoustiques permettant au système auditif d'identifier leur consonne. Parmi ces informations acoustiques, la transition formantique et le bruit de désocclusion hautes fréquences, ont un rôle particulièrement déterminant dans le décodage d'un message acoustique continu telle que la parole.

a) Transition formantique

On appelle transition formantique les variations rapides des formants durant le passage d'une consonne à une voyelle. Comme pour les voyelles, les formants des consonnes dépendent du lieu de constriction et de l'ouverture du conduit vocal. Ainsi, les trajectoires des transitions formantiques (ascendantes, descendantes, ou plates), permettent d'identifier la zone de production des consonnes et in fine la consonne elle-même. Ces différentes trajectoires sont illustrées sur la figure 5 représentant la transition formantique des logatomes Aga et Ada sur leur spectrogramme respectif.

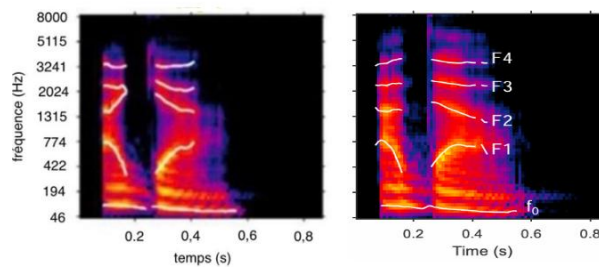


Figure 5 : Spectrogramme des logatomes “aga” (à gauche) et “ada” (à droite) mettant en lumière leurs formants respectifs F1, F2, F3, F4 représentés en blanc (adapté de Osses and Varnet, 2024)

b) Burst de désocclusion Haute fréquence

Le burst de désocclusion à l’attaque de la consonne (“release burst”) est une information acoustique de place d’articulation. Ce burst correspond à une énergie apparaissant dans les hautes fréquences (entre 6 KHz et 8 KHz) au début de la syllabe qui correspond à la consonne ou au groupe de consonnes précédant la voyelle. (Wright, 2004) (Varnet, 2025)

1.3 Coarticulation des voyelles et des consonnes

Ces deux phénomènes de transitions formantiques et de burst de désocclusion ne peuvent être compris indépendamment du principe de coarticulation. Ainsi, les transitions de formants sont liées à la superposition des mouvements articulatoires de la consonne et de la voyelle.

La coarticulation est définie par l’anticipation ou la préservation des gestes articulatoires (arrondissement des lèvres, abaissement de la langue, etc.) au-delà des limites des phonèmes pour lesquels ils doivent être produits. Il y a donc chevauchement temporel entre différents gestes articulatoires associés à des phonèmes distincts comme illustré sur le schéma de la figure 6.

La parole est continue : les sons ne sont que rarement produits de façon isolée, ils sont coproduits et s’influencent mutuellement. Ainsi, la réalisation d’un son dépend du contexte phonétique dans lequel il est produit, c’est-à-dire des sons qui le précèdent et des sons qui le suivent.

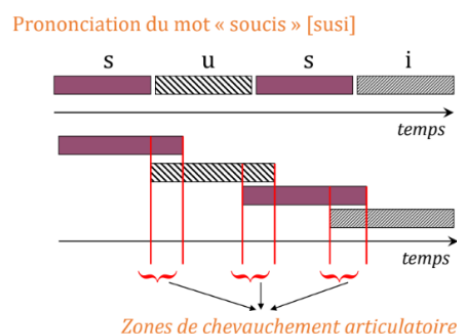


Figure 6 : Représentation schématique de la coarticulation lors de la prononciation du mot “soucis” mettant en lumière le chevauchement temporel des gestes articulatoires entre phonèmes successifs. (Amelot, 2023)

A l’inverse, lors de la perception des sons, ce phénomène de coarticulation intervient également. En effet, il est possible de détecter des informations acoustiques non seulement

dans le segment correspondant au phonème cible, mais également dans les segments adjacents.

1.4 Recherches des indices acoustiques

La phonétique acoustique et perceptive partagent un objectif commun : identifier les indices acoustiques. Par indice acoustique, on entend les caractéristiques du signal sonore explicitées dans les sections précédentes (formants, transition formantique, burst de désocclusion...), qui véhiculent l'information nécessaire à la reconnaissance des sons de la parole. Ainsi, lors de l'écoute, le système auditif extrait ces indices du flux continu et les utilise pour identifier les phonèmes présents dans le signal. Ce processus permet de reconnaître les phonèmes, puis sur cette base de reconstruire les mots, les phrases et in fine le sens global du discours.

1.4.1 Phonétique acoustique et ses limites

La phonétique acoustique s'intéresse aux propriétés physiques du signal sonore observables notamment sur le spectrogramme. Elle constitue une approche purement acoustique des sons de parole et ne suffit donc pas à elle seule à identifier lesquels de ces indices acoustiques sont effectivement utilisés par le cerveau pour reconnaître et comprendre les sons du langage.

Face à la complexité et la variabilité du signal sonore, la phonétique perceptive nous permet l'étude de ces indices acoustiques.

1.4.2 Phonétique perceptive

La phonétique perceptive, aussi appelée phonétique expérimentale, s'intéresse à la façon dont les êtres humains perçoivent et catégorisent ce qu'ils entendent. Elle constitue alors une approche psycholinguistique à travers laquelle on y étudie les rapports entre les sons du langage et les processus psychologiques de production et de compréhension d'énoncés. Autrement dit, comment le cerveau transforme le son en sens, quels sont les indices acoustiques qui nous disent que ce son correspond à ce phonème particulier ?

Ces mécanismes de perception reposent en grande partie sur des mécanismes nommés « bottom-up » par lesquels l'auditeur s'appuie directement sur les indices acoustiques pour identifier les phonèmes.

A partir du début du 20^{ème} siècle, ces questions de perception ont entraîné un grand nombre de recherches. Ces protocoles expérimentaux étaient pour la plupart réalisés au casque au sein d'une cabine. Ces expérimentations consistaient à présenter des sons aux participants afin non seulement d'analyser leur réponse mais également les confusions éventuelles.

C'est ainsi que la première expérience dans ce domaine fut réalisée par Fletcher en 1922. Ce protocole consistait à faire écouter et répéter des logatomes filtrés dans différentes bandes fréquentielles, le but étant d'identifier les zones fréquentielles contribuant le plus au processus de compréhension. Malgré le fait que la méthode présente de nombreuses limites, elle permit de mettre en lumière que le signal de parole repose sur plusieurs indices acoustiques redondants, présents dans plusieurs canaux fréquentiels que le cerveau est ensuite apte à combiner de façon optimale.

Quelques années plus tard, Miller et Nicely ont pu analyser les matrices de confusions pour une tâche de reconnaissance de syllabe dans du bruit et ont pu ainsi mettre en évidence que les confusions consonantiques avaient lieu lorsque deux consonnes avaient des traits phonétiques en commun comme par exemple le voisement entraînant alors des confusions des consonnes b, d, g ou encore le lieu d'articulation comme g et k qui sont tous les deux des consonnes vélaires. En revanche, il était rare que des confusions aient lieu entre deux consonnes n'ayant pas le même mode d'articulation. Ce dernier point révèle alors que les

indices acoustiques permettant la distinction du mode d'articulation résistent mieux au masquage du bruit. (Miller and Nicely 1955)

Après l'invention du sonographe dans les années 1940, les études acoustiques se multiplient et les études de perception commencent à se développer. En 1951, l'équipe des Laboratoires Haskins met au point un synthétiseur de parole : le pattern-playback. (Cooper et., al 1951)

A partir de manipulations d'indices acoustiques (burst, transition formantique) extraits de parole naturelle ces chercheurs ont pu démontrer que ni le burst ni la transition formantique seule suffisent à l'identification correcte des occlusives. En effet, la combinaison de ces deux indices était alors requise pour la catégorisation fiable (comme par exemple le d, g). (Cooper et., al 1952) (Liberman et al., 1954)

De leur côté, Peterson et Barney, se sont concentrés sur les voyelles et ont ainsi pu démontrer, grâce à la participation de nombreux locuteurs anglophones, que les formants F1 et F2 suffisent à constituer des indices perceptifs robustes pour leur identification, malgré la variabilité interindividuelle. (Peterson and Barney, 1952)

Ainsi ces protocoles expérimentaux mettent en évidence la multiplicité des indices acoustiques accessibles et utilisés par les auditeurs ce qui nous amène alors à nous demander si tout le monde utilise les mêmes indices de la même manière.

1.5 Notion de stratégie d'écoute

1.5.1 Définition

L'objet de ce mémoire porte sur l'étude des stratégies d'écoute. Mais que signifie exactement ce terme ?

On appelle "stratégie d'écoute" l'utilisation d'un ensemble particulier d'indices acoustiques pour comprendre la parole. En effet, dans les sections précédentes nous avons vu que les phonèmes sont constitués de nombreux indices acoustiques redondants. Lors de l'écoute, le cerveau combine ces indices de manière spécifique à chaque personne ce qui se traduit par un poids perceptif attribué à chacun d'entre eux. L'ensemble de ces poids perceptifs correspond précisément à ce qu'on appelle "stratégie d'écoute".

Il est important de préciser que ce terme est utilisé pour traduire le terme anglais weighting function. L'emploi du mot "stratégie" ne doit pas laisser penser qu'il s'agit d'un choix conscient de la part de l'auditeur.

Certains auteurs préfèrent parler de fonction de pondération (Apoux and Bacon, 2004), mais l'expression de stratégie d'écoute reste largement utilisée dans la littérature.

1.5.2 Variabilité des stratégies d'écoute chez les normoentendants

La littérature en psycholinguistique apporte de nombreux résultats allant dans le sens d'une variabilité des stratégies d'écoute chez les normoentendants.

Comme mentionné précédemment, il existe plusieurs indices redondants codant pour chaque phonème.

Cette diversité des indices implique qu'il est théoriquement possible que des individus normoentendants les utilisent différemment. Plusieurs études confirment cette hypothèse en mettant en évidence une variabilité significative des stratégies d'écoute entre normoentendants. (Hazan and Rosen, 1991) (Varnet, 2019)

Très récemment, l'étude de Carranante, a révélé un phénomène remarquable : cette variabilité interindividuelle n'est pas aléatoire. Elle présente au contraire une certaine structure. L'indice principal (attaque du F2 pour les contrastes de place d'articulation, barre de voisement pour les contrastes de voisement) était pondéré significativement par chaque individu testé. En revanche, les indices secondaires pouvaient être présents ou non d'un individu à l'autre. Autrement dit, les stratégies de pondérations individuelles diffèrent sur le nombre d'indices impliqués, formant des ensembles disjoints n'ayant en commun que l'indice principal. (Carranante et al., 2024)

2. ETAT DE L'ART

Dans le but de contextualiser la problématique de cette étude, cette partie vise à retracer les apports théoriques et empiriques majeurs, tout en identifiant les questionnements non résolus qui motivent notre propre recherche.

Ainsi, dans un premier temps nous verrons dans la littérature ce qui nous montre qu'on a des raisons de penser qu'il y aurait une **variabilité de stratégie d'écoute chez les malentendants appareillés**. Puis, nous présenterons la méthode utilisée dans notre protocole. Enfin nous exposerons une étude réalisée avec cette méthode auprès des participants malentendants en soulignant les limites de cette étude ayant conduit à notre protocole.

2.1 Variabilité des stratégies d'écoute chez les malentendants

Chez les malentendants, plusieurs études psycholinguistiques ont été menées afin de mesurer leurs stratégies d'écoute, de la même façon que ce qui a été décrit pour les normo-entendants dans la partie précédente.

Une équipe de chercheurs s'est attachée à montrer que dans le système auditif malentendant, les indices acoustiques peuvent être correctement détectés sans pour autant être utilisés efficacement pour la compréhension. Cette recherche avait pour but d'étudier comment l'audibilité des indices spectraux influence la reconnaissance des consonnes occlusives. Elle consistait ainsi à faire écouter à des normoentendants et des malentendants des syllabes synthétiques dont la seule différence était la consonne au début de cette syllabe. Cette expérience a pu alors mettre en évidence que chez les normoentendants, plus la partie du signal audible est importante, plus le score de reconnaissance s'améliore. Par contre, chez les malentendants, l'audibilité de ces indices ne garantit pas une identification correcte des syllabes. (Turner and Robb, 1987)

Plus récemment, des chercheurs ont démontré que les participants appareillés atteints de pertes auditives dans les hautes fréquences avaient plus de difficultés à utiliser ces fréquences que les individus normoentendants. Cette étude avait alors pour but de déterminer l'importance des différentes bandes de fréquences impliquées dans la compréhension de la parole, notamment chez les malentendants en utilisant la méthode de "stratégie des combinaisons aléatoires" (Bosen and Chatterjee, 2016). Cette méthode fut adoptée pour cette étude car elle avait la capacité de révéler des différences à l'échelle individuelle contrairement aux méthodes classiques, qui reposent sur une analyse à l'échelle du groupe. Cette expérience a alors permis de mettre en évidence que les zones du spectre fréquentiel atteintes

par la perte auditive ne sont pas nécessairement utilisées par l'individu après compensation de cette perte par une amplification. (Yoho and Bosen, 2019)

En 2019 également, Léo Varnet et ses collègues ont réalisé une expérience de catégorisation [da]-[ga] grâce à une méthode permettant de mesurer précisément la pondération de certains indices utilisés dans la tâche. Ils ont ainsi obtenu une mesure pour chaque participant de l'importance qu'il accorde à la transition de F1, d'une part, et à la transition de F2, d'autre part (Varnet et al., 2019). Cette expérience a été réalisée sur des personnes malentendantes munies d'une amplification adaptée à leur perte soulignant de larges différences interindividuelles notamment au sein des groupes malentendants. La comparaison avec un groupe contrôle normoentendant a montré que les participants malentendants ne parvenaient pas à revenir à une stratégie d'écoute "normale", même avec une amplification compensant leurs pertes de sensibilité auditives.

Ainsi, ces études montrent que les indices disponibles (audibles) ne sont pas forcément utilisés par les malentendants, mettant en évidence l'impact des troubles supraliminaires sur le traitement des indices acoustiques et, in fine, sur la compréhension de la parole.

Ces études suggèrent de plus que chaque malentendant peut développer une stratégie d'écoute particulière en s'appuyant plus sur un indice acoustique ou un autre.

De façon générale, cette littérature scientifique illustre concrètement certaines limites de l'amplification fournie par l'appareillage : les indices rendus à nouveau audibles ne sont pas forcément utilisés, et il existe une variabilité interindividuelle qu'il semble important de prendre en compte.

2.2 Limites observées des méthodes d'analyses des stratégies d'écoutes

Les méthodes utilisées dans les trois études citées précédemment présentent néanmoins une limitation notable : elles offrent une image très partielle de l'intégration des indices phonétiques. Par exemple, l'approche de (Varnet et al., 2019) ne permet d'investiguer que les pondérations de deux indices à la fois. Or, il a été vu dans la précédente section que le système auditif utilise la combinaison de multiples indices pour identifier les sons. Il nous faudrait alors une méthode nous permettant de visualiser cette multiplicité d'indices acoustiques de manière précise.

Par ailleurs, nous constatons que plusieurs méthodes ont été mises en place pour observer comment le cerveau analyse les sons. Ces méthodes consistent à manipuler ou à resynthétiser les sons et à observer comment le cerveau va faire pour comprendre. Cependant, la manipulation des sons les rend peu naturels. Or, on aimerait étudier cette variabilité des stratégies avec des sons de parole plus représentatifs de la réalité, c'est-à-dire des enregistrements de voix non manipulés.

C'est dans ce contexte que la méthode de l'Image de Classification Auditive a été développée.

2.3 L'Image de Classification Auditive (ACI)

2.3.1 Contexte et émergence de la méthode

Depuis les années 1920, un grand nombre de recherches ont été menées ayant abouti à de multiples résultats en ce qui concerne le traitement de la parole par le cerveau humain. En revanche, la question des indices acoustiques dont le cerveau se sert pour distinguer et comprendre les sons suscite encore de nombreuses interrogations – en particulier comme nous l'avons noté plus haut parce que les méthodes utilisées jusque-là démontrent certaines limites comme l'utilisation de stimuli synthétiques artificiels. (Varnet, 2025)

C'est dans ce contexte qu'une nouvelle approche psycholinguistique, purement comportementale a été développée, appelée l'Image de Classification Auditive (ACI).

Cette méthode, de par sa résolution très fine, permet la première observation directe des indices acoustiques à l'échelle de l'individu. (Varnet, 2015)

2.3.2 Principe générale de l'ACI

La technique de l'ACI est caractérisée par l'association d'une expérience de psychologie cognitive et d'une méthode d'analyse statistique.

L'expérience de psychologie cognitive consiste à induire en erreur le participant. Pour cela, les expérimentateurs font écouter des phonèmes au participant dans un fort bruit de fond. Le participant écoute par exemple une série de "ada" et de "aga" couverts par un bruit de fond et indique après chaque présentation, ce qu'il pense avoir entendu.

La méthode repose alors sur l'analyse des erreurs de compréhension effectuées par le participant qui sont un reflet du traitement effectué par son cerveau. Ainsi, c'est en analysant les erreurs de compréhension du participant qu'on parviendra à remonter à la connaissance des indices acoustiques fondamentaux à la compréhension de la parole avec un haut niveau de précision.

2.3.3 Procédure d'obtention d'une ACI

a) Calcul de la corrélation inverse

L'ACI s'inspire de travaux sur la méthode de corrélation inverse (revcorr) psychophysique, d'abord réalisés essentiellement dans le domaine de la perception visuelle depuis les années 1990 (Ahissar and Hochstein, 1993) et plus récemment étendus à la modalité auditive autour des années 2010. (Varnet et al., 2013) (Ponsot et al., 2013)

Comme son nom l'indique, le principe de la corrélation inverse est basé sur la corrélation, une mesure statistique décrivant la force et la direction entre deux variables. Ainsi, l'ACI est basé sur un calcul statistique de la corrélation entre la présence de bruit dans chaque point temps-fréquence et la réponse binaire du participant. (Voir la partie 4.3.1 pour description détaillée des modèles statistiques utilisés dans le calcul des ACI)

b) Obtention d'une matrice de corrélation

Une matrice de corrélation de la même taille que le spectrogramme des stimuli est ainsi obtenue permettant de mettre en lumière les régions du bruit qui influencent la décision du participant, autrement dit, les portions du signal acoustique que le sujet écoute activement et prend en compte dans sa décision.

Sur la figure 7, on observe les zones où la corrélation entre le spectrogramme du bruit et la réponse est positive (respectivement négative), représentées en rouge (respectivement en bleu), qui correspondent aux régions temps-fréquence où la présence de bruit biaise la réponse en faveur de "aba" (respectivement "ada").

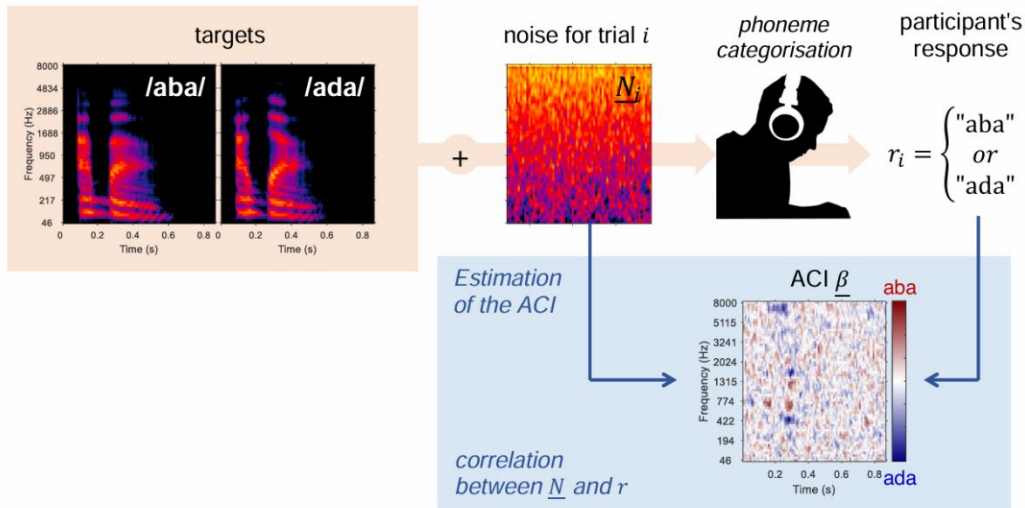


Figure 7 : Diagramme schématique du protocole expérimental employé pour le calcul d'une ACI. (Varnet, 2025)

À chaque essai i , une cible t_i (/aba/ ou /ada/) est présentée dans un bruit (N_i), et le sujet indique s'il pense avoir reconnu "aba" (réponse $r_i = 0$) ou "ada" (réponse $r_i = 1$).

L'ACI (β) est l'image finale obtenue par agrégation statistique de 4000 essais stimuli-réponses au moyen d'un modèle particulier (ici, une simple corrélation).

Sur l'ACI, les poids positifs, en rouge, correspondent aux régions du spectrogramme où la présence de bruit biaise la réponse en faveur de "aba", tandis que les poids négatifs, en bleu, correspondent aux régions du spectrogramme où la présence de bruit biaise la réponse en faveur de "ada". (Varnet, 2025)

c) Superposition de la matrice obtenue avec spectrogramme des phonèmes

Afin d'identifier à quels indices acoustiques correspondent les régions de forte corrélation déterminées à l'étape précédente, on réalise une superposition de la matrice avec le spectrogramme des phonèmes comme représenté sur la figure 8.

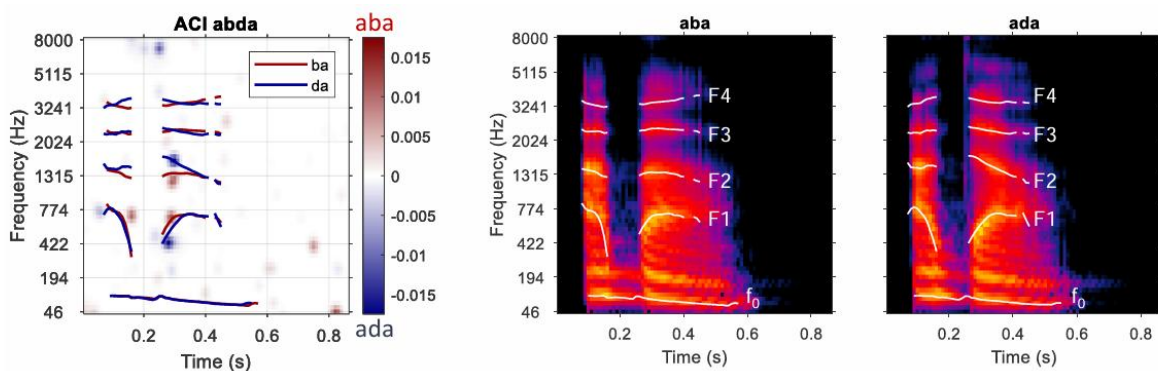


Figure 8 : A Gauche : ACI obtenue par un sujet normoentendants dans la tâche de discrimination aba/ada (Osses and Varnet, 2024). Les lignes bleues et rouges indiquent la trajectoire de la f_0 et des formants pour les deux signaux-cibles. A Droite : spectrogrammes des signaux cibles

2.3.4 Principe de l'ACI appliquée au normoentendant

Une récente étude a utilisé l'ACI ayant pour but de cartographier les régions fréquentielles influençant la perception des consonnes occlusives du français chez les participants normoentendants. Ainsi plusieurs tâches de discrimination ont pu être testées nous permettant alors d'obtenir les ACI moyennes ci-dessous propres à chaque tâche. (Figure 9).

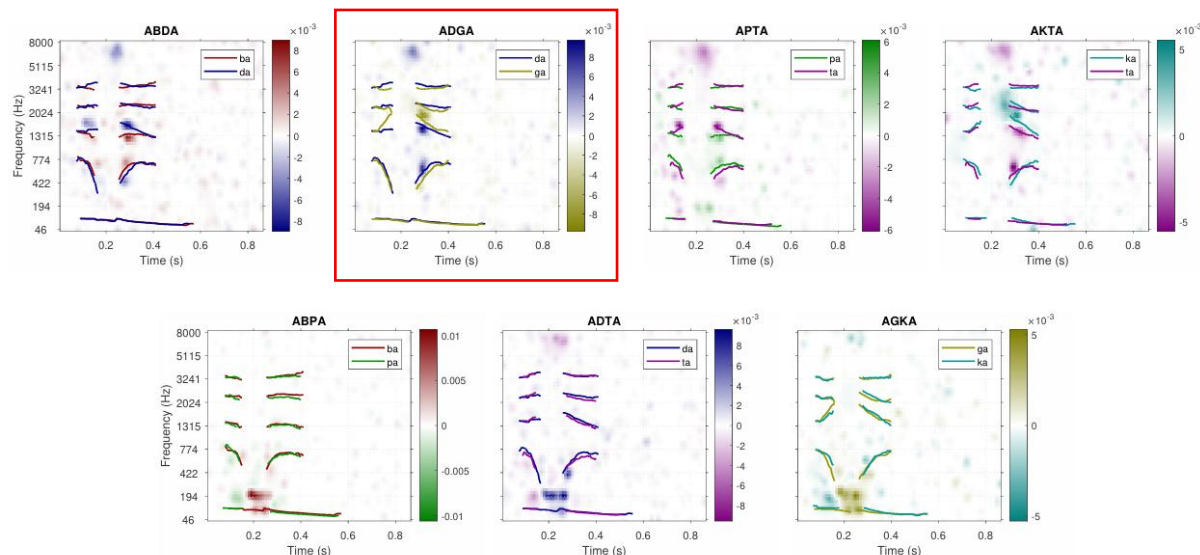


Figure 9 : ACI moyennes obtenues pour chaque condition. ACIs du haut : **contrastes de place d'articulation**. ACIs du bas : **contrastes de voisement**. (Carranante et al., 2024)

Le résultat se présente sous la forme d'une carte de même format qu'un spectrogramme.

Dans le but d'expliciter la méthode de lecture d'une ACI, la tâche **ada/aga** (encadrée en rouge sur la figure 9) sera prise pour exemple :

A droite de l'image figure l'échelle de pondération qui correspond à la valeur du poids du modèle statistique utilisé dans la dérivation de l'ACI. Elle est nommée "poids perceptif" et constitue une mesure de l'importance de chaque point temps-fréquence dans la réponse de l'auditeur. C'est une valeur pondérale sans unité.

Dans les positifs, correspondant ici à la teinte **bleu**, la pondération illustre l'importance du point temps-fréquence considéré pour comprendre "**ada**" (c'est-à-dire à quel point la présence de bruit à cette position fait tromper le participant en faveur de la réponse ada).

Dans les négatifs, correspondant ici à la teinte **verte**, la pondération illustre l'importance du point temps-fréquence considéré pour comprendre "**aga**".

Plus la valeur est grande dans les positifs ou dans les négatifs (intensité du bleu ou intensité du vert), plus le point teinté a de l'importance dans la perception de ce son par le participant. Les zones blanches, au contraire, ne sont pas utilisées par le cerveau.

Comme exposé dans la partie 2.3.2 c), l'Image de Classification Auditive est ensuite superposée aux spectrogrammes des phonèmes présentés, dans le but de faire correspondre les zones pondérées aux caractéristiques des phonèmes telles que leurs formants F1, F2, le burst de désocclusion ...

Les tracés colorés correspondent aux trajectoires des formants et de la f0 pour chaque cible. Or, l'ACI permet non seulement de faire apparaître les indices acoustiques utilisés à l'échelle du groupe mais également à l'échelle individuelle. Ainsi, en examinant les ACI de chaque

participant, les chercheurs de cette étude ont pu regrouper les indices acoustiques de chaque participant, pour les différentes tâches sous la forme d'un tableau représenté (figure 10.)

	Place-of-articulation constraints				Voicing contrasts		
	ABDA	ADGA	APTA	AKTA	ABPA	ADTA	AGKA
CV F2 transition	7/7	7/7	7/7	7/7	0/7	1/7	0/7
CV F1 transition	3/7	6/7	2/7	3/7	4/7	7/7	4/7
Burst	4/7	5/7	4/7	6/7	1/7	4/7	1/7
Voicing bar	0/7	1/7	2/7	0/7	7/7	7/7	6/7
VC F2 transition	4/7	0/7	3/7	0/7	0/7	1/7	0/7
VC F1 transition	1/7	0/7	3/7	0/7	3/7	2/7	2/7

Figure 10 : Tableau recensant les indices acoustiques identifiés dans les ACI individuelles des participants normoentendants testés, pour des tâches de distinction phonémique avec des contrastes de place d'articulation /aba;ada/ /ada;aga/ /apa;ata/ /aka;ata/ et pour des tâches de distinction phonémiques avec des contrastes de voisement /aba;apa/ /ada;ata/ /aga;aka/ (Carranante et al., 2024)

Dans la suite, nous nous baserons sur les résultats de l'étude (Carranante et al., 2024), particulièrement ceux issus de la tâche "ada"- "aga" qui nous serviront de référence pour notre expérience réalisée auprès des auditeurs malentendants.

2.3.5 Principe de l'ACI appliquée au malentendant

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer la variabilité des stratégies d'écoute chez les participants malentendants appareillés grâce à la méthode de l'ACI. Puisque nous ne sommes pas intéressés par les pertes de sensibilité auditive en tant que telles, il est important d'appliquer une correction adaptée à la perte de nos participants. Une possibilité serait de tester les participants directement avec leurs aides auditives personnelles. Cependant, afin de mieux contrôler les paramètres et l'effet réel de l'amplification, une correction auditive de type NAL-R leur est appliquée.

a) Justification quant à la compensation de la perte auditive par NAL-R

Cette prescription de gain simplifiée est utilisée dans un premier temps afin de suivre une démarche méthodique intégrable dans le programme Matlab prévu pour l'expérience.

De plus, cela nous permet de maîtriser les paramètres de l'amplification et de connaître les compressions minimales utilisées dans le but de ne pas dégrader le signal (et les indices acoustiques). La présence de pick-clipping et le niveau sonore raisonnable de la diffusion garantissent néanmoins la sécurité auditive des participants.

Elle sert donc de point de départ avant de progresser vers des conditions d'écoute plus proches de la réalité, jusqu'à permettre une expérimentation avec les propres prothèses auditives des participants malentendants. L'objectif étant de disposer d'un cadre homogène, afin que les différences observées puissent être attribuées aux stratégies d'écoute plutôt qu'à des variations de méthodologie de réglages. (Varnet et al., 2019)

Cette méthodologie présente cependant de nombreux désavantages, que nous discuterons plus loin, parmi lesquels une faible amplification des basses fréquences.

b) Présentation de la méthodologie NAL-R

La formule NAL est une méthodologie de préréglage prescriptive linéaire, initialement présentée par Byrne et Tonisson en 1976. Elle fut ensuite révisée par Byrne et Dillon en 1986 sous le nom de NAL-R. (Byrne and Dillon, 1986)

La méthodologie prescrit une réponse en fréquence ayant pour but d'optimiser le potentiel d'intelligibilité en maximisant le signal de parole disponible, en moyenne sur une large plage de fréquences.

Le NAL-R a ajusté et amélioré l'énergie disponible pour certaines pertes auditives dans toutes les bandes de parole, particulièrement sur les basses fréquences comprises entre 500 et 1000 Hz. De plus, le calcul du demi-gain a été réduit au calcul du tiers de gain. Bien que la règle du tiers de gain soit appliquée, la procédure NAL-R nécessite un calcul de la moyenne de trois fréquences (500 Hz, 1000 Hz et 2000 Hz), permettant ainsi une augmentation à un taux de 46 pour cent, conformément à l'équation.

Le gain pour chaque fréquence est ensuite ajusté d'une certaine quantité, conformément à la forme du spectre moyen à long terme (LTASS), de sorte que moins de gain soit distribué aux fréquences où la parole est plus intense (basses fréquences). La formule NAL-R inclut un gain de réserve de 10 dB.

La formule NAL-R est la suivante :

$$\text{Gain d'Insertion} = X + 0,31 * HT + C$$

avec $X = 0,15 * PTM$ et $PTM = (S_{500} + S_{1k} + S_{2k}) / 3$

Le facteur C correspond au coefficient de correction, qui varie pour chaque fréquence comme présenté dans le tableau ci-dessous.

Les valeurs S_{500} , S_{1k} , S_{2k} correspondent aux seuils auditifs liminaires mesurés aux fréquences de 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz respectivement.

Frequency (Hz)	250	500	1000	2000	3000	4000	6000
C in dB	-17	-8	1	-1	-2	-2	-2

Figure 11 : Tableau des facteurs de correction C de l'amplification NAL-R en fonction des fréquences (Rajkumar et al., 2013)

c) Première expérimentation de l'ACI appliquée au malentendant

Dans une étude très récente, intitulée *“Etude des fonctions de pondérations spectro-temporelles des auditeurs malentendants appareillés en discrimination des phonèmes”* (Pimbert, 2024), le protocole ACI a pu être appliqué aux participants malentendants, avec un but relativement similaire à celui du présent mémoire : comparer les stratégies d'écoute des participants normoentendants avec celles des malentendants appareillés.

Au départ des passations destinées aux participants malentendants, les phonèmes « aba » / « ada » avaient été choisis. En effet, leur discrimination repose sur de nombreux indices secondaires, (Carranante et al., 2024) présents dans des zones fréquentielles sur lesquelles la correction NAL-R était satisfaisante. Cela permettait d'envisager une comparaison des stratégies d'écoute entre les deux groupes, dans l'hypothèse où les différences apparaîtraient.

Toutefois, les deux premiers participants malentendants ont présenté de telles difficultés à réaliser la tâche qu'ils n'ont pas pu valider le test d'inclusion suivant la première session d'écoutes, relevant une sensation de « répondre au hasard ».

Il a alors été conclu que la tâche de discrimination « aba » / « ada » bruitée n'était pas adaptée à ce groupe. La tâche de discrimination « aga » / « aka » a alors été choisie car elle présentait des rapports signal sur bruit d'écoutes bien plus bas lors de la passation des tests sur normo-entendants, et semblait donc plus facile. Cette hypothèse a alors été confirmée lors des passations. En effet, le test d'inclusion fut validé pour cette tâche. (Pimbert, 2024)

Cependant il s'est avéré que ce contraste présentait des limites pour les objectifs de l'étude. En effet, cette tâche de discrimination comprend peu d'indices acoustiques secondaires contrairement à la tâche « aba » / « ada ».

Le contraste observé reposait surtout sur l'indice du voisement, situé dans les basses fréquences aux alentours de 100 Hz. Malheureusement, NAL-R présente des limites dans les basses fréquences, qu'il amplifie relativement peu. Les différences de stratégies des malentendants par rapport aux normoentendants peuvent ainsi s'expliquer simplement par les limites de l'amplification choisie. Effectivement, trois participants se distinguent des autres participants malentendants. En effet, ils n'utilisent pas l'indice du fondamental laryngé ni sa première harmonique mais ils s'appuient sur une information située à environ 600 Hz et 0,16 s. La raison de cette différence peut être liée aux limites de l'amplification NAL-R, n'amplifiant pas suffisamment les basses fréquences, cette méthodologie ayant été choisie en premier lieu dans le cadre d'une discrimination « aba » / « ada ».

En effet, parmi 3 de ces participants, deux d'entre eux ont une déficience auditive moyenne de degré 2 sur cette zone fréquentielle. Il est alors possible que cet indice ait été inaudible pour eux durant l'expérience. (Pimbert, 2024)

3. OBJECTIFS DE CETTE ETUDE

Cette étude a pour but l'exploration de la variabilité des stratégies d'écoute des participants malentendants appareillés. Plusieurs sous-objectifs en découlent. Nous aimerions tout d'abord comparer les stratégies d'écoute de nos participants malentendants avec les stratégies d'écoute des normoentendants, de façon globale, en réalisant des moyennes sur chacun des deux groupes. En second lieu, nous avons pour objectif de nous intéresser plus particulièrement au sous-groupe de malentendants appareillés. En effet, l'ACI nous permet d'évaluer les stratégies d'écoute à l'échelle individuelle, une dimension jusqu'à présent inaccessible avec les méthodologies classiques. Ainsi, cette dimension nous permettrait alors de relier certaines spécificités des ACI individuelles aux différentes étiologies de perte auditive.

Cette documentation des stratégies d'écoute des sujets malentendants appareillés présente plusieurs intérêts cliniques à plus long terme. Un premier objectif est la mise au point d'un outil utile dans les cas spécifiques de personnes insatisfaites de leur appareillage, pour guider le choix des modifications à apporter au paramétrage. Un second objectif concerne l'amélioration des systèmes d'audioprothèse eux-mêmes : une connaissance plus approfondie des profils individuels pourrait guider les choix de paramètres pour l'amplification et ainsi envisager d'amplifier spécifiquement les indices acoustiques identifiés comme cruciaux pour un individu particulier. (Varnet, 2025)

Pour atteindre ces objectifs, et recenser les indices acoustiques de la manière la plus précise et exhaustive possible, il a été choisi de tester les participants à la tâche ada/aga. En effet, ces logatomes contiennent de nombreux indices acoustiques de place d'articulation (voir figure 10). Ainsi plus le nombre d'indices acoustiques est élevé, plus l'ACI sera susceptible d'identifier des différences dans les indices effectivement utilisés par les participants.

4. MATERIEL ET METHODE

4.1 Population testée

4.1.1 Critère d'inclusion

Cette étude s'intéresse aux adultes atteints d'une déficience auditive légère à sévère et appareillés avec un appareillage conventionnel. Toutes les étiologies de pertes auditives ont été incluses pour cette étude. Le protocole peut être lancé pour des pertes auditives unilatérales et bilatérales. Il est tout de même à noter que nous avons privilégié les malentendants appareillés, ayant une perte auditive bilatérale et symétrique pour plus d'homogénéité de notre groupe de participants.

Ces participants sont pseudonymisés "HIX", X étant le numéro du participant.

Au total, **21** participants malentendants ont pu réaliser la tâche complète à l'issue de ce protocole.

4.1.2 Groupe contrôle

Dans le but de pouvoir comparer les résultats obtenus avec notre groupe de participants malentendants, un groupe participant normo entendants a également réalisé la passation.

Pour pouvoir être inclus ces participants devaient avoir une audition normale ou subnormale (seuil tonal moyen inférieur à 20 dB). (Carranante et., al)

Ces sujets sont pseudonymisés "SX", X étant le numéro du participant.

On compte 8 participants normoentendants pour cette expérience.

4.1.3 Critère d'exclusion des participants malentendants et normoentendants

Certains profils ne pouvaient convenir pour cette étude. En effet, l'expérience nécessite des capacités de concentration et d'analyse fine des sons. Ainsi, les participants présentant des troubles psychologiques et/ou neurologiques importants ainsi que les sujets âgés de plus de 80 ans n'ont pas été inclus dans cette étude. Également, les patients présentant des troubles d'acquisition du langage (dyslexie, dysphasie) n'ont pas été intégrés. Enfin, les participants présentant un acouphène invalidant n'ont pas été inclus pour ce protocole.

4.2 Procédure expérimentale

4.2.1 Test préliminaire

Afin de s'assurer que nos sujets normoentendants et malentendants appareillés respectent nos critères d'inclusion, une audiométrie tonale liminaire en son pur, est réalisée au casque avec un audiomètre Otometrics. Les seuils auditifs des fréquences 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 750 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz, 6000 Hz et 8000 Hz sont alors mesurés.

4.2.2 Dispositifs et conditions expérimentales

Le protocole expérimental de notre présente étude se déroulait à l'Ecole Normale Supérieure de Paris et plus précisément au sein du Laboratoire des Systèmes Perceptifs (LSP). L'expérience se déroule dans une cabine insonorisée en conformité avec la norme de l'article D. 4361-19 du code de la santé publique. (Décret n°2005-988 du 10 août 2005).

a) Dispositif technique

Le logiciel MATLAB permet la diffusion de l'expérience et le stockage des réponses du participant. Le code de l'expérience est disponible en libre accès sur Github : <https://github.com/LeoVarnet/fastACI>

Les participants portent un casque audio TDH 39 permettant la diffusion de l'expérience. Deux postes informatiques sont utilisés l'un servant à diffuser l'expérience et l'autre servant au contrôle par l'expérimentateur. Un clavier est mis à disposition du participant pour indiquer ses choix.

b) Déroulement de la passation

En pratique, le participant se trouve dans une cabine insonorisée muni d'un casque audio. La passation consiste à devoir différencier deux "cibles" auditives particulières n'ayant aucune signification en français. Dans la présente étude, les logatomes "aga" et "ada" ont été choisis (voir les raisons dans la partie 3). Ces logatomes sont recouverts par un fort bruit de fond.

Après chaque écoute, le participant indique s'il pense avoir entendu "ada" en appuyant sur la touche "1" du clavier ou "aga" correspondant à la touche "2" du clavier.

Au total, l'expérience comporte 4000 écoutes par participant, divisées en 10 sessions de 400 écoutes, soit 3 h de passation environ.

Comme vu dans les sections précédentes, la méthode ACI consiste à placer le système auditif dans une situation d'écoute rendue difficile par la présence d'un bruit de fond, puis à analyser les erreurs de compréhension en les reliant aux caractéristiques acoustiques aléatoires du bruit pour révéler les processus auditifs impliqués dans la tâche. Pour cette raison, le niveau du bruit est ajusté de façon adaptative au cours de l'expérience, afin de s'assurer que le sujet réalise une certaine proportion d'erreurs, déterminée par avance ($\approx 30\%$).

Une fois la première session d'écoute réalisée par le participant, l'expérimentateur réalise un test d'intégration consistant à calculer le RSB moyen auquel il a réalisé ces 400 premières écoutes. Pour cette expérience, ce RSB est fixé à une valeur inférieure ou égale à 0 dB SPL. Cette valeur arbitraire a été choisie parce qu'elle correspond à un niveau "assez facile", permettant ainsi d'exclure les participants complètement incapables de faire la tâche et répondant au hasard.

4.2.3 Stimulis de l'ACI

a) Les logatomes

Les signaux vocaux diffusés sont issus du Oldenburg Logatome Corpus (OLLO) (Wesker et al., 2005) et sont donc des enregistrements de parole naturelle, non manipulée. Ce sont d'ailleurs les mêmes signaux vocaux utilisés lors de l'étude encadrée par Carranante en 2024, consistant à faire passer l'expérience aux normoentendants.

Leur spectrogramme est présenté dans la figure 12. Pour cette présente étude, nous utiliserons les phonèmes ada/aga.

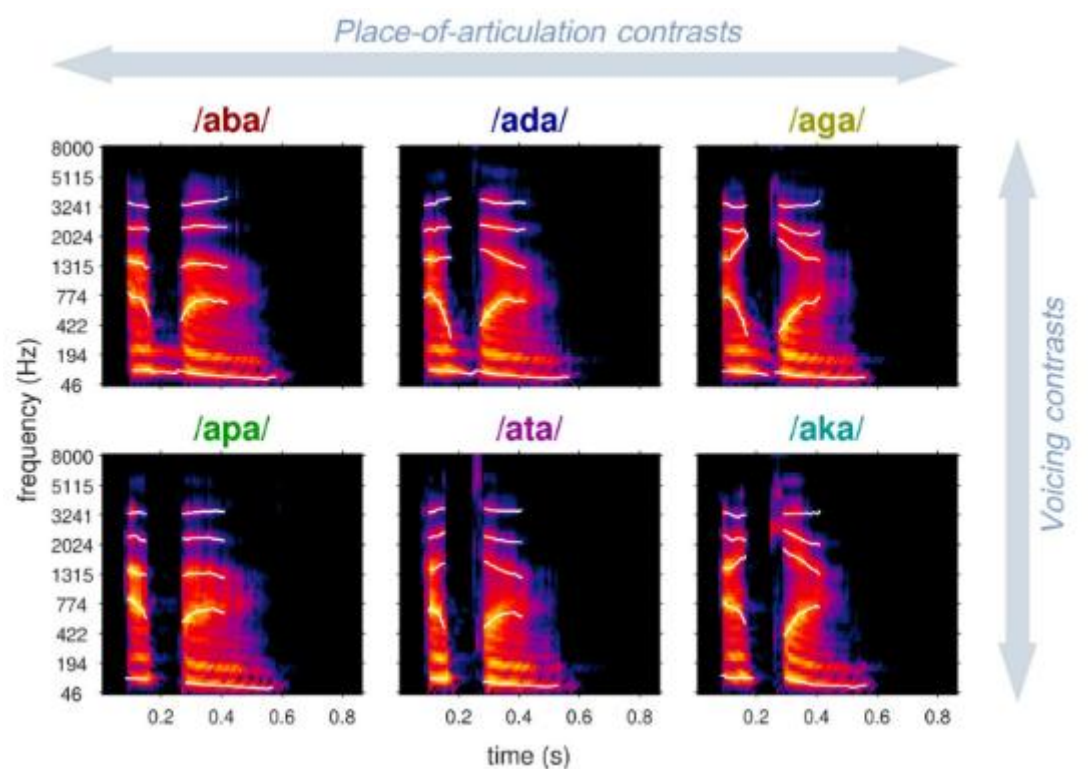


Figure 12 : Spectrogrammes des 6 signaux vocaux pouvant être utilisés pour l'expérimentation de l'ACI

Ces spectrogrammes permettent de mettre en lumière leurs traits distinctifs respectifs. Les résolutions temporelles et fréquentielles sont les mêmes que celles utilisées pour l'analyse. Les zones les plus chaudes indiquent l'énergie acoustique plus élevée sur une échelle logarithmique. Les tracés blancs représentent la fréquence fondamentale f_0 , ainsi que les trajectoires formantiques F1-F4. (Varnet, 2025)

b) Le bruit de fond

La catégorisation des phonèmes est réalisée en présence d'un "bump noise" (bruit à bosse) ayant même spectre à long terme que le bruit blanc (spectre plat couvrant toutes les fréquences) mais avec plus de fluctuations temporelles. (Osses and Varnet, 2024)

Ce bruit a été choisi car il présente des fluctuations intrinsèques d'enveloppe. Ces fluctuations d'enveloppe du bruit présentent, par un effet du hasard, des caractéristiques similaires à l'une des cibles logatomes utilisées. (Voir figure 12). Les probabilités d'erreurs en faveur de cette cible augmentent alors un phénomène de confusion de certains éléments contingents du bruit avec des indices acoustiques du signal cible a alors lieu.

4.2.4 Cadre éthique et réglementaire

Ce protocole est conforme à la loi Jardé. De plus, une autorisation a été obtenue auprès du Comité d'Éthique de la Recherche (CER), Université Paris Cité. Les participants ont pu donner leur consentement éclairé. Une rémunération de 10 euros de l'heure leur a été remise.

4.3 Analyse statistique

4.3.1 Calcul de l'ACI

L'image de Classification Auditive de chaque participant est calculée par un modèle statistique à partir de l'ensemble des données des réponses du participant et des bruits qui lui ont été présentés.

Comme exposé dans la partie 2.3.3, ce calcul peut être compris de manière intuitive comme la corrélation entre les variations du bruit et le choix des réponses.

En pratique, dans le but d'obtenir des ACIs plus claires et interprétables, des méthodes statistiques plus élaborées sont employées. Il convient de préciser qu'il n'est pas nécessaire d'en maîtriser tous les détails pour analyser nos résultats. Ces méthodes statistiques avancées sont de deux types : l'utilisation d'un modèle linéaire généralisé, et l'ajustement de ce modèle par régression pénalisée.

a) Modèles linéaires généralisés (GLM)

Le modèle statistique utilisé est un GLM avec fonction de lien logistique.

Il consiste à additionner les contributions de tous les prédicteurs (l'énergie des pixels temps-fréquence du bruit), en les pondérant, afin de former une combinaison linéaire. Une fonction logistique est alors appliquée à ce résultat, cette fonction ayant l'avantage de transformer n'importe quelle valeur même très grande ou très petite en une probabilité comprise entre 0 et 1. Cette approche correspond bien à la situation étudiée où la variable que l'on cherche à modéliser est une réponse binaire (exemple : reconnaître ou non "aga").

Ainsi, ce modèle permet de relier directement les caractéristiques acoustiques du bruit à la probabilité de réponses du sujet. L'ACI qui en résulte garde l'idée d'un poids attribué à chaque pixel mais ces poids sont, grâce au modèle, interprétés dans un cadre probabiliste rendant l'estimation plus cohérente avec la nature des réponses observées.

b) Régression pénalisée

Par ailleurs, l'ajustement du GLM pour obtenir l'ACI est effectué au moyen d'une régression pénalisée plutôt que l'approche classique de maximum de vraisemblance.

La régression pénalisée repose sur le principe suivant : lorsqu'on ajuste un modèle statistique avec un grand nombre de prédicteurs (les pixels du spectrogramme), il y a un risque que ce modèle devienne trop complexe et qu'il s'ajuste "trop parfaitement" aux données disponibles. Dans ce cas, le modèle apprend non seulement la structure réelle des données mais également le bruit propre à l'échantillon utilisé pour l'apprentissage, ce qui entraîne une incapacité à prédire de nouvelles données. C'est ce qu'on appelle le phénomène de surapprentissage.

Ainsi, afin d'éviter ce problème, la régression pénalisée ajoute une contrainte lors du calcul des coefficients associés à ce prédicteur : plus ces coefficients sont élevés, plus le modèle est "sanctionné". Cela oblige alors le modèle à rester simple et à ne retenir que les prédicteurs apportant une contribution réellement utile. En fonction du type de pénalisation choisi les valeurs des coefficients trop grands sont soit réduites, soit rendues nulles.

Cette approche nous permet alors de simplifier notre modèle et de limiter l'influence des redondances entre pixels voisins. L'ACI obtenue est alors plus fiable et représentative du processus perceptif étudié. (Knoblauch and Maloney, 2008) (Mineault et al., 2009) (Varnet et al., 2013) (Osses et al., 2025)

4.3.2 Principe de la validation croisée

La validation croisée a pour but de valider statistiquement le modèle obtenu pour chaque participant. Dans cette expérience elle permet alors de vérifier la fiabilité de l'ACI de chacun de nos participants.

C'est une méthode utilisée pour estimer la performance d'un modèle statistique et permet alors de limiter le phénomène de surapprentissage (voir 4.3.1).

Elle consiste à diviser la base de données en plusieurs sous-ensembles. Certains de ces sous-ensembles de données servent à entraîner le modèle et d'autres à le tester ce qui nous permet d'obtenir une estimation plus réaliste de notre modèle à générer de nouvelles données (les données de test, qui n'ont pas été utilisées dans l'apprentissage).

Dans cette présente étude, une validation croisée en 10 blocs est appliquée. Les données de chaque participant ont été réparties en dix sections de mêmes tailles. Ainsi à chaque itération, le modèle est entraîné sur 9 blocs et testé sur le 10^{ème} bloc. Ce processus est répété dix fois afin que chaque bloc ait servi une fois au test. La performance finale est une moyenne de ces 10 itérations assurant une estimation plus robuste qu'un test unique (une seule itération).

4.3.3 La déviance

La déviance est la mesure classique de qualité d'ajustement pour un GLM. Elle permet d'évaluer à quel point les prédictions d'un modèle s'éloignent de la réalité. Elle permet alors de déterminer à quel point notre ACI "dévie" de la réalité. Ainsi, plus la déviance est basse, plus l'ACI reflète la réalité.

Pour cette présente étude, deux types de déviations sont alors mesurées : la première est dite "intra sujet" et a pour objectif de mesurer la qualité d'une ACI à prédire les données du participant en question. Ainsi si la déviance est significativement inférieure à zéro, on peut considérer que l'ACI est significative, c'est-à-dire qu'elle capture au moins en partie la stratégie du participant.

La deuxième déviance est dite "inter sujet" et représente la qualité du modèle statistique quand on remplace l'ACI par l'ACI d'autres sujets. Ainsi, plus ces deux valeurs sont proches, plus l'ACI du participant est similaire aux autres ACI. La déviance constitue donc une notion importante pour l'interprétation de notre étude visant à étudier la variabilité des stratégies d'écoute.

5. RESULTATS

5.1 Audiométrie

Les audiométries tonales liminaires des participants malentendants oreilles séparées en conduction aérienne sont représentées sur la figure 13. Les pertes auditives vont d'une déficience auditive légère à une déficience auditive moyenne de catégorie 2 selon la classification BIAP.

Nous avons privilégié les participants ayant des pertes auditives de type presbyacousie. Cependant, dans le but de recruter le plus grand nombre de participants, d'autres profils de déficience auditive ont été inclus tels que : les surdités professionnelles, les surdités génétiques, les surdités brutales ainsi que des surdités ototoxiques.

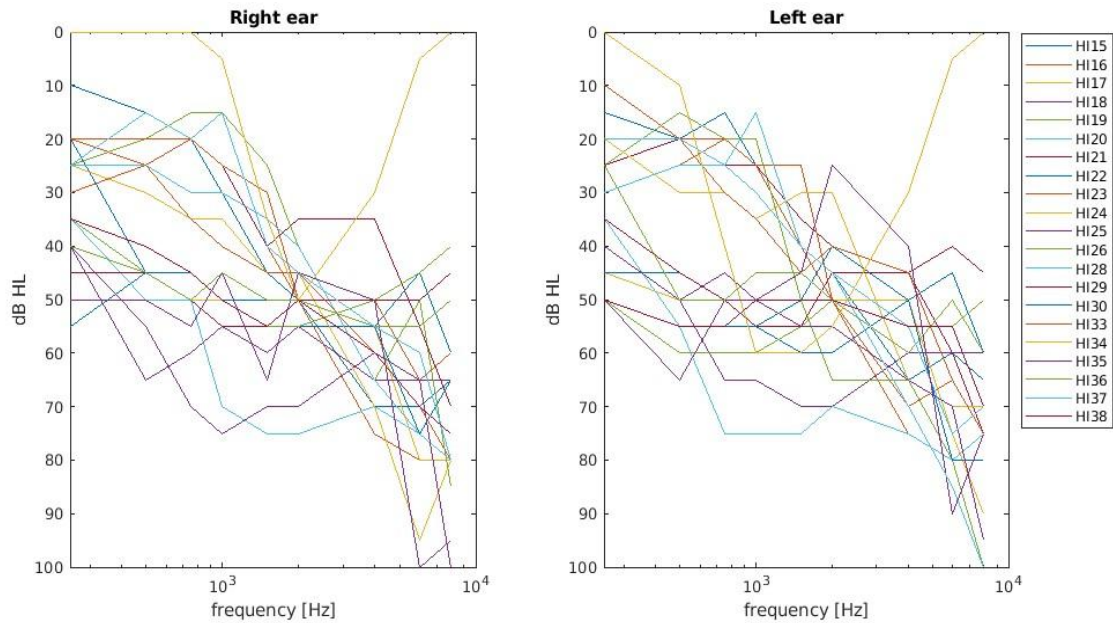


Figure 13 : Audiométries tonales liminaires en conduction aérienne oreilles séparées des participants malentendants de HI15 à HI38

5.2 Effet de l'amplification NAL-R pour chaque participant malentendant

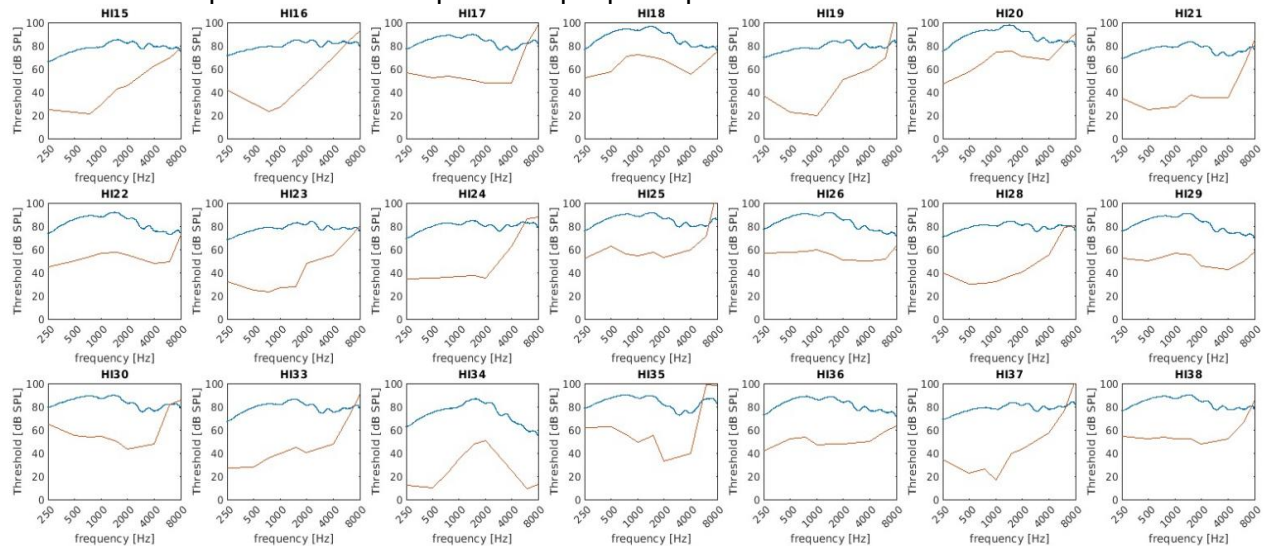


Figure 14 : En orange : Audiométrie tonale en dB SPL et en bleu : Spectre d'un son de parole dans le bruit après amplification par NAL-R à différentes fréquences pour chaque participant malentendant.

La courbe **bleue** sur la figure 14 illustre l'effet de l'amplification NAL-R sur un spectre de parole moyen pour chacun de nos participants malentendants.

On observe que cette amplification est suffisante sur tout le spectre fréquentiel pour 11 participants (HI15, HI18, HI21, HI23, HI26, HI29, HI30, HI33, HI34, HI36 et HI38). On constate que pour HI34, l'amplification est largement suffisante.

Pour les 10 autres participants (HI16, HI17, HI19, HI20, HI22, HI24, HI25, HI28, HI35 et HI37), l'amplification est suffisante sur toutes les fréquences sauf pour celles situées entre 6000 Hz et 8000 Hz.

Toutefois, ces spectres constituent une représentation simplifiée. En effet, comme nous avons pu l'exposer dans la partie 4.2.1 b)- les RSB évoluent durant la tâche. Ainsi, certaines parties du spectre peuvent être audibles à un moment de l'expérience mais inaudibles à d'autres. Cette représentation nous permet tout de même d'avoir une vue d'ensemble quant à l'effet de la correction auditive apportée par NAL-R pour chacun de nos participants malentendants.

5.3 Performances du groupe normoentendants et malentendants

5.3.1 RSB et d prime

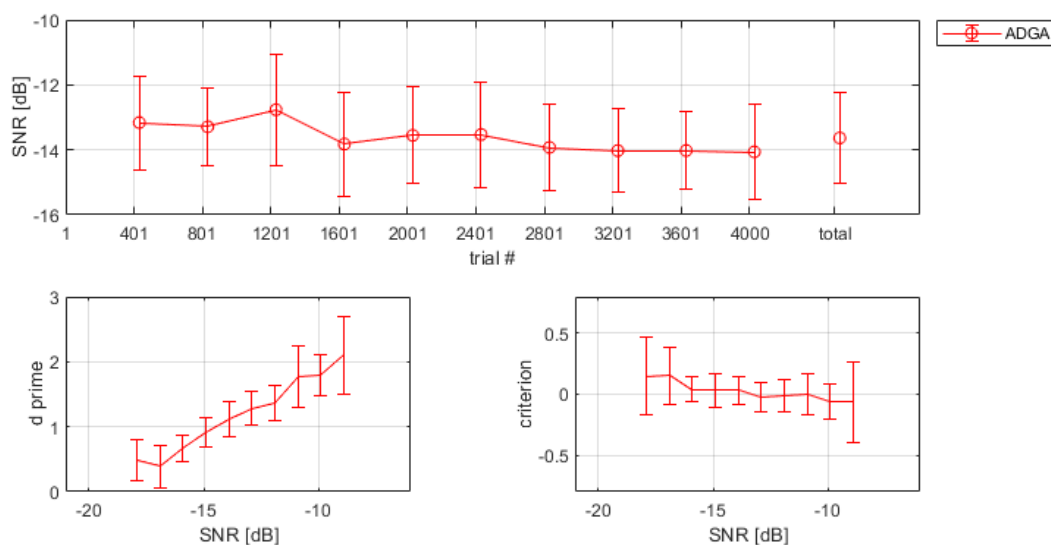


Figure 15 : Représentation graphique du RSB en fonction des écoutes pour les participants normoentendants.

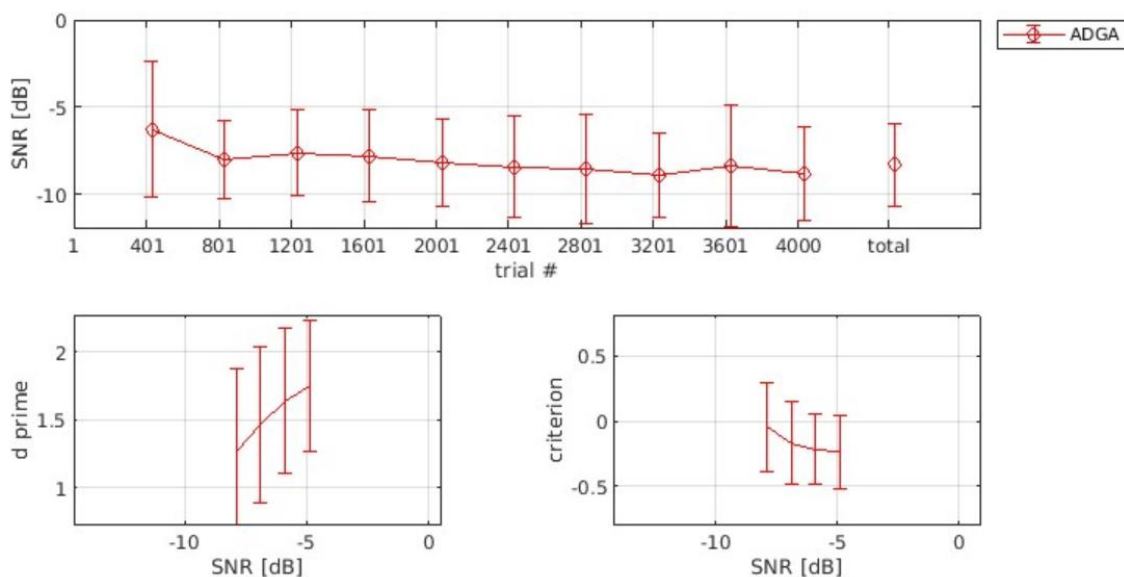


Figure 16 : Représentation graphique du RSB en fonction des écoutes pour les participants malentendants.

On observe une stabilité dans les rapports signal sur bruit obtenus par les groupes au fil des écoutes. Pour les normoentendants, ce RSB moyen est de -13 dB, contre -8 dB pour les malentendants. Pour les deux groupes, les barres d'erreurs reflètent une variabilité interindividuelle.

Le d' prime a été choisi afin de mesurer la sensibilité, c'est-à-dire à quel point les auditeurs entendent la différence entre les phonèmes "d" et "g". C'est un indice plus précis que le pourcentage de réponses correctes. En effet, bien que ce dernier soit une mesure plus intuitive, il ne permet pas de distinguer clairement les deux composantes "sensibilité" et "biais".

Sur le graphique en bas à gauche le d' prime en fonction du RSB est représenté.

On observe que plus le RSB est grand et plus le d' prime est élevé pour les deux groupes ce qui est attendu : la tâche devient plus facile lorsque le RSB augmente. Toutefois, on remarque que pour le groupe de malentendants, la courbe est décalée vers la droite ce qui signifie que pour obtenir un certain niveau de performances, il faut fixer un RSB plus favorable par rapport aux normoentendants.

5.3.2 Déviance du groupe malentendant

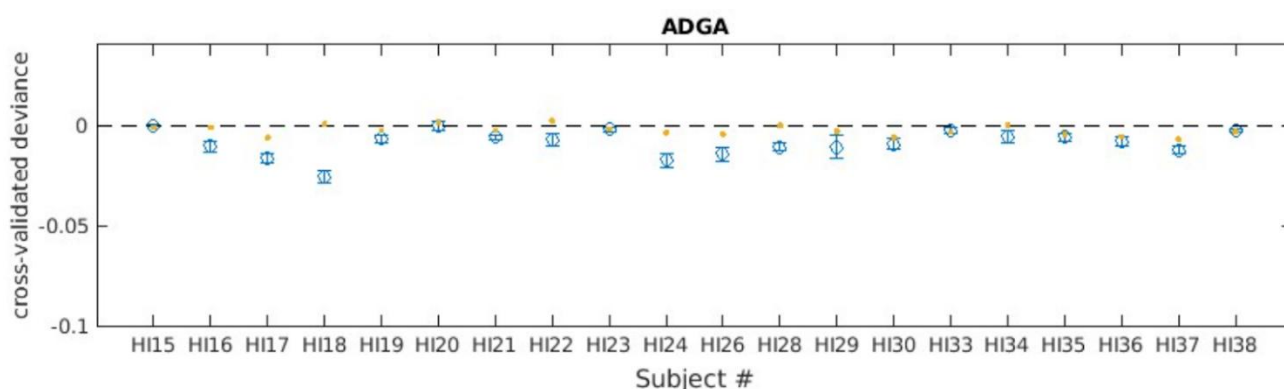


Figure 17 : Performances de chaque ACI individuelle des HI pour la prédiction de nouvelles données du même individu (point bleu) ou des autres individus du même groupe (point orange).

On observe que pour tous les participants la déviance est significativement inférieure à 0 sauf pour HI15 et HI20 (la ligne pointillée représentant le 0 croise la barre d'erreur de la déviance intra-sujet pour ces 2 participants). Le bénéfice de la déviance n'étant pas significatif, cela signifie que le protocole n'a pas permis de calculer une ACI significative, probablement à cause d'un nombre de réponses au hasard trop élevé. Ces deux participants seront donc exclus de l'interprétation de nos résultats.

Le point orange nous permet de mettre en évidence à quel point l'ACI des autres participants est capable de prédire les données du participant en question.

Pour chaque participant, la distance entre la déviance intra-sujet et inter-sujet représente à quel point le modèle du participant lui est spécifique : Plus les deux points sont éloignés, plus le modèle du participant lui est spécifique. À l'inverse, si les 2 points se recouvrent, cela indique qu'on pourrait représenter le modèle du participant par celui des autres sujets.

De ce fait, on observe que la plupart des participants malentendants ont des modèles avec leurs propres spécificités hormis les sujets HI23, HI33, HI35, HI36, HI38 qui ont des modèles plutôt interchangeables avec les autres sujets.

5.4 Lecture des ACI

5.4.1 ACI moyennes des groupes

Sur la tâche ada/aga les ACI moyennes de chacun de nos groupes sont représentées sur les figures 18 et 19.

La méthode de lecture de l'ACI exposé dans la partie 2.3.4 sera alors utilisée pour déterminer les indices acoustiques effectivement utilisés par nos deux groupes.

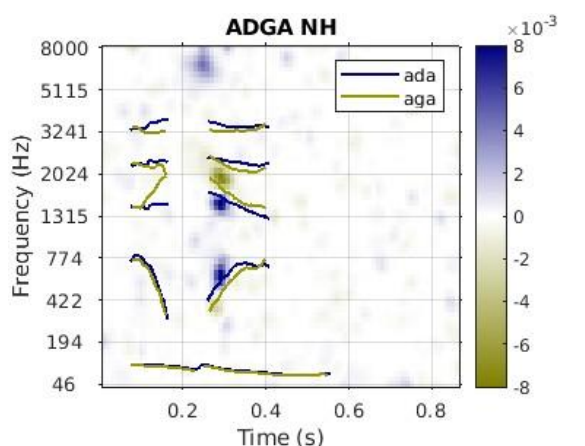


Figure 18 : Image de Classification Auditive moyenne du groupe normo-entendant pour la tâche de distinction phonémique /ada/et /aga/ (Carranante et al., 2024)

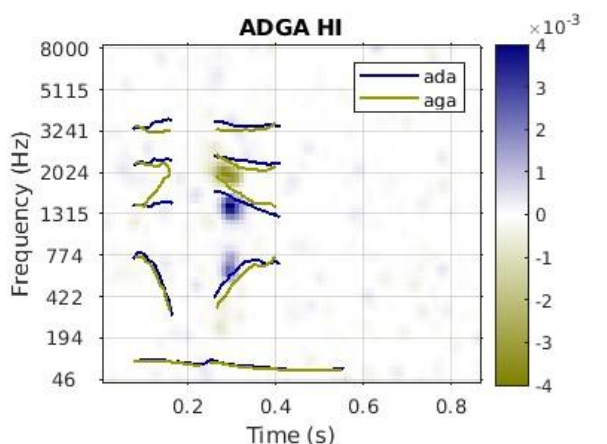


Figure 19 : Image de Classification Auditive moyenne du groupe malentendant pour la tâche de distinction phonémique /ada/et /aga/, obtenue à l'issue de cette étude.

On observe que les ACI moyennes des deux groupes recensent les mêmes indices acoustiques pour les deux groupes sauf le burst qui semble complètement absent sur l'ACI moyenne du groupe des malentendants.

5.4.2 ACI individuelles

a) ACI individuelles des normoentendants

Les ACI présentées sur la figure 20, ont été obtenues lors de l'étude de Carranante en 2024, avec l'ajout d'un sujet supplémentaire (S60) testé par mes soins.

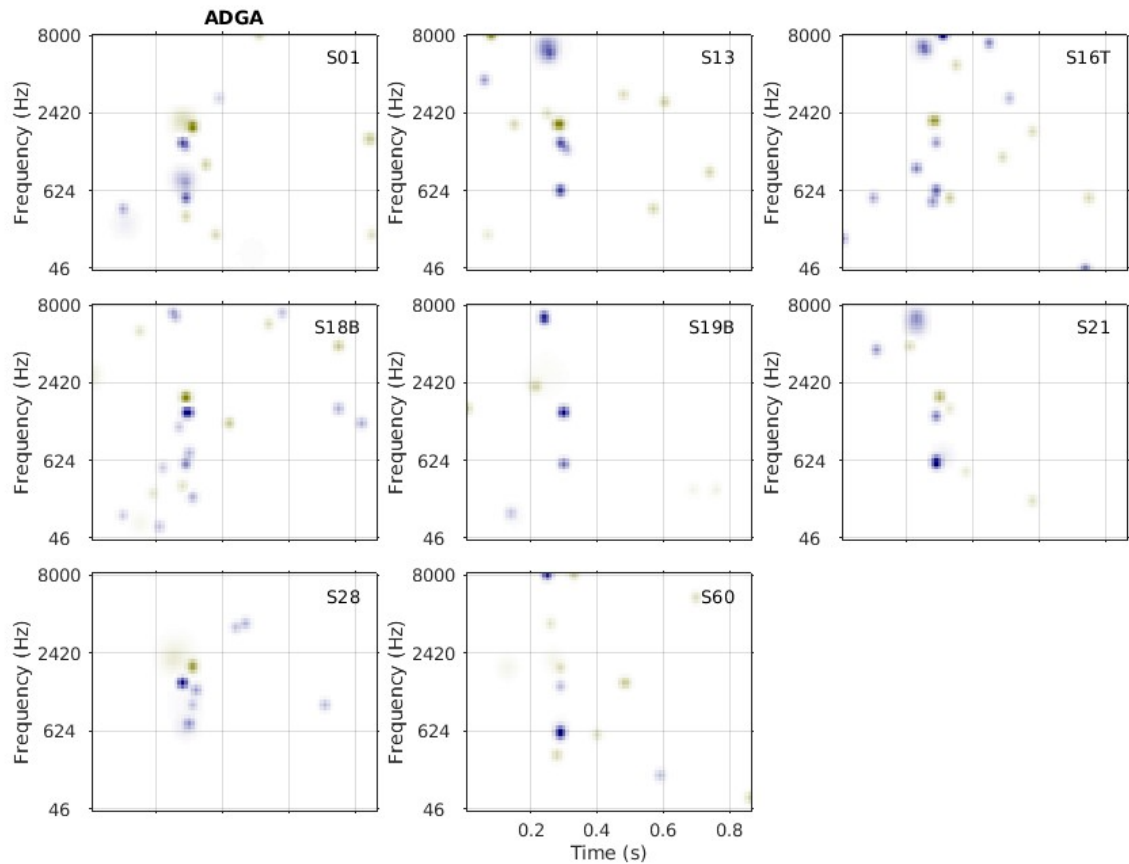
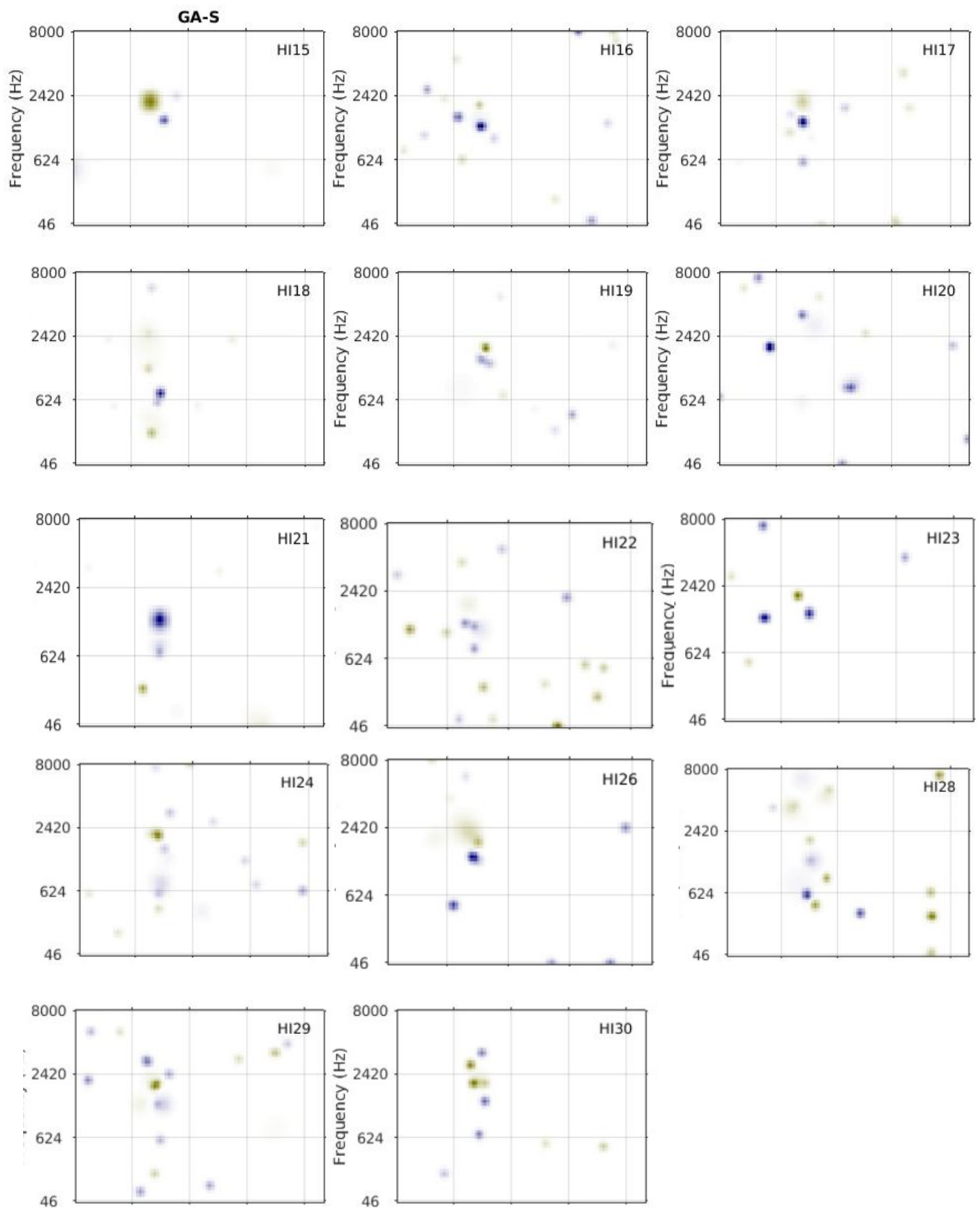


Figure 20 : ACI individuelles des participants normoentendants testés pour la tâche de distinction phonémique /ada/ /aga/ (Carranante et al., 2024)

On observe que le F2 est présent sur chaque ACI contrairement aux autres indices tels que le F1 présents chez tous les participants sauf S28, le burst présent chez tous les participants sauf S1 et S28 (et même l'utilisation de la barre de voisement pour un participant).

b) ACI individuelles des malentendants



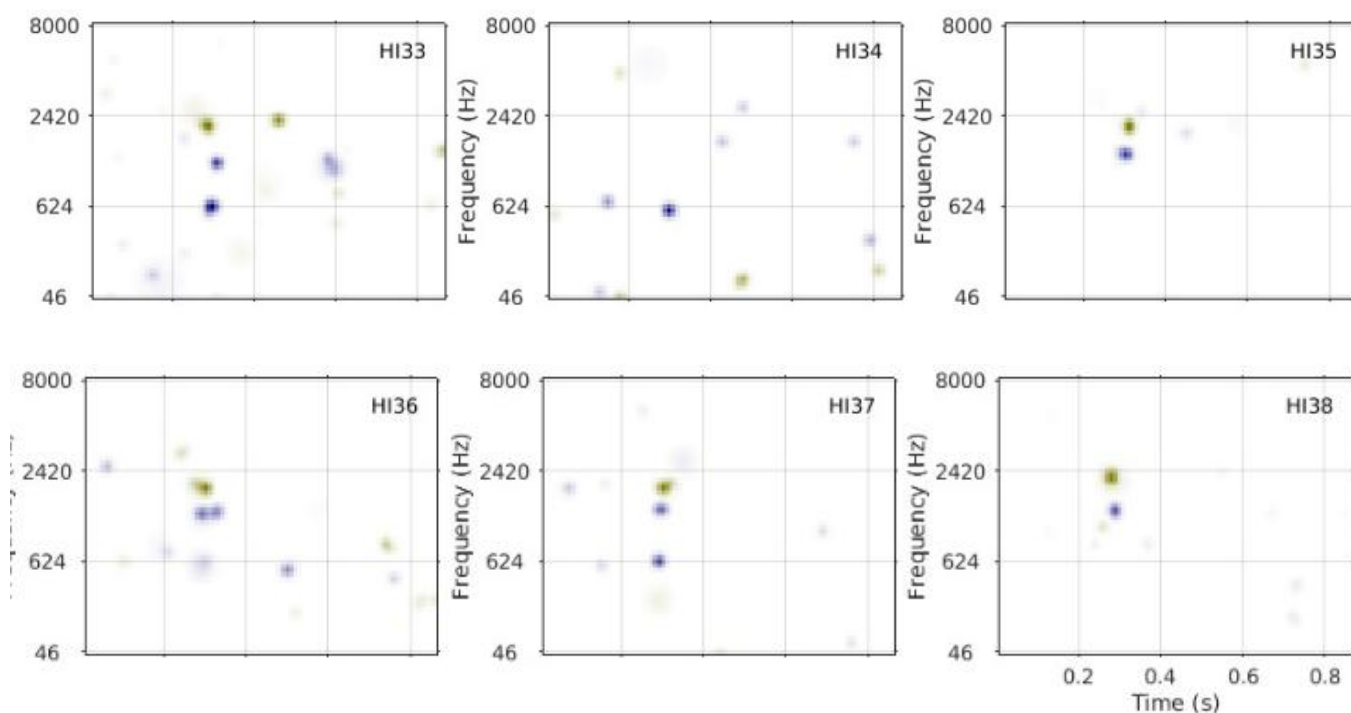


Figure 21 : ACI individuelles de chacun de nos participants malentendants testés pour la tâche de distinction phonémique /ada/ /aga/

Trois observations de la lecture des ACI individuelles pour les participants malentendants (figure 21) sont à noter et seront développées dans la partie 6.2.

- le F2 est présent sur toutes les images retenues sauf HI34 (et très peu pour HI18)
- le Burst est absent pour tous les malentendants sauf HI26, HI24, HI28, HI29, HI30
- le F1 est absent pour HI19, HI23, HI35, HI38

6. DISCUSSION

6.1 Interprétation générale des résultats

6.1.1 RSB

On note que les participants ont rencontré davantage de difficultés à réaliser la tâche au cours de la première session. Cela est probablement lié au temps nécessaire à l'habituement à la tâche, même si une phase d'échauffement était proposée avant le début de l'expérience. Par la suite, une stabilité des performances est à noter, ce qui suggère qu'il n'y a pas d'apprentissage spécifique leur permettant d'améliorer leur résultat mais plus un apprentissage procédural. Ces résultats sont d'ailleurs cohérents avec ceux observés par Carranante pour les normoentendants. (Carranante et al., 2024)

6.1.2 Différence globale entre les stratégies d'écoute des deux groupes

La comparaison des ACI moyennes des deux groupes pour la tâche ada/aga montre que les mêmes types d'indices sont utilisés par les participants, mais avec des pondérations différentes selon ces deux groupes. Bien que les ACI moyennes de nos deux groupes présentent de nombreuses similarités, l'absence de l'indice de burst de désocclusion sur l'ACI moyenne des malentendants est à souligner. Cette différence sera exposée plus en détail dans la partie 6.2.1.

6.1.3 Variabilité interindividuelle des stratégies d'écoute

Pour chaque participant malentendant, nous avons ensuite évalué la capacité du modèle statistique à prédire de nouvelles données provenant soit du même sujet, soit d'un sujet différent. Un écart significatif entre ces deux valeurs indique que les individus utilisent l'information acoustique de façon différente, attribuant ainsi des poids différents aux indices et n'ayant donc pas les mêmes stratégies d'écoute. Nous obtenons alors des ACI avec des différences interindividuelles notables, à l'exception de quelques participants HI23, HI33, HI35, HI36, HI38 ayant des ACI plutôt interchangeables avec les autres sujets.

Cette variabilité des stratégies d'écoute au sein de notre groupe malentendant va dans le sens des nombreuses études réalisées dont certaines sont citées dans notre état de l'art.

Ces résultats mettent ainsi en évidence une hétérogénéité marquée au sein du groupe malentendant. Pour mieux la comprendre, il est nécessaire d'examiner les ACI individuelles afin d'identifier précisément les indices acoustiques utilisés pour chaque participant.

6.2 Discussion spécifique par indice acoustique

6.2.1 L'absence du burst de désocclusion chez les malentendants

Dans la partie résultat, nous avons observé que les malentendants n'utilisent pas ou très peu l'indice de burst haute fréquence (> 5 KHz).

Deux explications possibles peuvent expliquer cette absence de pondération de burst. Tout d'abord, nous avons constaté que la méthodologie NAL-R n'était pas suffisante pour compenser la perte auditive située dans les hautes fréquences entre 6000 Hz et 8000 Hz pour 10 de nos participants. (Voir 5.2) + (Varnet, 2019). Or le burst se trouve dans cette zone fréquentielle. Cela nous amène alors à penser qu'à cause de cette sous-amplification, l'indice de burst n'est pas audible pour ces participants qui ne peuvent donc pas l'utiliser dans leur stratégie d'écoute.

Cependant, pour les 11 autres participants pour lesquels l'amplification NAL-R est suffisante, l'absence (ou la faible présence de ce burst) est constatée. La sous amplification NAL-R ne semble donc pas suffire à expliquer l'absence (ou la faible présence de ce burst).

En effet, une multiplicité de déficits dits "supraliminaires" sont liés à la déficience auditive, comme par exemple l'élargissement des bandes cochléaires, les difficultés à traiter les fluctuations temporelles. (Lorenzi et al., 2006). On peut alors émettre l'hypothèse que des filtres temporels plus larges vont affecter la façon de détecter le burst. Il est de plus possible que cette absence soit due à des atteintes de plus haut niveau. En effet, il ne semble pas impossible que les malentendants aient pris l'habitude d'écouter avec leur perte auditive, et ont donc perdu l'habitude d'utiliser les indices hautes fréquences qu'ils ne parviennent plus à utiliser même lorsqu'on leur rend à nouveau l'accès aux hautes fréquences.

Ces éléments nous montrent alors que l'absence de ce burst est multifactorielle où interagissent à la fois les limites d'amplification et les déficits auditifs supraliminaires.

Pour les 10 autres participants, les sous-amplifications constatées vont d'ailleurs dans le sens des résultats observés dans la première étude des ACI des malentendants. (Pimbert, 2024). En effet, une sous-amplification NAL-R avait pu être constatée pour des niveaux de perte auditive importants et notamment dans les basses fréquences. (Voir 2.3.7 b))

6.2.2 L'indice F1

Nous avons pu observer que tous nos participants n'utilisent pas le F1. C'est d'ailleurs ce qui avait été observé pour les normoentendants dans l'étude des ACI des normoentendants. (Carranante et al., 2024)

On remarque de plus que les trois quarts de nos participants qui ne pondèrent pas cet indice ont des profils de perte de type presbycousie + facteur aggravant. En effet, HI 19 et HI38 présentent une presbycousie aggravée par une surdité professionnelle, et HI35 est atteinte de presbycousie aggravée par des séquelles otitiques. Ces 3 participants se sont de plus très bien adaptés à leurs prothèses auditives les portant plus de 12 h/jour. HI23, bien qu'il ne pondère pas cet indice de F1 n'entre pas dans ce cas de figure présentant une presbycousie sans facteur aggravant et ne parvenant pas à porter ses appareils plus de 7h/jour.

6.2.3 L'indice F2

On constate que tous nos participants normoentendants et malentendants pondèrent le F2 à l'exception d'un seul : HI 34.

Or dans la littérature ce F2 est considéré comme un indice primaire, utilisé par l'ensemble des sujets. (Liberman et al., 1954) (Carranante et al., 2024). Le résultat de HI34 est donc particulièrement surprenant et mérite d'être expliqué.

Deux explications sont envisageables. Premièrement, il est possible que cette information soit effectivement inaudible pour ce participant. Lorsqu'on observe l'audiogramme de ce participant on observe que sa perte auditive est caractérisée par un scotome sur la zone du 1700 Hz qui correspond précisément à la zone fréquentielle du F2. Néanmoins, lorsqu'on se penche sur l'étude de ses performances illustrées sur la figure 22, on constate qu'elle se débrouille mieux que le groupe en moyenne. **En effet, son RSB devient de plus en plus négatif au cours des sessions** contrairement à tous les autres participants dont le score se stabilise.

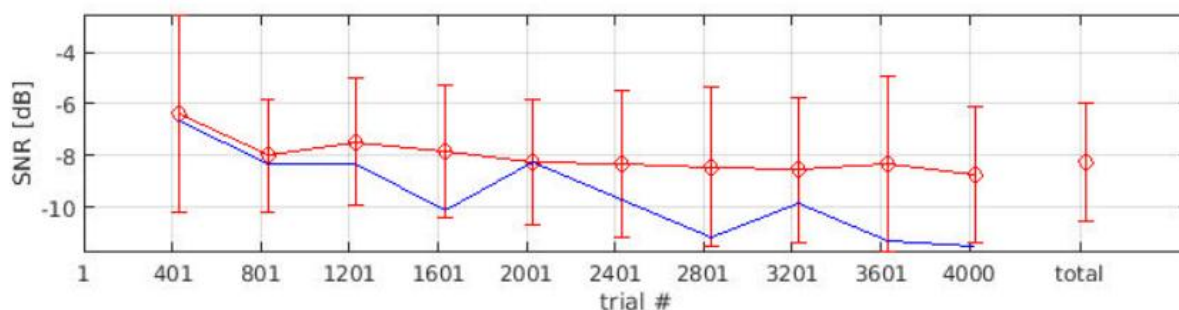


Figure 22 : Représentation graphique du RSB en fonction des écoutes à l'échelle du groupe malentendant et pour HI34.

Peut-être que HI34, ne pouvant réaliser la tâche sur la base du F2, a dû développer une stratégie d'apprentissage compensatoire lors de la passation. Si c'est le cas, on peut penser que ce sujet n'est pas en mesure de percevoir les distinctions d/g dans la parole naturelle, mais parvient néanmoins à se débrouiller en reconstituant le sens à partir du contexte. Une deuxième option est que ce sujet ait développé une stratégie compensatoire basée sur le F1 de façon plus générale, même hors du cadre de cette expérience. Si c'est le cas, cette observation, même isolée, remettrait en question pour la première fois l'idée de rôle principal et universel du F2.

On constate d'ailleurs que le participant HI18 ayant lui aussi une perte dans la zone du 1700 Hz et exploite (mais très peu) cet indice.

CONCLUSION

Ce mémoire portait sur l'étude de la variabilité interindividuelle des stratégies d'écoute chez les participants malentendants appareillés. Pour cela, nous avons utilisé la méthode de l'Image de Classification Auditive permettant de cartographier de manière précise la multiplicité des indices acoustiques effectivement utilisés par un participant pour catégoriser les phonèmes. Ainsi, nous avons pu constater que les malentendants utilisaient les mêmes indices acoustiques que les normoentendants à l'exception du burst de désocclusion et, ce, alors que leur perte de sensibilité était compensée par une amplification NAL-R.

En plus d'être très précise dans sa résolution, cette méthode nous permet une analyse à l'échelle individuelle nous permettant alors de relier certaines singularités des images avec des profils de perte auditive particuliers. Ainsi, l'absence de l'utilisation du F2 pour un de nos participants pourrait remettre en cause le caractère universel de l'utilisation de cet indice. Par ailleurs, l'absence de pondération du F1 semble plus fréquente chez les presbycousies aggravées par un facteur.

Toutefois, ce protocole présente certaines limites notables. En effet, comme il avait été constaté dans l'étude précédente (Pimbert, 2024), la méthodologie NAL-R, de par son amplification limitée, peut être responsable chez une partie de nos participants (mais pas tous) de l'absence de pondération de l'indice burst. De plus, une fatigabilité des participants suite à la réalisation de l'expérience était notable, notamment due aux nombreuses écoutes nécessaires à la réalisation de la tâche.

Ainsi, afin de pallier ces limitations, nous pourrions envisager un protocole, avec un nombre d'écoutes réduit permettant de passer l'expérience avec les prothèses auditives du malentendant pouvant ainsi bénéficier des spécificités de ses réglages (traitement du signal, compression, méthodologie de pré-réglages). Cela pourrait alors être envisagé en deux temps avec d'abord un groupe qui passe une expérience assez similaire mais avec une amplification plus proche de la réalité que NAL-R. Puis une deuxième étape avec des participants qui réalisent l'expérience avec leurs propres appareils (en faisant attention à bien mesurer le gain effectif). Ces ajustements nous permettraient alors de documenter au mieux ces variabilités de stratégies d'écoute dans des situations d'écoute plus proches de la réalité de l'utilisation d'audioprothèses. Néanmoins l'étude présentée dans ce mémoire est la première étape nécessaire dans ce projet à plus long terme. Ces recherches en audiologie fondamentale sont importantes pour mieux comprendre les pertes auditives et viser dans le futur une amélioration et une meilleure personnalisation des prothèses auditives.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahissar, M., Hochstein, S., 1993. Attentional control of early perceptual learning. *Proc Natl Acad Sci U S A* 90, 5718–5722. <https://doi.org/10.1073/pnas.90.12.5718>
- Amelot, A., 2023. Support de cours de linguistique phonétique.
- Boë, L.-J., Sawallis, T.R., Fagot, J., Badin, P., Barbier, G., Captier, G., Ménard, L., Heim, J.-L., Schwartz, J.-L., 2019. Which way to the dawn of speech: Reanalyzing half a century of debates and data in light of speech science. *Sci Adv* 5, eaaw3916. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw3916>
- Bosen, A.K., Chatterjee, M., 2016. Band importance functions of listeners with cochlear implants using clinical maps. *J Acoust Soc Am* 140, 3718. <https://doi.org/10.1121/1.4967298>
- Byrne, D., Dillon, H., 1986. The National Acoustic Laboratories' (NAL) new procedure for selecting the gain and frequency response of a hearing aid. *Ear Hear* 7, 257–265. <https://doi.org/10.1097/00003446-198608000-00007>
- Carranante, G., Cany, C., Farri, P., Giavazzi, M., Varnet, L., 2024. Mapping the spectrotemporal regions influencing perception of French stop consonants in noise | Scientific Reports [WWW Document]. URL <https://www.nature.com/articles/s41598-024-77634-w> (accessed 12.2.24).
- Cooper, F.S., Liberman, A.M., Borst, J.M., 1951. The interconversion of audible and visible patterns as a basis for research in the perception of speech. *Proc Natl Acad Sci U S A* 37, 318–325. <https://doi.org/10.1073/pnas.37.5.318>
- Fletcher, H., 1922. The nature of speech and its interpretation. *Journal of the Franklin Institute*, 193(6) :729–747
- Hazan, V., Rosen, S., 1991. Individual variability in the perception of cues to place contrasts in initial stops. *Percept Psychophys* 49, 187–200. <https://doi.org/10.3758/bf03205038>
- Juret, L., 2021. Un instrument très utile : le triangle vocalique. Atelier Vocal. URL <https://www.ateliervocal.fr/post/r%C3%A9sonance-triangle-vocalique>
- Knoblauch, K., Maloney, L.T., 2008. Estimating classification images with generalized linear and additive models. *J Vis* 8, 10.1-19. <https://doi.org/10.1167/8.16.10>
- Lesica, N.A., 2018. Why Do Hearing Aids Fail to Restore Normal Auditory Perception? *Trends Neurosci* 41, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2018.01.008>
- Liberman, A. M., Delattre, P. C., and Cooper, F. S., 1952. The role of selected stimulus-variables in the perception of the unvoiced stop consonants. *The American journal of psychology*, 65(4) :497–516.
- Miller, G. A. and Nicely, P. E., 1955. An Analysis of Perceptual Confusions Among Some English Consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27(2) :338–352.
- Mineault, P.J., Barthelmé, S., Pack, C.C., 2009. Improved classification images with sparse priors in a smooth basis. *J Vis* 9, 17.1-24. <https://doi.org/10.1167/9.10.17>
- OMS, 2021. 1 in 4 people projected to have hearing problems by 2050.

- Osses, A., Varnet, L., 2024. A microscopic investigation of the effect of random envelope fluctuations on phoneme-in-noise perception. *J Acoust Soc Am* 155, 1469–1485. <https://doi.org/10.1121/10.0024469>
- Peterson, G.E., Barney, H.L., 1952. Control Methods Used in a Study of the Vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America* 24.
- Pimbert, E., 2024. Etude des fonctions de pondération spectro-temporelles des auditeurs malentendants appareillés en discrimination de phonèmes.
- Ponsot, E., Susini, P., Saint Pierre, G., Meunier, S., 2013. Temporal loudness weights for sounds with increasing and decreasing intensity profiles. *J Acoust Soc Am* 134, EL321-326. <https://doi.org/10.1121/1.4819184>
- Phatak, S. A., Lovitt, A., and Allen, J. B., 2008. Consonant confusions in white noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(2) :1220–1233.
- Rajkumar, S., Muttan, S., Jaya, V., Vignesh, S.S., 2013. Comparative Analysis of Different Prescriptive Formulae Used in the Evaluation of Real Ear Insertion Gain for Digital Hearing Aids. *ujbe* 1, 32–41. <https://doi.org/10.13189/ujbe.2013.010202>
- Turner, C.W., Robb, M.P., 1987. Audibility and recognition of stop consonants in normal and hearing-impaired subjects. *J Acoust Soc Am* 81, 1566–1573. <https://doi.org/10.1121/1.394509>
- Varnet, L., 2025. Une étude microscopique des mécanismes auditifs de la perception du langage oral (Habilitation à Diriger des Recherches). Ecole Normale Supérieure (Laboratoire des Systèmes Perceptifs).
- Varnet, L., Knoblauch, K., Meunier, F., Hoen, M., 2013. Using auditory classification images for the identification of fine acoustic cues used in speech perception. *Front Hum Neurosci* 7, 865. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00865>
- Varnet, L., 2024. Visualiser ce que nous écoutons pour comprendre les sons de parole | DBAO | Léo Varnet. URL <https://dbao.leo-varnet.fr/2024/06/20/visualiser-ce-que-nous-ecoutons-pour-comprendre-les-sons-de-parole/> (accessed 12.2.24).
- Varnet, L., Léger, A.C., Boucher, S., Bonnet, C., Petit, C., Lorenzi, C., 2021. Contributions of Age-Related and Audibility-Related Deficits to Aided Consonant Identification in Presbycusis: A Causal-Inference Analysis. *Front Aging Neurosci* 13, 640522. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.640522>
- Varnet, L., 2019. Rôle des indices acoustiques dans la compréhension de la parole chez les individus normoentendants et malentendants | DBAO | Léo Varnet. URL <https://dbao.leo-varnet.fr/2019/01/09/role-des-indices-acoustiques-dans-la-comprehension-de-la-parole-chez-les-individus-normoentendants-et-malentendants/> (accessed 12.2.24).
- Varnet, L., Langlet, C., Lorenzi, C., Lazard, D.S., Michey, C., 2019. High-Frequency Sensorineural Hearing Loss Alters Cue-Weighting Strategies for Discriminating Stop Consonants in Noise. *Trends in Hearing* 23, 2331216519886707. <https://doi.org/10.1177/2331216519886707>
- Varnet, L., 2015. Identification des indices acoustiques utilisés lors de la compréhension de la parole dégradée. Université Claude Bernard – Lyon I, Lyon, France.
- Wesker, T., Meyer, B., Wagener, K., Anemüller, J., Mertins, A., Kollmeier, B., 2005. Oldenburg logatome speech corpus (OLLO) for speech recognition experiments with humans and machines, in:

Interspeech 2005. Presented at the Interspeech 2005, ISCA, pp. 1273–1276.
<https://doi.org/10.21437/Interspeech.2005-485>

Wright, R., 2004. A review of perceptual cues and cue robustness. In Hayes, B., Steriade, D., and
Kirchner, R., editors, *Phonetically Based Phonology*, pages 34–57. Cambridge University Press,
Cambridge

Yoho, S.E., Bosen, A.K., 2019. Individualized frequency importance functions for listeners with
sensorineural hearing loss. *J Acoust Soc Am* 145, 822. <https://doi.org/10.1121/1.5090495>